

André Monteiro Santos Souza

**MAPEAMENTO DE ÁREAS SUSCETÍVEIS A  
DESLIZAMENTOS RASOS NA REGIÃO DA BACIA DO RIO  
CAMBORIÚ**

Trabalho de Conclusão de Curso  
submetido ao Curso de Graduação da  
Universidade Federal de Santa  
Catarina para a obtenção do Grau de  
Engenheiro Civil.

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

Florianópolis  
2015

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

Souza, André Monteiro Santos  
MAPEAMENTO DE ÁREAS SUSCETÍVEIS A DESLIZAMENTOS RASOS  
NA REGIÃO DA BACIA DO RIO CAMBORIÚ / André Monteiro Santos  
Souza ; orientador, Rafael Augusto dos Reis Higashi -  
Florianópolis, SC, 2015.  
p.

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

Inclui referências

1. Engenharia Civil. 2. Engenharia Civil. 3. Mapeamento  
Geotécnico. 4. Áreas de Risco. 5. Mapeamento de  
Suscetibilidade. I. Higashi, Rafael Augusto dos Reis. II.  
Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em  
Engenharia Civil. III. Título.

André Monteiro Santos Souza

**MAPEAMENTO DE ÁREAS SUSCETÍVEIS A  
DESLIZAMENTOS RASOS NA REGIÃO DA BACIA DO RIO  
CAMBORIÚ**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado e aprovado, em sua forma final, pelo Curso de Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 10 de julho de 2015

---

Prof. Luis Alberto Gómez, Dr.

Banca examinadora:

  
Prof. Rafael Augusto dos Reis Higashi, Dr.  
Orientador (UFSC)

---

Prof. Orlando Martini de Oliveira, Dr.  
Examinador Interno (UFSC)

---

Eng. Gisele Marilha Pereira Reginatto, M.  
Examidora Externa



## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais, Ramiro e Bárbara, minha irmã, Marina, pelo apoio e motivação prestados nesse percurso trilhado.

Ao meu orientador, Professor Dr. Rafael Augusto dos Reis Higashi, por todo auxílio, dicas, conversas e pela amizade prestada.

A todos os meus professores, durante essa jornada, que de alguma forma repassaram algum tipo de ensinamento, didático, ou de vida.

Ao Laboratório de Mapeamento Geotécnico (LAMGEO), e a seus laboratoristas, que possibilitaram e ajudaram na execução desta pesquisa.

A todos os amigos, que sempre estiveram presentes nos momentos de distração, de estudos, de companheirismo e de apoio, na graduação, e espero, que para além dela.



## RESUMO

O crescimento desordenado, associado à má gestão e a falta de planejamento público das cidades, vem causando no Brasil a ocupação de áreas com severas restrições ao uso urbano, como encostas, áreas de preservação permanente, etc. Fator este, que associado a instabilidades atmosféricas aumentam a possibilidade de ocorrência de desastres naturais, como erosão, deslizamento de terras, enchentes, entre outros. O trabalho a seguir, apresenta um mapa geotécnico para a região da Bacia do Rio Camboriú, seguido de um mapa de áreas suscetíveis a deslizamentos rasos. Para a execução deste, o estudo empregou a metodologia de Davison Dias (1995), que compreende a realização de ensaios de campo e laboratório para caracterização geotécnica da bacia. Para a análise de riscos de deslizamentos foi aplicado o modelo criado por Dietrich e Montgomery (1998), o SHALSTAB (*Shallow Stability Model*), que utiliza de iteração matemática entre a área de contribuição da bacia, seus parâmetros topográficos e geotécnicos para delimitar as áreas suscetíveis a deslizamentos rasos. Os resultados obtidos apontam instabilidades maiores nas regiões de relevo íngreme, principalmente nas unidades Podzólico Vermelho-Amarelo de substrato Xisto e Cambissolo substrato em Gnaisse, devido à declividade acentuada e coesão baixa.

**Palavras-Chaves:** Movimentos de massa. Mapeamento geotécnico. SHALSTAB.



## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - GRÁFICO PARA A DETERMINAÇÃO EXPEDITA MCT PELO MÉTODO DAS PASTILHAS	23
FIGURA 2 – INDÍCIOS DE RASTEJO	25
FIGURA 3 – QUEDA DE ROCHA	26
FIGURA 4 – CORRIDA DE DETRITOS	27
FIGURA 5 – DESLIZAMENTO ROTACIONAL	28
FIGURA 6 – DESLIZAMENTO TRANSLACIONAL	29
FIGURA 7 – DESLIZAMENTO EM CUNHA	29
FIGURA 8 – ARQUITETURA DE SISTEMA DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA – SIG.	33
FIGURA 9 – REPRESENTAÇÕES VETORIAIS	34
FIGURA 10 – EXEMPLOS DE REPRESENTAÇÕES MATRICIAIS PARA UM MAPA	35
FIGURA 11 – ESQUEMA BÁSICO DA METODOLOGIA DAVISON DIAS	41
FIGURA 12 – SIMBOLOGIA DAS UNIDADES GEOTÉCNICAS	42
FIGURA 13– DIAGRAMA DA METODOLOGIA DE USO E OCUPAÇÃO DOS SOLOS DE CIDADES COSTEIRAS BRASILEIRAS	44
FIGURA 14 – EMPREGO DA SIMBOLOGIA DE UNIDADES GEOTÉCNICAS	45
FIGURA 15 – MODELO HIDROLÓGICO ESTACIONÁRIO DE RECARGA UNIFORME.	48
FIGURA 16 – REPRESENTAÇÃO DO MODELO DE TALUDE INFINITO	51
FIGURA 17 – ESQUEMA DO FLUXO DE ÁGUA EM FUNÇÃO DAS CÉLULAS VIZINHAS	52
FIGURA 18 – LOCALIZAÇÃO DE CAMBORIÚ	55
FIGURA 19– LIMITES DE ESTUDO DA BACIA DO RIO CAMBORIÚ	57
FIGURA 20– MAPA GEOLÓGICO DA BACIA DO RIO CAMBORIÚ	58
FIGURA 21– MAPA PEDOLÓGICO DA BACIA DO RIO CAMBORIÚ	60

FIGURA 22 – EXEMPLO DE ESTIMATIVA DE UNIDADES GEOTÉCNICAS	63
FIGURA 23 - ESQUEMA DE PENETRAÇÃO DE PASTILHAS DE SOLOS.	67
FIGURA 24 – GRÁFICO PARA A DETERMINAÇÃO EXPEDITA MCT	69
FIGURA 25 – MAPA DE SUMIDOUROS	71
FIGURA 26 – TIN EM VISTA PARCIAL TRIDIMENSIONAL FONTE: AUTOR.	73
FIGURA 27 – MAPA DIGITAL DO TERRENO FONTE: AUTOR.	74
FIGURA 28 – MAPA DE DECLIVIDADES	75
FIGURA 29 – MAPA DE DIREÇÕES DE FLUXO	76
FIGURA 30 – MAPA DE CONTRIBUIÇÃO	77
FIGURA 31 – PONTOS DE COLETA NA BACIA COM PROJEÇÃO DAS UNIDADES GEOTÉCNICAS E RELEVO.	79
FIGURA 32 – FOTOS DOS PONTOS DE COLETA FONTE: GOOGLE EARTH.	80
FIGURA 33 – TALUDE DE COLETA DO PONTO 1 E PONTO 2, RESPECTIVAMENTE.	80
FIGURA 34 – TALUDE DE COLETA DO PONTO 3 E PONTO 4, RESPECTIVAMENTE. FONTE: AUTOR.	81
FIGURA 35 – TALUDE DE COLETA DO PONTO 5 E PONTO 6, RESPECTIVAMENTE. FONTE: AUTOR.	81
FIGURA 36 – PONTOS DE COLETA NA BACIA DO RIO CAMBORIÚ FONTE: AUTOR.	83
FIGURA 37 – AMOSTRAS DOS PONTOS 1 E 2 NO PROCESSO DE REABSORÇÃO DE ÁGUA	84
FIGURA 38 – PONTO DE RETIRADA DE COLETA DA AMOSTRA 4	87
FIGURA 39 – MAPA GEOTÉCNICO PRELIMINAR DO MUNICÍPIO	89
FIGURA 40 - DECLIVIDADE NA UNIDADE PVX	91
FIGURA 41 - DECLIVIDADE NA UNIDADE GSQ	92
FIGURA 42 - DECLIVIDADE NA UNIDADE PVG	94
FIGURA 43 - DECLIVIDADE NA UNIDADE CGN.	95

FIGURA 44 – CLASSES DE ESTABILIDADE	96
FIGURA 45 – COESÃO MÉDIA DAS UNIDADES DA BACIA.	97
FIGURA 46 – ÂNGULO DE ATRITO INTERNO MÉDIO DAS UNIDADES DA BACIA.	98
FIGURA 47 – MASSA ESPECÍFICA NATURAL DAS UNIDADES DA BACIA.	99
FIGURA 48 - MASSA ESPECÍFICA SATURADA DAS UNIDADES DA BACIA.	100
FIGURA 49 – CENÁRIO 1 – MAPA DE SUSCETIBILIDADE A DESLIZAMENTOS RASOS COM ESPESSURA DE CAMADA DE 2M E PESO ESPECÍFICA SATURADO DO SOLO.	102
FIGURA 50 – CENÁRIO 2 – MAPA DE SUSCETIBILIDADE A DESLIZAMENTOS RASOS COM ESPESSURA DE CAMADA DE 5M E PESO ESPECÍFICA SATURADO DO SOLO.	103
FIGURA 51 – CENÁRIO 3 – MAPA DE SUSCETIBILIDADE A DESLIZAMENTOS RASOS COM ESPESSURA DE CAMADA DE 10M E PESO ESPECÍFICA SATURADO DO SOLO.	104
FIGURA 52 – GRÁFICO DE PORCENTAGEM DE ESTABILIDADE PARA O CENÁRIO 1	105
FIGURA 53 – GRÁFICO DE PORCENTAGEM DE ESTABILIDADE PARA O CENÁRIO 2	105
FIGURA 54 – GRÁFICO DE PORCENTAGEM DE ESTABILIDADE PARA O CENÁRIO 3	106
FIGURA 55 – SOBREPOSIÇÃO DO MAPA GEOTÉCNICA / MAPA DE SUSCETIBILIDADE DO CENÁRIO 2.	107

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – CLASSIFICAÇÃO DOS GRUPOS DE SOLOS	22
TABELA 2 - CLASSIFICAÇÃO DOS MOVIMENTOS DE MASSA FONTE: ADAPTADO DE VARNES (1978).	24
TABELA 3 - FATORES DEFLAGRADORES DOS MOVIMENTOS DE MASSA	30
TABELA 4 – CLASSES DE CAUSAS DE DESLIZAMENTOS	31
TABELA 5 – COMPARAÇÃO ENTRE ESTRUTURAS VETORIAIS E MATRICIAIS PARA MAPAS TEMÁTICOS	35
TABELA 6 – CLASSIFICAÇÃO DO GRAU DE RISCO DE ESTABILIDADE. FONTE: IPT (2007).	37
TABELA 7 – METODOLOGIAS DE MAPEAMENTO GEOTÉCNICO	39
TABELA 8 – SIMBOLOGIA DAS CLASSES PEDOLÓGICAS	42
TABELA 9 – GEOLOGIA SIMPLIFICADA	43
TABELA 10 – IDENTIFICAÇÃO DE ESPESSURA DE HORIZONTE	43
TABELA 11 – CLASSES DE ESTABILIDADE	47
TABELA 12 – CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DA BACIA DO RIO CAMBORIÚ	56
TABELA 13 – ESCALA GRANULOMÉTRICA	65
TABELA 14 – COORDENADAS UTM DOS PONTOS AMOSTRADOS.	78
TABELA 15 – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS SOLOS DA BACIA	82
TABELA 16 – RESULTADOS DA CLASSIFICAÇÃO GRANULOMÉTRICA	82
TABELA 17 – RESULTADOS CLASSIFICAÇÃO MCT.	84
TABELA 18 – OBSERVAÇÕES MCT.	85
TABELA 19 – LIMITES DE ATTERBERG	86
TABELA 20 – RESULTADOS DE CISALHAMENTO DIRETO	87
TABELA 21 – SIMBOLOGIA E ÁREAS DAS UNIDADES DA BACIA.	90
TABELA 22 – DEFINIÇÃO DOS CENÁRIOS DE SUSCETIBILIDADE	101



# CONTEÚDO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	18
<b>1.1 Objetivo Geral</b> .....	19
<b>1.2 Objetivos Específicos</b> .....	19
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	20
<b>2.1 Pedologia</b> .....	20
<b>2.1.1 Classificação dos Solos</b> .....	20
2.1.1.1 Solos Residuais.....	20
2.1.1.2 Solos Sedimentares.....	21
2.1.1.3 Classificação MCT.....	21
<b>2.2.1 Rastejos</b> .....	25
<b>2.2.2 Quedas</b> .....	25
<b>2.2.3 Corridas</b> .....	26
<b>2.2.4 Deslizamentos</b> .....	27
2.2.4.1 Deslizamentos Rotacionais.....	28
2.2.4.2 Deslizamentos Translacionais.....	28
2.2.4.3 Deslizamentos em Cunha.....	29
<b>2.3 Fatores Deflagradores</b> .....	29
<b>2.4 Sistemas de Informações Geográficas (SIG)</b> .....	32
<b>2.4.1 Estrutura de Dados</b> .....	33
2.4.1.1 Dados Vetoriais.....	33
2.4.1.2 Dados Matriciais ( <i>Raster</i> ).....	34
2.4.1.3 Diferenças entre as Representações.....	35
<b>2.5 Áreas de Risco</b> .....	36
<b>2.6 Mapeamento Geotécnico</b> .....	38
<b>2.6.1 Metodologias de Mapeamento Geotécnico</b> .....	38

2.6.1.1	Metodologia EESC/USP - Zuquette (1987).....	40
2.6.1.2	Metodologia Davison Dias (1995).....	40
2.6.1.3	Metodologia de Higashi (2006).....	44
<b>2.7</b>	<b>Mapeamento de Áreas de Risco em ambiente SIG</b> .....	<b>46</b>
<b>2.7.1</b>	<b>Modelo SHALSTAB</b> .....	<b>46</b>
2.7.1.1	Modelo Hidrológico.....	48
2.7.1.2	Modelo de Talude Infinito.....	50
<b>3.</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO</b> .....	<b>54</b>
<b>3.1.</b>	<b>Camboriú</b> .....	<b>54</b>
<b>3.2.</b>	<b>Bacia do Rio Camboriú</b> .....	<b>55</b>
3.2.2.	Geologia.....	58
3.2.3.	Pedologia.....	60
<b>4.</b>	<b>MÉTODO</b> .....	<b>62</b>
4.1.	Edição dos Mapas.....	63
4.2.	Ensaio de caracterização.....	64
4.3.	Resistência ao Cisalhamento.....	69
4.3.1.	O ensaio.....	69
4.3.2.	Resultados.....	70
4.4.	Mapa Geotécnico.....	70
4.5.	Modelo SHALSTAB.....	71
<b>5.</b>	<b>RESULTADOS – BACIA DO RIO CAMBORIÚ</b> .....	<b>72</b>
<b>5.1.</b>	<b>Parâmetros Topográficos</b> .....	<b>73</b>
5.1.1.	Rede triangular irregular (TIN).....	73
5.1.2.	Modelo Digital do Terreno (MDT).....	73
5.1.3.	Mapa de Declividades.....	75
5.1.4.	Mapa de Direções de Fluxo.....	76

5.1.5. Mapa de Contribuição .....	77
5.2. Ensaios .....	78
5.2.1. Caracterização das Amostras .....	82
5.3. Parâmetros de Resistência .....	86
5.4. Mapeamento Geotécnico .....	89
5.4.1. Podzólico Vermelho-Amarelo de substrato Xisto .....	90
5.4.2. Gleí de Substrato de Sedimentos Quaternários .....	91
5.4.3. Podzólico Vermelho-Amarelo de substrato Granito.....	93
5.4.4. Cambissolo de substrato Gnaisses e Migmatitos.....	95
5.5. Mapa de Suscetibilidade a Deslizamentos Rasos – Modelagem SHALSTAB .....	96
6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	108
6.1. Conclusões .....	108
6.2. Sugestões para Trabalhos Futuros .....	109
REFERÊNCIAS.....	110



## 1. INTRODUÇÃO

O evento de crescimento urbano no Brasil acontece de forma acelerada e desordenada. O surgimento de metrópoles atraindo ofertas de trabalho impulsionou o mercado imobiliário e a construção civil de forma muito acentuada nas últimas décadas. Este fato, aliado a má gestão pública, em relação ao uso e ocupação do solo vem causando o aumento gradual das periferias no país, e conseqüentemente, a ocupação de áreas de risco.

Em relação ao litoral norte do estado, o fenômeno de crescimento demográfico vem acontecendo de forma ainda mais intensa. Balneário Camboriú, segundo o IBGE possui cerca de 100 mil habitantes, que em alta temporada acabam ultrapassando 1 milhão. Este turismo sazonal extremamente agressivo faz com que o município possua a maior densidade demográfica do estado, e uma das maiores do Brasil. Com isso, as regiões vizinhas, principalmente Itajaí e Camboriú vem crescendo de forma desordenada, o que ocasiona a ocupação de áreas de encostas, terrenos de marinha e planícies fluviais, ficando cada vez mais susceptíveis a desastres naturais.

Segundo dados da Defesa Civil do Estado de Santa Catarina, são cada vez maiores no estado a ocorrência de eventos categorizados como desastres. Um dos principais, os movimentos de massa, estão diretamente ligados à ocupação de locais com severas restrições ao uso urbano e a precipitações atípicas e extremas, como em 2008, onde chuvas assolaram o estado durante um período de meses, causando diversos problemas, sendo que uma das regiões mais atingidas foi a do litoral norte, com os maiores índices pluviométricos registrados.

A proposta do trabalho para a Bacia do Rio Camboriú, é mapear a região utilizando *softwares* de Sistemas de Informações Geográficas (SIG), e o modelo computacional de suscetibilidade a deslizamentos SHALSTAB (*Shallow Stability Model*) buscando associar dados de relevo, geologia, pedologia e hidrologia de uma região, com parâmetros geotécnicos que possibilitem a criação de mapas de suscetibilidade.

O mapeamento de áreas susceptíveis a deslizamentos requer entendimento dos processos envolvidos no desencadeamento deste fenômeno. Desta maneira, o desenvolvimento dessa pesquisa pode auxiliar na elaboração de medidas para minimizar os impactos relacionados aos deslizamentos. Salienta-se que uma importante ferramenta utilizada na detecção de áreas susceptíveis a escorregamentos e elaboração de mapas de risco é a modelagem de estabilidade de

encostas. Existem diversos modelos de estabilidade de encostas. A maioria destes considera parâmetros geomorfológicos, geotécnicos e hidrológicos em suas formulações (MICHEL, 2013).

De uma forma geral, o resultado final dessa pesquisa busca gerar através da análise de suscetibilidade a deslizamentos, uma ferramenta útil de gestão do uso e ocupação do solo da bacia do Rio Camboriú, delimitando as áreas de expansão que possam comprometer a segurança da população.

## **1.1 Objetivo Geral**

O objetivo deste trabalho é a realização do mapeamento das áreas suscetíveis a deslizamentos na Bacia do Rio Camboriú, localizada na região do Vale do Itajaí, utilizando o modelo SHALSTAB, a fim de gerar um mapa de riscos em ambiente SIG que auxilie o uso e ocupação do solo da região.

## **1.2 Objetivos Específicos**

Em busca de chegar ao objetivo geral, será realizada a seguinte sequência de etapas:

- Elaborar mapas topográficos (MDT; Declividade), hidrológicos (Áreas de Contribuição, Direção de fluxo), pedológicos e geológicos da região de estudo;
- Executar ensaios de campo, e de laboratório para caracterização geotécnica;
- Gerar mapas das unidades geotécnicas;
- Elaborar mapas de coesão, massa específica natural e saturada, e ângulo de atrito para cada unidade geotécnica;
- Modelar os dados no SHALSTAB;
- Gerar o mapa de suscetibilidade a deslizamentos;

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Nesse capítulo serão tratados os fundamentos teóricos que permitirão o entendimento do assunto abordado no trabalho.

Os assuntos serão divididos em uma sequência lógica expondo cada metodologia para que os resultados apresentados sejam compreendidos.

### **2.1 Pedologia**

A Pedologia é uma palavra de origem grega, que etimologicamente, é construída pela adição de PEDON (lugar ou solo onde se pisa) a LOGOS (discurso ou razão); sendo assim, o discurso do solo. Portanto, a Pedologia é a ciência que estuda o solo, sua origem, morfologia e classificação.

Em geral, os solos são formados pela erosão das rochas. As propriedades físicas do solo são determinadas primeiro pelos minerais que constituem suas partículas e, portanto, pela rocha a partir da qual esse solo é derivado (DAS, 2007).

#### **2.1.1 Classificação dos Solos**

Solos diferentes com propriedades similares podem ser classificados em grupos e subgrupos de acordo com seu comportamento sob o ponto de vista da engenharia. Existe uma infinidade de classificações, cada uma servindo a uma finalidade específica.

Para o estudo, podemos considerar a classificação geotécnica, que leva em conta a origem do solo, como ponto de partida para o estudo de determinadas regiões. Como apresentado por Higashi (2006), pode-se iniciar o estudo definindo se o solo é residual ou sedimentar.

A zona costeira brasileira apresenta seu relevo bastante acidentado ou com grandes extensões de áreas planas de características geotécnicas variadas, que podem apresentar solos sedimentares com profundos perfis de argilas moles (Solos Gleis e Solos Orgânicos) e areias quartzosas, e solos residuais de diferentes rochas de origem, e portanto, pertencentes a diferentes classes. (HIGASHI, 2006).

##### **2.1.1.1 Solos Residuais**

São os solos formados pelo intemperismo da rocha de origem e que permanecem no mesmo lugar onde foram intemperizados. Uma

característica importante dos solos residuais é a gradação do tamanho das partículas, onde o tamanho dos grãos aumenta com a profundidade, assim como sua densidade e resistência.

O perfil de um solo residual pode dividir-se em três zonas: a) zona superior, na qual existe um elevado grau de intemperismo, porém também certo arraste de materiais; b) zona intermediária, em cuja parte superior existe certo intemperismo, porém na parte inferior o intemperismo promove uma granulometria variável; e c) zona parcialmente intemperizada, que corresponde a transição do solo residual à rocha original não alterada (LAMBE, 1979).

#### 2.1.1.2 Solos Sedimentares

Conforme Lambe (1979), são aqueles que foram levados ao seu local atual por algum agente de transporte. As características dos solos são funções do agente transportador. Eles podem ser classificados como:

- Coluvionares: solos formados sob a ação da gravidade, como os escorregamentos de terra, por exemplo;
- Aluvionares: solos resultantes do carreamento pela água;
- Eólicos: solos transportados pelo vento.

#### 2.1.1.3 Classificação MCT

A metodologia MCT (Miniatura, Compactado, Tropical) foi desenvolvida por Nogami e Villibor (1994), sendo uma série de ensaios que buscam melhor representar as propriedades e comportamentos dos solos tropicais. Estes solos possuem algumas peculiaridades difíceis de definir por caracterizações tradicionais, devido aos processos geológicos e pedológicos sofridos, típicos de regiões úmidas e temperadas.

A base da classificação divide os solos em dois grandes grupos, estes divididos em sete subgrupos. Os dois grandes grupos são os solos lateríticos, designados pela letra “L” e os de comportamento não laterítico (ou saprolíticos), designados pela letra “N”. A subdivisão é mostrada a seguir, conforme a Tabela 1.

**Tabela 1** – Classificação dos grupos de Solos

<b>LG'</b>	Argilas Lateríticas e argilas lateríticas arenosas; Constituem o horizonte B dos latossolos, solos podzólicos e terras roxas estruturadas. Quando apresentam agregados bem desenvolvidos, são altamente permeáveis, apesar de serem granulometricamente argilas e, devido a isto, geram taludes de corte não sujeitos à erosão pluvial.
<b>LA'</b>	Areias argilosas lateríticas; Constituem o horizonte b dos latossolos arenosos e podzólicos ou podzolizados arenosos (textura média). Apresentam matizes vermelho e amarelo, dão cortes firmes, nitidamente trincados, quando expostos às intempéries.
<b>LA</b>	Areias com pouca argila laterítica; Típico de horizonte B das areias quartzosas e regossolos;
<b>NG'</b>	Argilas, argilas siltosas e argilas arenosas não-lateríticas; Solos saprolíticos argilosos, provenientes de rochas sedimentares argilosas ou cristalinas pobres em quartzo e ricas em anfibólios, piroxênios e feldspato cálcicos. Típicos de vertissolos ou solos transportados.
<b>NS'</b>	Siltes cauliniticos e micáceos, siltes arenosos e siltes argilosos não-lateríticos;
<b>NA'</b>	Areias siltosas e areias argilosas não-lateríticas; Compostos granulometricamente por misturas de areias quartzosas. Geneticamente, os tipos mais representativos são os solos saprolíticos originados de rochas ricas em quartzo, tais como granitos, gnaisses, arenitos e quartzitos impuros.
<b>NA</b>	Areias siltosas com siltes quartzosos e siltes argilosos não-lateríticos; Possuem grãos constituídos essencialmente de quartzo e/ou mica. Praticamente não possuem finos argilosos coesivos.

**Fonte:** Nogami e Villibor (1994).

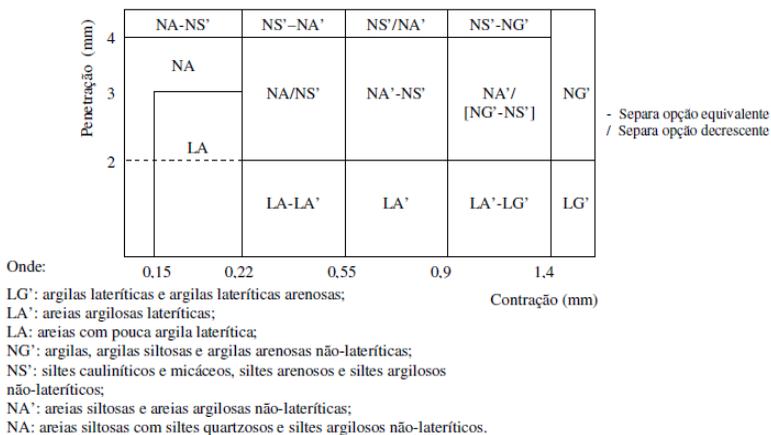
Essa classificação definida por Nogami e Villibor (1994) pode ser obtida pelo ensaio expedito das pastilhas, que consiste basicamente em moldar o solo em estudo, passante na peneira nº 40 (0,42 mm) em anéis com 20 mm de diâmetro por 5 mm de altura. Mede-se a contração entre o diâmetro de solo e o diâmetro interno do anel após passar pela estufa a 60°C.

Depois de retirar da estufa, colocam-se os anéis sobre um papel filtro em uma pedra porosa e saturam-se as pastilhas, mantendo o material em repouso sobre a pedra porosa por pelo menos 2 horas, a fim de observar fissuras, inchamentos e abaulamentos.

Findando o processo, mede-se a profundidade alcançada pelo mini-penetrômetro nas pastilhas de solo.

Os dados de contração da pastilha e penetração do penetrômetro são inseridos no gráfico da Figura 1, onde é feita a classificação.

**Figura 1** - Gráfico para a determinação expedita MCT pelo Método das pastilhas



**Fonte:** Nogami e Villibor (1994 e 1996).

## 2.2 Movimentos de Massa

Conforme Guidicini e Nieble (1983), de modo geral, os movimentos de massa, em zonas urbanas, têm sido objeto de vários estudos em diversos países. O termo “movimentos de massa” é utilizado na engenharia civil para qualquer tipo de ruptura e deslocamento de solos e rochas sob a ação da gravidade.

O histórico de movimentos de massa no Brasil está relacionado às características naturais do país, sobretudo às condições climáticas, geológicas e geomorfológicas.

“O Brasil, por sua grande extensão e diversidade de condições climáticas, está sujeito aos desastres naturais, principalmente aqueles associados às porções susceptíveis do seu relevo. Além da frequência elevada destes desastres de origem natural, ocorrem no país, também, um grande número de eventos induzidos pela ação antrópica. As metrópoles brasileiras convivem com acentuada incidência de deslizamentos por cortes para implantação de moradias e de

estradas, desmatamentos, atividades de pedreiras, etc.”  
(FERNANDES; AMARAL, 1996, p. 125).

Dado os inúmeros tipos e causas de movimentos gravitacionais de massa, são utilizadas classificações para diferenciar os indicadores e métodos de cálculo para cada um deles. Na literatura encontramos uma diversidade de classificações, sendo a maioria determinada por algumas características básicas: tipo de material, velocidade e mecanismo do movimento, modo de deformação, geometria do talude e quantidade de água. Temos algumas classificações amplamente aceitas como a, de CAPUTO (1987), de VARNES (1978), de GUIDICINI E NIEBLE (1983), entre outras.

A classificação proposta por Varnes (1978) apresentada na Tabela 2, ainda hoje é uma das mais aceitas no mundo todo, e é a classificação considerada oficial pela *Internacional Association of Engineering Geology* – IAEG.

**Tabela 2** - Classificação dos Movimentos de Massa

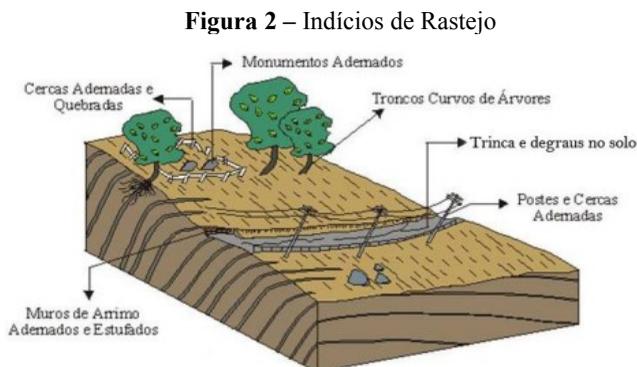
Tipos de Movimentos		Tipo de Material		
		Rocha	Solo (Engenharia)	
			Grosseiros	Finos
Quedas (fall)		Queda de Rocha	Queda de Detrito	Queda de Terra
Tombamentos (topple)		Tombamento de Rocha	Tombamento de Detritos	Tombamento de Terra
Escorregamento (slide)	Rotacional Poucas Unidades	Escorregamento de Rocha	Escorregamento de Detritos	Escorregamentos de Terra
	Translacional Muitas Unidades			
Expansões Laterais (lateral spread)		Expansões de Rocha	Expansões de Detritos	Expansões de Terra
Corridas (flow)		Corrida de rochas (rastejo profundo)	(rastejo de solo)	
			Corrida de detritos	Corrida de terra
Complexos (complex)		Combinação de dois ou mais dos principais tipos de movimentos		

**Fonte:** adaptado de Varnes (1978).

### 2.2.1 Rastejos

Movimentos gravitacionais de massa, caracteristicamente lentos, que podem ser medidos em centímetros por ano. Podem ser contínuos ou pulsantes. Esses últimos associam-se a alterações climáticas sazonais, intensificando-se nos períodos de chuva e estacionando nos períodos secos. O processo não apresenta superfície de ruptura bem definida e os limites entre a massa em movimento e o terreno estável, é transicional (CASTRO, 2003).

Segundo Massad (2010) as velocidades dos rastejos sofrem interferência da pluviometria, desacelerando em épocas de estiagem e acelerando em épocas chuvosas. A Figura 2 esquematiza a evidência do movimento.



Fonte: Bloom (1988).

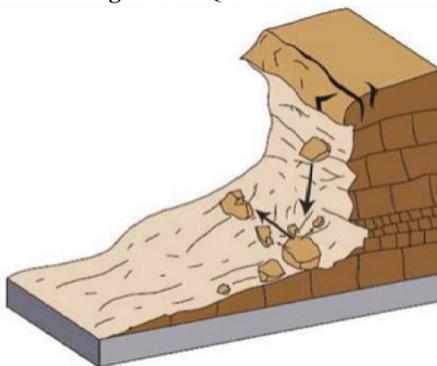
### 2.2.2 Quedas

Segundo Gerscovich (2012), desabamentos ou quedas são subsidências bruscas, envolvendo colapso na superfície, com movimentos de queda livre ou em plano inclinado, em velocidades altas.

As quedas de rochas, como apresentadas na Figura 3, caracterizam-se por movimentos extremamente rápidos, envolvendo blocos ou fragmentos de rochas em queda livre. O processo ocorre em afloramentos rochosos de escarpas íngremes, quase verticais, quando surgem fraturas de sentido transversal. Essas fraturas dependem de variações térmicas, que produzem sucessivas dilatações e contrações do material rochoso, gerando planos de cisalhamento ou clivagem (CASTRO, 2003).

“A ocorrência deste processo está condicionada à presença de afloramentos rochosos em encostas íngremes, abruptas ou taludes de escavação, tais como, cortes em rocha, frentes de lavra, etc., sendo potencializados pelas amplitudes térmicas, por meio da dilatação e contração da rocha. As causas básicas deste processo são a presença de descontinuidades no maciço rochoso, que propiciam isolamento de blocos unitários de rocha; a subpressão por meio do acúmulo de água, descontinuidades ou penetração de raízes. Pode ser acelerado pelas ações antrópicas, como, por exemplo, vibrações provenientes de detonações de pedreiras próximas. Ressalta-se que as frentes rochosas de pedreiras abandonadas podem resultar em áreas de instabilidade decorrentes da presença de blocos instáveis remanescentes do processo de exploração” (CARVALHO et al. 2007).

**Figura 3** – Queda de Rocha



**Fonte:** Highland; Bobrowsky (2008).

### 2.2.3 Corridas

Highland e Bobrowsky (2008) definem as corridas, como uma forma rápida de movimento de massa, em que o solo solto e rochas, e por vezes, material orgânico, se misturam à água e formam lama que escoam por talude abaixo. Estes movimentos são gerados a partir de grande aporte de materiais como solo, rocha e árvores que, ao atingirem as drenagens, formam uma massa de elevada densidade e viscosidade, como mostrado na Figura 4.

**Figura 4** – Corrida de detritos



**Fonte:** Gerscovich (2012).

#### **2.2.4 Deslizamentos**

Os deslizamentos propriamente ditos são os eventos mais comuns no Brasil. Um deslizamento é um movimento de uma massa de solo ou rocha, em declive, que ocorre sobre superfícies em ruptura ou sobre zonas relativamente finas com intensa deformação por cisalhamento (HIGHLAND; BOBROWSKY, 2008).

Castro (2003) aponta que os deslizamentos podem ocorrer de forma isolada, ou simultaneamente com outros movimentos gravitacionais, apontando algumas causas:

“A ocupação caótica das encostas urbanas é a principal causa dos escorregamentos, causadores de importantes danos humanos, inclusive de mortes, além dos danos materiais e ambientais, e dos graves prejuízos sociais e econômicos.

Embora em outros países os escorregamentos possam ser provocados por outras causas, como abalos sísmicos ou aquecimento por vulcões, no Brasil, esses movimentos gravitacionais de massa relacionam-se com a infiltração de água e a embebição do solo das encostas. Por esse motivo, no País, os escorregamentos são nitidamente sazonais e guardam

efetiva relação com os períodos de chuvas intensas e concentradas” (CASTRO, 2003).

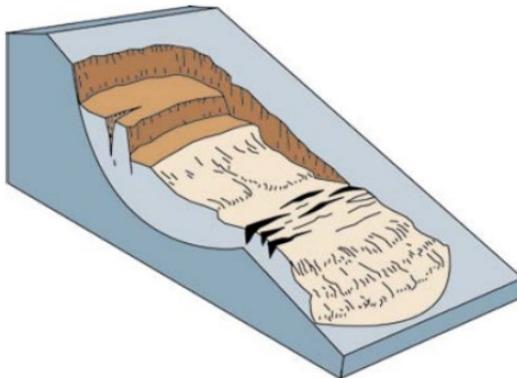
Os escorregamentos podem ser classificados de 3 maneiras, de acordo com a geometria da encosta e os materiais envolvidos, como rotacionais, translacionais, ou em cunha.

#### 2.2.4.1 Deslizamentos Rotacionais

Highland e Bobrowsky (2008) definem os escorregamentos rotacionais (Figura 5), como um tipo de deslizamento em que a superfície da ruptura é curvada no sentido superior (em forma de colher) e o movimento da queda de barreira é mais ou menos rotatório em torno de um eixo paralelo ao contorno do talude.

A ocorrência destes movimentos está associada geralmente à existência de solos espessos e homogêneos, como os decorrentes da alteração de rochas argilosas (TOMINAGA, 2009).

**Figura 5** – Deslizamento Rotacional



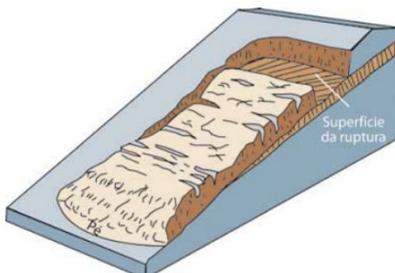
**Fonte:** Highland; Bobrowsky, 2008.

#### 2.2.4.2 Deslizamentos Translacionais

Deslizamentos translacionais (Figura 6) costumam ocorrer ao longo de discontinuidades geológicas, como por exemplo, falhas, estratificações, ou o ponto de contato entre o solo e a rocha. Inicialmente, este movimento pode ser vagaroso, mas é comum atingirem grandes velocidades e extensões. Os principais mecanismos

desencadeadores deste processo são a chuva, encharcamento do solo, aumento do nível da água, etc. (HIGHLAND; BOBROWSKY, 2008).

**Figura 6** – Deslizamento Translacional

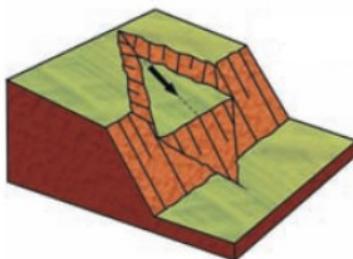


**Fonte:** Highland; Bobrowsky, 2008.

#### 2.2.4.3 Deslizamentos em Cunha

Os escorregamentos em cunha (Figura 7) apresentam superfície de ruptura em cunha e são restritos a regiões que apresentam relevo controlado por estruturas geológicas. Ocorrem principalmente em taludes ou encostas que sofreram desconfinamento, seja de forma natural ou por ação antrópica (TOMINAGA, 2009).

**Figura 7** – Deslizamento em Cunha



**Fonte:** Tominaga, 2009.

### 2.3 Fatores Deflagradores

A instabilidade do talude será deflagrada quando as tensões cisalhantes mobilizadas se igualarem à resistência ao cisalhamento.

$$FS = \frac{\tau(\text{resist})}{\tau(\text{mob})} \quad (1)$$

Gerscovich (2012) diz que esta condição pode ser atingida com o aumento das tensões cisalhantes mobilizadas ou pela redução da resistência. Varnes (1978) divide estes mecanismos em dois grupos como proposto na Tabela 3.

**Tabela 3** - Fatores deflagradores dos movimentos de massa

<b>Ação</b>	<b>Fatores</b>	<b>Fenômenos Geológicos/Antrópicos</b>
Aumento da Solicitação	Remoção da massa	Erosão, escorregamentos; Cortes;
	Sobrecarga	Peso da água de chuva, etc;
		Depósito de Material;
		Peso da Vegetação; Construção de estruturas, aterros, etc;
	Solicitações Dinâmicas	Terremotos, ondas, etc;
		Explosões, tráfego, sismos induzidos;
Pressões Laterais	Água em trincas, congelamento;	
Redução da Resistência	Características Inerentes ao material	Características geomecânicas do material, tensões iniciais;
	Mudanças ou Fatores Variáveis	Intemperismo -> redução coesão, atrito;
		Elevação nível da água;
		Aumento da umidade/redução da sucção;

**Fonte:** Adaptado de Varnes (1978, apud AUGUSTO FILHO, 1992).

Segundo Cruden e Varnes (1996), os fatores que contribuem para os deslizamentos podem ser listados através de quatro causas, apresentadas na Tabela 4.

**Tabela 4 – Classes de Causas de Deslizamentos**

<b>Causas Geológicas</b>	<b>Causas Morfológicas</b>
Perfil Geotécnico / materiais problemáticos: sensitivo, colapsível, plástico / mole;	Geometria, declividade e forma da encosta/relevo;
Orientação desfavorável da descontinuidade de massa (clivagem, acamamentos, xistosidades, falhas, contatos sedimentares);	Atividades geológicas: terremotos, vulcanismo, etc;
Constrate na permeabilidade e seus efeitos na poro-pressão;	Depósitos de carregamentos no topo do talude;
Constrate na rigidez (material denso sobre material plástico);	Remoção da Vegetação (por erosão, queimadas, secas);
Material de preenchimento de juntas alteradas (fissuras);	Erosão fluvial no pé do talude / Erosão na face do talude;
	Erosão subterrânea ("pipping");
<b>Causas Físicas</b>	<b>Causas Antrópicas</b>
Chuvas intensas em períodos curtos;	Escavação na base da encosta;
Chuvas intensas de longa duração;	Sobrecarga na encosta ou topo;
Inundações;	Remoção vegetal;
Terremotos;	Vibração artificial (incluindo tráfego, máquinas pesadas);
Contração e expansão de solos expansivos;	Falta de manutenção de drenagem; Vazamentos na rede de água/esgoto;

**Fonte:** Adaptado de Cruden; Varnes (1996).

O fato é que um deslizamento normalmente é associado a uma diversidade de fatores correlacionados, e raramente por um motivo único. Como afirma Massad (2003), o problema da instabilidade se dá pelo fator natural, uma vez que os solos localizados em encostas tem tendência natural de descer ao nível da base, acrescidos da ocupação desordenada das encostas e morros.

O reconhecimento dos fatores correlatos é de fundamental importância para que medidas corretivas e preventivas sejam viáveis, no

âmbito de propor uma correta ocupação do solo, principalmente nas áreas urbanas.

## 2.4 Sistemas de Informações Geográficas (SIG)

Advindo da tradução do termo GIS (*Geographic Information System*), o conceito de Sistema de Informações Geográficas (SIG) vem sendo amplamente difundido e aplicado no meio científico e também em setores do mercado que o utilizam para diversos fins.

Buscando facilitar o contato entre feições gráficas e dados, possibilitando uma comunicação ágil e inteligente entre os mesmos, os programas computacionais do tipo SIG se inserem num contexto extremamente importante para vários ramos da ciência e tecnologia (MAFRA JR, 2007).

O SIG é uma evolução do CGIS (*Canadian Geographic System*), desenvolvido na década de 60 no Canadá, dado o início do crescimento da computação, aliado às novas técnicas cartográficas. Porém, seu desenvolvimento ficou evidenciado na década de 80, com a intensa evolução da tecnologia informática.

Na literatura, há uma infinidade de definições para Sistema de Informações Geográficas, conflitantes ou não entre si. Muitas das definições encontram-se ultrapassadas, devido ao desenvolvimento exponencial da ferramenta com a evolução dos microprocessadores. A seguir serão apresentadas algumas citações que melhor englobam o conceito atual de SIG:

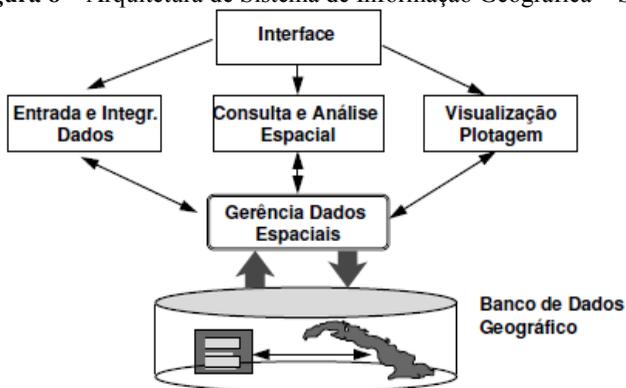
O SIG pode ser descrito como um conjunto de programas, equipamentos, metodologias, dados e pessoas, perfeitamente interligados, de forma a tornar possível a coleta, armazenamento, o processamento e análise de dados. georreferenciados, bem como a produção de informação derivada de sua aplicação.

“O Sistema de Informações Geográficas não é simplesmente um *software* ou um pacote de funções que mostram um mapa digital na tela de um computador, mas deve ser visto como um sistema de apoio à tomada de decisões, bem como um sistema de gerenciamento de informações.

O Sistema de Informações Geográficas permite várias aplicações no campo do Mapeamento Geotécnico. Estas aplicações proporcionam a elaboração de mapas temáticos, cartografia geotécnica, modelagem numérica de terrenos para análise de risco, avaliação geotécnica e gerenciamento ambiental” (HIGASHI, 2002).

Segundo Câmara (2003), um SIG tem os seguintes componentes: interface com usuário; entrada e integração de dados; consulta, análise espacial e processamento de imagens; visualização e plotagem; e armazenamento e recuperação de dados (organizados sob a forma de um banco de dados geográficos).

**Figura 8** – Arquitetura de Sistema de Informação Geográfica – SIG.



Fonte: Câmara, 2003.

## 2.4.1 Estrutura de Dados

Os dados em um ambiente SIG possuem duas formas básicas de exibição, em formato matricial (*raster*) ou vetorial.

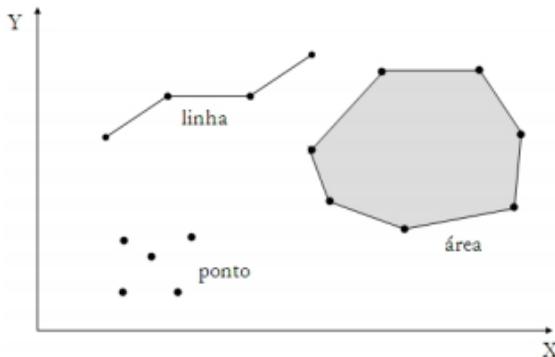
### 2.4.1.1 Dados Vetoriais

As estruturas vetoriais são utilizadas para representar as coordenadas das fronteiras de cada entidade geográfica, através de três formas básicas: pontos, linhas, e áreas (ou polígonos), definidas por suas coordenadas cartesianas (CÂMARA et al., 2000).

- Um ponto é um par ordenado  $(x, y)$  de coordenadas espaciais. O ponto pode ser utilizado para identificar localizações ou ocorrências no espaço.
- As linhas são conjuntos de pontos conectados, é utilizada para guardar feições unidimensionais.
- A área é a região do plano limitada por uma ou mais linhas poligonais, conectadas de tal forma que o

ultimo ponto de uma linha seja idêntico ao primeiro da próxima.

**Figura 9** – Representações Vetoriais



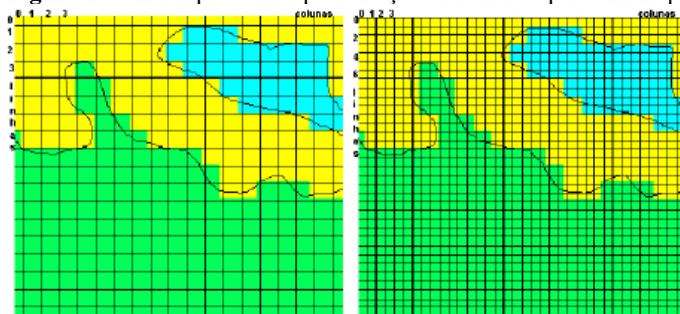
**Fonte:** Câmara et al., 2000.

#### 2.4.1.2 Dados Matriciais (*Raster*)

Nesta representação, o espaço é representado como uma matriz  $P(m, n)$  composto de  $m$  colunas e  $n$  linhas, onde cada célula possui um número de linha, um número de coluna e um valor correspondente ao atributo estudado e cada célula é individualmente acessada pelas suas coordenadas (CÂMARA et al., 2000).

A área de estudo é dividida em uma malha de células (*pixels*), a cada célula se designa um atributo qualitativo ou quantitativo. As células ou pixels são considerados pontos da matriz que dividem toda a imagem. Quanto menor o pixel, melhor a resolução espacial da imagem, do terreno (MAFRA Jr., 2007).

Para Mafra Jr. (2007), podemos citar matrizes de elevação, classes de uso dos solos, dados geológicos, geofísicos e outros, como exemplos típicos de dados raster.

**Figura 10** – Exemplos de Representações Matriciais para um mapa

**Fonte:** Câmara et al., 2000.

#### 2.4.1.3 Diferenças entre as Representações

Como aponta Câmara et al. (2000), ambas representações são aceitáveis na confecção de mapas temáticos. Quando se quer maior precisão na representação da carta, a melhor opção é a vetorial. Porém, nas representações matriciais as operações algébricas são facilitadas.

A Tabela 5 exemplifica algumas vantagens e comparações na utilização de cada uma das representações.

**Tabela 5** – Comparação entre estruturas vetoriais e matriciais para mapas temáticos

<i>Aspecto</i>	<i>Vetorial</i>	<i>Matricial</i>
<i>Armazenamento</i>	Por coordenadas (mais eficiente)	Requer mais espaço de armazenamento
<i>Algoritmos</i>	Problemas com erros geométricos	Processamento mais rápido e eficiente.
<i>Escalas de trabalho</i>	Adequado tanto a grandes quanto a pequenas escalas	Mais adequado para pequenas escalas (1:25.000 e menores)
<i>Análise, Simulação e Modelagem</i>	Representação indireta de fenômenos contínuos Álgebra de mapas é limitada	Representa melhor fenômenos com variação contínua no espaço Simulação e modelagem mais fáceis

**Fonte:** Câmara et al., 2000.

## 2.5 Áreas de Risco

Área passível de ser atingida por processos naturais e/ou induzidos que causem efeito adverso são denominadas áreas de risco. As pessoas que habitam essas áreas estão sujeitas a danos à integridade física, perdas materiais e patrimoniais. Normalmente, essas áreas correspondem a núcleos habitacionais de baixa renda (assentamentos precários). (IPT, 2012).

Segundo Kobiyama (2006) os desastres de origem natural podem estar relacionados com a dinâmica interna ou externa da terra, e podem ser agravados pela ação antrópica inadequada, isto é, situações causadas pelo homem que aumentam a ocorrência e a intensidade, ou seja, os desastres de origem natural não podem ser evitados, porém as intervenções das atividades humanas podem agravar ou minimizar os mesmos.

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

O Mapeamento de Áreas de Risco é importante para que se tenha conhecimento dos locais onde a susceptibilidade a esses processos adversos é crítica, auxiliando a tomada de decisões, reduzindo o risco a comunidade.

O IPT (2007), em conjunto com o Ministério das Cidades e a Defesa Civil, apresenta um roteiro metodológico para auxiliar a análise de risco e mapeamento dessas áreas de encostas, servindo de instrumento para vistoria em campo a fim de determinar potencialidades de ocorrência de acidentes, seguindo os seguintes passos:

1. Obtenção de dados gerais sobre a moradia;
2. Caracterização do local;
3. Identificação de presença e caminhos da água;
4. Presença de Vegetação no talude ou proximidades;
5. Sinais de Movimentação (feições de Instabilidade);
6. Tipos de processos de instabilização esperados ou ocorridos;
7. Determinação do Grau de Risco (Tabela 6);
8. Necessidade de remoção;

O roteiro sugere ainda a confecção de dois desenhos, sendo um da moradia e os caminhos que levam a ela e um perfil da encosta, com distância, inclinações e alturas do talude.

**Tabela 6 – Classificação do Grau de Risco de estabilidade.**

Grau de Probabilidade	Descrição
<p><b>R1</b> Baixo ou sem risco</p>	<p>1. os condicionantes geológico-geotécnicos predisponentes (inclinação, tipo de terreno, etc.) e o nível de intervenção no setor são de baixa ou nenhuma potencialidade para o desenvolvimento de processos de escorregamentos e solapamentos. 2. não se observa(m) sinal/feição/evidência(s) de instabilidade. Não há indícios de desenvolvimento de processos de instabilização de encostas e de margens de drenagens. 3. mantidas as condições existentes não se espera a ocorrência de eventos destrutivos no período compreendido por uma estação chuvosa normal.</p>
<p><b>R2</b> Médio</p>	<p>1. os condicionantes geológico-geotécnicos predisponentes (inclinação, tipo de terreno, etc.) e o nível de intervenção no setor são de média potencialidade para o desenvolvimento de processos de escorregamentos e solapamentos. 2. observa-se a presença de algum(s) sinal/feição/evidência(s) de instabilidade (encostas e margens de drenagens), porém incipiente(s). Processo de instabilização em estágio inicial de desenvolvimento. 3. mantidas as condições existentes, é reduzida a possibilidade de ocorrência de eventos destrutivos durante episódios de chuvas intensas e prolongadas, no período compreendido por uma estação chuvosa.</p>
<p><b>R3</b> Alto</p>	<p>1. os condicionantes geológico-geotécnicos predisponentes (inclinação, tipo de terreno, etc.) e o nível de intervenção no setor são de alta potencialidade para o desenvolvimento de processos de escorregamentos e solapamentos. 2. observa-se a presença de significativo(s) sinal/feição/evidência(s) de instabilidade (trincas no solo, degraus de abatimento em taludes, etc.). Processo de instabilização em pleno desenvolvimento, ainda sendo possível monitorar a evolução do processo. 3. mantidas as condições existentes, é perfeitamente possível a ocorrência de eventos destrutivos durante episódios de chuvas intensas e prolongadas, no período compreendido por uma estação chuvosa.</p>
<p><b>R4</b> Muito Alto</p>	<p>1. os condicionantes geológico-geotécnicos predisponentes (inclinação, tipo de terreno, etc.) e o nível de intervenção no setor são de muito alta potencialidade para o desenvolvimento de processos de escorregamentos e solapamentos. 2. os sinais/feições/evidências de instabilidade (trincas no solo, degraus de abatimento em taludes, trincas em moradias ou em muros de contenção, árvores ou postes inclinados, cicatrizes de escorregamento, feições erosivas, proximidade da moradia em relação à margem de córregos, etc.) são expressivas e estão presentes em grande número ou magnitude. Processo de instabilização em avançado estágio de desenvolvimento. É a condição mais crítica, sendo impossível monitorar a evolução do processo, dado seu elevado estágio de desenvolvimento. 3. mantidas as condições existentes, é muito provável a ocorrência de eventos destrutivos durante episódios de chuvas intensas e prolongadas, no período compreendido por uma estação chuvosa.</p>

**Fonte:** IPT (2007).

## **2.6 Mapeamento Geotécnico**

Para Zuquette (1987) o mapeamento geotécnico é um processo com finalidade básica de levantar, caracterizar, classificar, avaliar e analisar os atributos que compõem o meio físico sejam estes geológicos, hidrogeológicos, hidrológicos e outros. Estas informações devem ser processadas, de forma que possam ser relacionadas, correlacionadas, interpretadas e, ao final, representadas em mapas, cartas e anexos descritivos.

A definição da UNESCO (1976) define mapa geotécnico como um tipo de mapa geológico que representa todos os componentes geológicos significativos para o planejamento do solo, projetos e obras relacionadas à engenharia civil e de minas.

Santos (1997 apud MAFRA JR, 2007) conceituam o mapa geotécnico como um instrumento de gestão territorial, zoneando o solo pelos seus critérios físicos, que deverão ser observados com tratamento específico para seu uso, visando evitar a incorreta ocupação do solo.

De forma geral, o que se percebe é que os autores concordam que o produto gerado pelo mapeamento geotécnico deve ter aplicação direta à ocupação do meio físico, buscando levantar potenciais e problemáticas inerentes à exploração de cada variedade geotécnica, de forma a não agredir o meio ambiente. Para isso, trabalhos multidisciplinares são sugeridos, e são adaptados às suas finalidades (MAFRA JR, 2007).

Atualmente o cenário é de muitos trabalhos divulgados, aprimoramento e evolução das ferramentas. Ainda se busca, porém, incluir na mentalidade política de gestão, a importância desta ferramenta como um elemento base para o planejamento das cidades, como outras encontradas no plano diretor, estatuto das cidades, etc.

### **2.6.1 Metodologias de Mapeamento Geotécnico**

O mapeamento geotécnico não é tão recente quanto parece, segundo Caballero (1973) o registro mais antigo que se tem referência é em relação a cartas de caracterização geotécnica da cidade de Nova Iorque, nos Estados Unidos por volta de 1900, que foram realizados a partir de 1400 furos de sondagens.

Apesar disso, Bastos (2005), afirma que os avanços mais significativos aconteceram na Europa, principalmente após a Segunda Guerra Mundial, com diversos estudos geotécnicos para reconstruir seus

territórios, com destaques para a Alemanha, União Soviética, Tchecoslováquia, Polônia e Hungria.

Kopenzinski (2000 apud HIGASHI, 2006) organizou algumas das principais metodologias internacionais, representadas na Tabela 7.

**Tabela 7 – Metodologias de Mapeamento Geotécnico**

<b>Metodologia</b>	<b>Escala</b>	<b>Finalidade</b>	<b>Utilização</b>
IAEG (Internacional)	<1:100.000 >1:10.000	Específica Multifinalidade	Planejamento Urbano e Regional
Francesa	<1:100.000 >1:2.000	Específica Regional	Planejamento Urbano e Regional
PUCE (AUS)	<1:250.000 >1:2.500	Específica Regional	Planejamento Urbano e Regional
Britânica (Inglesa)	>1:10.000 <1:2.500	Específica Multifinalidade	Planejamento Urbano e Regional
Russa	<1:1.000000 >500.000	Específica Regional	Planejamento Urbano e Regional
Hijonosa e Leon	<1:1.000000 >500.000	Específica	Planejamento Urbano e Projeto de estradas
ZERMOS	>1:50.000	Específica	Movimentos de Massa (planejamento)
Espanhola	>1:200.000 <1:2.000	Específica Regional	Planejamento Urbano e Territorial
USA (Kiefer)	Regional e Local	Específica Regional	Planejamento Urbano e Regional
Canadá	Regional e Local	Específica Multifinalidade	Planejamento Urbano e Regional

**Fonte:** adaptado de Kopenzinski (2000 apud HIGASHI, 2006).

No Brasil existem muitos trabalhos a respeito de mapeamento geotécnico, realizados desde a década de 60. Esses trabalhos aplicaram diferentes metodologias e sistemáticas para a laboração de cartas geotécnicas (MAFRA JR, 2007).

Dentre as diversas metodologias existentes no país, destacam-se e norteiam este trabalho, as propostas de Zuquette (1987), Davison Dias (1995) e Higashi (2006), as quais serão apresentadas a seguir, sendo que no presente estudo foi empregada a metodologia de Davison Dias (1995).

### 2.6.1.1 Metodologia EESC/USP - Zuquette (1987)

A metodologia de Zuquette firma-se em dados já existentes e fundamentais para cada região, levantados através de geoprocessamento, fotointerpretações e de trabalhos de campo com expedições in loco visando a identificação de unidades de solos cada vez menores nas áreas de interesse que apresentem uniformidade em função das feições de relevo (HIGASHI, 2006).

Segundo Zuquette (1987), a sistemática consiste na definição de quatro classes cartográficas de representação dos atributos obtidos e/ou avaliados:

- 1- Mapas básicos fundamentais (topográfico, geológico e de águas).
- 2- Mapas opcionais (pedológico, geofísico, geomorfológico, climático e de ocupação atual ou prevista).
- 3- Mapas auxiliares (eventuais).
- 4- Cartas derivadas ou interpretativas: erodibilidade, escavabilidade, de disposição de resíduos, fundação, estabilidade de taludes, vulnerabilidade das águas subterrâneas, etc.

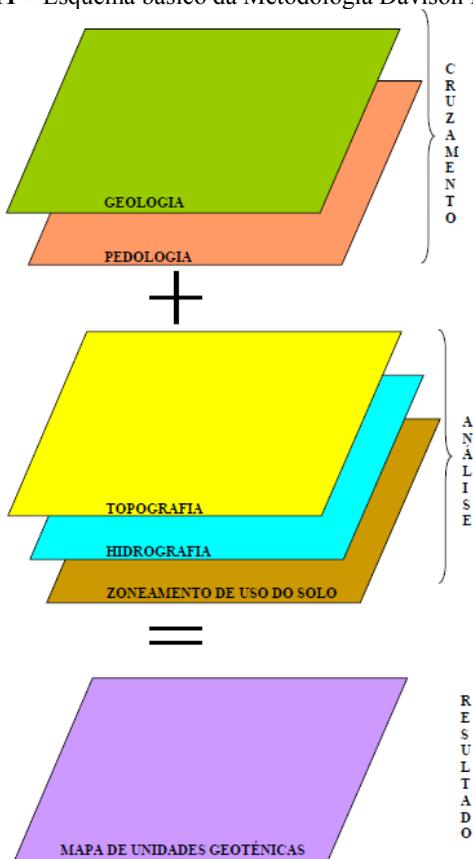
### 2.6.1.2 Metodologia Davison Dias (1995)

Regina Davison Dias desenvolveu uma metodologia adaptada à realidade dos solos brasileiros, que possui grande aceitação no Brasil, principalmente no sul do país.

A metodologia de mapeamento geotécnico de grandes áreas proposta por Davison Dias (1995) baseia-se na formulação de um mapa temático geotécnico, onde os mapas litológicos, oriundo de um mapa geológico, e pedológico são utilizados para a formulação de unidades geotécnicas com estimativas de comportamento geomecânico (HIGASHI, 2006).

O método sugere relacionar os mapas geológicos e pedológicos a fim de determinar uma unidade geotécnica preliminar, estimada. Além disso, fatores topográficos são considerados, a fim de corrigir inconsistências notadas após o cruzamento dos mapas citados.

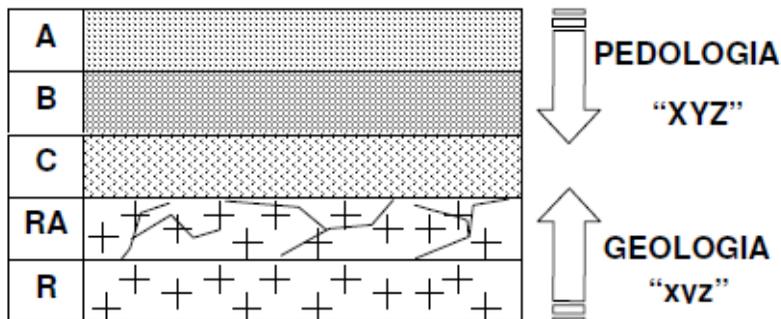
**Figura 11** – Esquema básico da Metodologia Davison Dias



**Fonte:** Mafra, 2007.

Para as unidades assim determinadas é utilizada a simbologia “ABC,xyz”. As letras maiúsculas referem-se à classificação pedológica do perfil de solos identificados de acordo com o sistema de classificação de solos. Nas letras minúsculas, o substrato rochoso é identificado de forma simplificada. Na classificação geológica é considerada a rocha dominante na formação (MAFRA JR, 2007).

**Figura 12** – Simbologia das Unidades Geotécnicas



**Fonte:** Davison Dias (1987, apud HIGASHI, 2006).

A tabela 8 determina as abreviações das classes pedológicas para a classificação geotécnica.

**Tabela 8** – Simbologia das classes Pedológicas

Sigla	Classificação	Sigla	Classificação
A	Aluviais	P	Podzóis Indiscriminados
AQ	Areias Quartzosas	PB	Podzólico Bruno-Acinzentado
B	Brunizém	PE	Podzólico Vermelho-Escuro
BV	Brunizém Vértico	PL	Planossolo
C	Cambissolo	PLV	Planossolo Vértico
CB	Cambissolo Bruno	PLP	Planossolo Plíntico
GH	Glei	PT	Plintossolo
HO	Solo Orgânico	PV	Podzólico Vermelho-Amarelo
LA	Latossolo Amarelo	R	Litólico
LB	Latossolo Bruno	TR	Terra Roxa Estruturada
LBC	Latossolo Bruno Câmbico	TB	Terra Bruna-Estruturada
LBR	Latossolo Bruno-Roxo	TBR	Terra Bruna-Roxa
LE	Latossolo Vermelho-Escuro	TBV	Terra Bruna-Podzólica
LR	Latossolo Roxo	V	Vertissolo
LV	Latossolo Vermelho-Amarelo		

**Fonte:** adaptado de Davison Dias (2001).

A tabela 9 determina as abreviações das classes geológicas para a classificação geotécnica.

**Tabela 9 – Geologia Simplificada**

<b>Sigla</b>	<b>Classificação</b>	<b>Sigla</b>	<b>Classificação</b>
a	Arenito	g	Granito
ag	Argilito	gl	Granulito
na	Andesito	gn	Gnaisse
ar	Ardósia	gd	Granitóide
b	Basalto	ma	Mármore
br	Brecha	p	Pelito
c	Conglomerado	q	Quartzito
ca	Calcáreo	r	Riolito
cm	Complexo Metamórfico	si	Sienito
cr	Carvão	si	Siltito
d	Diorito	sq	Sedimentos Quaternários
da	Dacito	st	Sedimentos Terceários
f	Folhelho	x	Xisto

**Fonte:** adaptado de Davison Dias (2001).

Após ser gerado o mapa geotécnico preliminar com a estimativa das unidades a partir dos dados do solo, dá-se início aos trabalhos de campo com análise de espessura dos horizontes e do grau de desenvolvimento do horizonte B, o qual será classificado como B latossolo, B textural, B pouco desenvolvido ou sem horizonte B, como indicado na tabela 10.

**Tabela 10 – Identificação de espessura de Horizonte**

<b>Espessura de Horizonte (m)</b>	<b>Classificação</b>
0 - 0,30	Sem horizonte (se)
0,30 - 2,00	Pouco espesso (pe)
2,00 - 5,00	Medianamente espesso (mde)
5,00 - 10,00	Espesso (e)
> 10,00	Muito espesso (me)

**Fonte:** adaptado de Davison Dias (2001).

Deve-se também analisar camadas porosas e camadas mais endurecidas, se existirem. O horizonte C é estimado em função de sua geologia, e por fim, é feita a atualização do mapa preliminar gerado anteriormente.

Como lembra Davison Dias (1995), o horizonte A é propositalmente pouco citado, visto que o mesmo é pouco usado nas obras de engenharia.

A metodologia tem grande aceitação, como já foi citado, e sua técnica vem sendo comprovada em vários trabalhos, teses e dissertações,

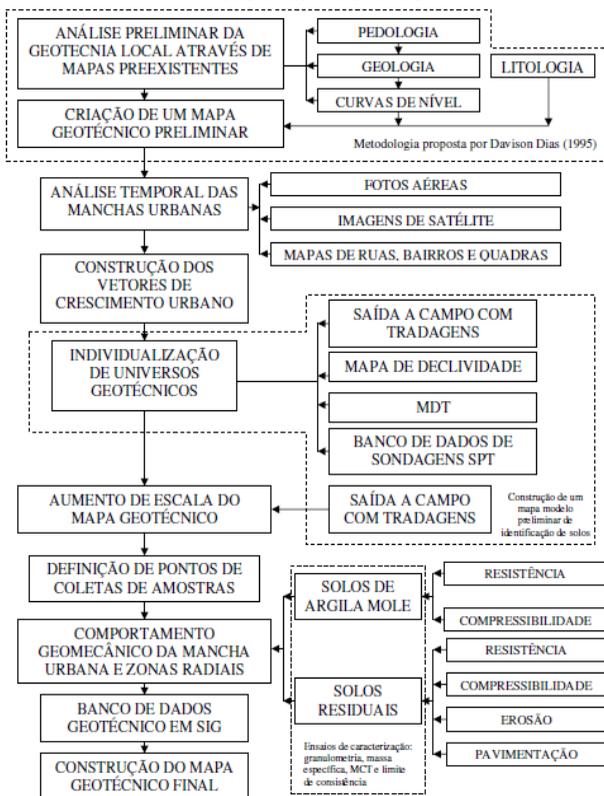
como em Santos (1997), Higashi (2002 e 2006), Mafra Jr (2007), Oliveira (2008), entre outros.

### 2.6.1.3 Metodologia de Higashi (2006)

A metodologia de Higashi tem embasamento no Mapeamento Geotécnico de Davison Dias (1995), em conjunto com o uso de um Sistema de Informações Geográficas, gerando mapas de estimativa litológica e pedológica das regiões em análise, orientando assim, através desse mapa a criação de outros mapas temáticos que auxiliem o planejamento urbano na ocupação e uso do solo.

As etapas da metodologia são apresentadas na Figura 13.

**Figura 13**– Diagrama da metodologia de uso e ocupação dos solos de cidades costeiras Brasileiras

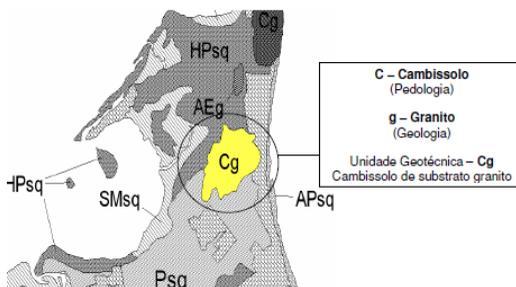


Fonte: Higashi, 2006.

O diagrama indica a proposta básica da metodologia, que consiste em um planejamento para expansão de áreas urbanas com a seguinte sequência lógica de execução:

- Análise Preliminar da Geotecnia local (ensaio em campo, laboratório, vetores de evolução da mancha urbana);
- Criação de um Mapa Geotécnico Preliminar (metodologia Davison Dias);

**Figura 14** – Emprego da simbologia de Unidades Geotécnicas



**Fonte:** Higashi, 2006.

- Realização de Ensaio de caracterização dos polígonos de cada Unidade Geotécnica;
- Análise Temporal da Evolução da Mancha Urbana (definição dos vetores de crescimento urbanos);
- Construção dos Modelos Digitais do Terreno e do Mapa de Declividades (diferenciar os solos que são formados em relevos planos e suave ondulado);
- Banco de dados de sondagens SPT; trabalhos em campo; uso de GPS (diferenciação dos solos das unidades);

O banco de dados geotécnico será criado em ambiente SIG, servindo de suporte para criação do mapa geotécnico final, com uma

diversidade de informações relativas à erosão, resistência ao cisalhamento, granulometria, compressibilidade, etc.

Por fim, Higashi (2002) orienta a simplificação da forma de classificação dos mapas, para uso como ferramenta de planejamento urbano. Pode-se, por exemplo, classificar as zonas das unidades em diferentes cores, orientando o risco, ou não, de se ocupar cada uma destas zonas.

## **2.7 Mapeamento de Áreas de Risco em ambiente SIG**

Existe uma diversidade de modelos para calcular estabilidade de encostas, e portanto, o mapeamento de áreas de risco a deslizamentos como o CHASM, SHALSTAB, SINMAP, dSLAM/IDSSM, GEOtop-FS, entre outros. Os modelos utilizados para avaliar a susceptibilidade a escorregamentos geralmente são produto do acoplamento de um modelo mecânico (modelo de estabilidade de encostas) e um modelo hidrológico. Tratando-se especificamente de escorregamentos translacionais, o modelo mecânico utilizado é o modelo de encosta infinita (MICHEL, 2013).

No estudo, foi adotado o modelo SHALSTAB, uma vez que o mesmo apresenta boa confiabilidade quando empregado nos modelos de drenagem de bacias, com percentual de erro reduzido, e gerando mapas de suscetibilidade com classificação de fácil entendimento, análise, cálculo e representação.

### **2.7.1 Modelo SHALSTAB**

O modelo SHALSTAB (*Shallow Stability Model*), foi desenvolvido por Montgomery e Dietrich (1994), tratando-se de um modelo hidrológico estacionário.

Os componentes do modelo consistem de parâmetros topográficos, geotécnicos e hidrológicos. Os parâmetros topográficos são a declividade e área de contribuição, obtidos no MDT (Modelo Digital de Terreno). Os geotécnicos como parâmetros do solo, coesão, ângulo de atrito, são obtidos através de ensaios de campo, laboratório e/ou estimados por estudos anteriores no local, podendo ser individualizado para cada tipo de solo da bacia ou generalizado para toda área utilizando o modelo de taludes infinitos. Os fatores hidrológicos, transmissibilidade do solo e precipitação são variáveis do tempo, sendo que sua duração e intensidade influenciam a magnitude dos deslizamentos (GUIMARÃES et al., 2002 apud ROSOLEM, 2014).

A integração do SHALSTAB ao mapeamento geotécnico pode compor uma ferramenta útil na prevenção de deslizamentos, auxiliando no planejamento de uso e ocupação do solo, diminuindo possíveis danos que podem ser causados à sociedade caso ocorram catástrofes devido ao movimento de solo (REGINATTO, 2013).

Segundo Montgomery e Dietrich (1994), a resposta apresentada pelo modelo é gerada em função de um parâmetro livre (Q/T) responsável pela classificação do terreno segundo o grau de estabilidade, originando 7 classes de estabilidade:

- a) Incondicionalmente instável e não saturado;
- b) Incondicionalmente instável e saturado;
- c) Instável e saturado;
- d) Instável e não saturado;
- e) Estável e não saturado;
- f) Incondicionalmente estável e não saturado;
- g) Incondicionalmente estável e saturado;

A Tabela 11 proposta por Montgomery e Dietrich faz esta identificação de classes, expressando a probabilidade de ocorrência de escorregamentos.

**Tabela 11** – Classes de Estabilidade

Classe de Estabilidade	Condição
(A) Incondicionalmente estável e saturado	$(a/b) < (T/Q)\text{sen}\theta$ $\tan\theta \leq \tan\phi(1-\rho_w/\rho_s)$
(B) Incondicionalmente estável e não saturado	$(a/b) < (T/Q)\text{sen}\theta$ $\tan\theta \leq \tan\phi((1-\rho_w/\rho_s)$
(C) Estável e não saturado	$(a/b) < (T/Q)\text{sen}\theta$ $\tan\phi((1-\rho_w/\rho_s) < \tan\theta < \tan\phi$ $\frac{a}{b} < \frac{\rho_s}{\rho_w} \cdot \left(1 - \frac{\tan\theta}{\tan\phi}\right) \cdot \frac{T}{Q} \cdot \text{sen}\theta$
(D) Instável e não saturado	$(a/b) < (T/Q)\text{sen}\theta$ $\tan\phi((1-\rho_w/\rho_s) < \tan\theta < \tan\phi$ $\frac{a}{b} \geq \frac{\rho_s}{\rho_w} \cdot \left(1 - \frac{\tan\theta}{\tan\phi}\right) \cdot \frac{T}{Q} \cdot \text{sen}\theta$
(E) Instável e saturado	$(a/b) > (T/Q)\text{sen}\theta$ $\tan\phi((1-\rho_w/\rho_s) < \tan\theta < \tan\phi$ $\frac{a}{b} > \frac{\rho_s}{\rho_w} \cdot \left(1 - \frac{\tan\theta}{\tan\phi}\right) \cdot \frac{T}{Q} \cdot \text{sen}\theta$
(F) Incondicionalmente instável e não saturado	$\tan\theta > \tan\phi$ e $(a/b) < (T/Q)\text{sen}\theta$
(G) Incondicionalmente instável e saturado	$\tan\theta > \tan\phi$ e $(a/b) > (T/Q)\text{sen}\theta$

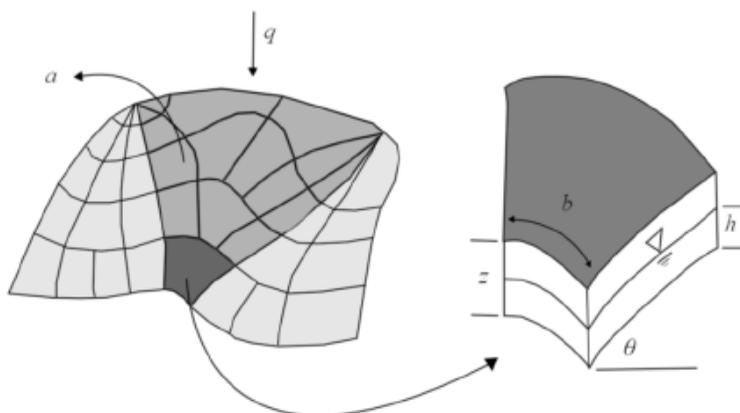
**Fonte:** Montgomery e Dietrich (1998 apud Michel, 2013).

### 2.7.1.1 Modelo Hidrológico

O modelo hidrológico utilizado pelo SHALSTAB é baseado no modelo desenvolvido por O'Loughlin (1986). Utiliza-se da precipitação no modelo estacionário, mapas de distribuição espacial de equilíbrio de saturação do solo e a declividade do relevo (MONTGOMERY e DIETRICH, 1994).

O modelo é exemplificado na Figura 15, onde  $a$  ( $m^2$ ) é a área de contribuição da montante,  $b$  (m) é o comprimento de contorno de fronteira inferior de cada elemento e  $q$  (m/d) é a taxa de recarga uniforme.

**Figura 15** – Modelo Hidrológico estacionário de recarga uniforme.



**Fonte:** Michel, 2013.

Formulação:

Quantidade de água que entra na camada de solo ( $Qe$ ):

$$Qe = q \times A \quad (2)$$

Onde:

$A$  = Área de Contribuição;

$q$  = Precipitação Total;

Já o fluxo de saída de água do solo saturado é o produto da velocidade do fluxo pela área de saída, onde a velocidade é definida por meio da lei de Darcy.

Lei de Darcy:

$$vp = kp \times i \quad (3)$$

Onde:

$vp$  = Velocidade de Percolação do Solo (m/dia);

$kp$  = Coeficiente de Percolação no Solo (m/dia);

$i$  = Gradiente Hidráulico (m/m);

Considerando o coeficiente de percolação constante pela camada de solo, e a carga hidráulica dada pela diferença entre as cotas de entradas e saídas, chegamos a:

$$Qs = k \times \sin \theta \times h \times \cos \theta \times b \quad (4)$$

Ao ocorrer saturação completa, ocorrem modificações na equação, surgindo um  $Qsmáx$ :

$$Qsmáx = b \times T \times \cos \theta \quad (5)$$

Onde  $T$  é a transmissibilidade do solo ( $m^3$ /dia), expressa por:

$$T = k \times z \times \cos \theta \quad (6)$$

Sendo,

$k$  = Condutividade Hidráulica Saturada ( $m^2$ /dia);

$z$  = Espessura do Solo (m);

Para O'Loughlin (1986) a umidade é a parcela saturada do solo em um dado estado uniforme de recarga. Sendo assim pode-se obter o nível de saturação do solo através da relação entre a entrada de água, e a saída da mesma na camada saturada de solo.

$$w = Qe / Qsmáx \quad (7)$$

Ou seja,

$$w = q \times A / b \times T \times \sin \theta = \frac{h}{z} \quad (8)$$

### 2.7.1.2 Modelo de Talude Infinito

O modelo de estabilidade de taludes é baseado na Lei de Mohr-Coulumb, que diz que, a ocorrência de deslizamentos se dá quando as forças estabilizantes não suportam as forças de instabilização. A representação matemática do critério é dado pela equação 9:

$$\tau = c + (\sigma - \mu) \times \tan \phi \quad (9)$$

Onde:

$\tau$  = Tensão de cisalhamento tangencial (N/m<sup>2</sup>);

$c$  = Coesão do Solo (N/m<sup>2</sup>);

$\sigma$  = Tensão Normal (N/m<sup>2</sup>);

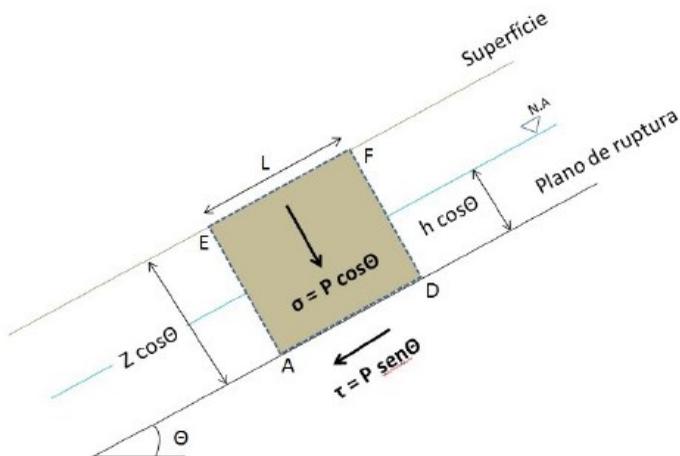
$\mu$  = Poropressão (N/m<sup>2</sup>);

$\phi$  = Ângulo de Atrito do solo (graus);

No entanto, para aplicação no Brasil onde há recorrência de escorregamentos translacionais rasos, é comum a utilização de um modelo para estabilidade de encosta infinita.

Para esta solução, Guimarães et al. (2003) comenta que os efeitos causados por atrito nas laterais e os efeitos de borda são desprezados, considerando que o comprimento da encosta é significativamente maior que sua profundidade.

**Figura 16** – Representação do modelo de Talude Infinito



**Fonte:** Rosolem, 2014.

A partir da Figura 16, temos:

$$P = \gamma \times g \times z \cos \theta \times L \quad (10)$$

Com isso, podemos definir a tensão normal, poro pressão e tensão de cisalhamento, que são:

$$\sigma = \gamma \times g \times z \cos^2 \theta \quad (11)$$

$$\tau = \gamma \times g \times z \cos \theta \sin \theta \quad (12)$$

$$\mu = \gamma w \times g \times h \cos^2 \theta \quad (13)$$

Onde,

$z$  = Espessura do solo (m);

$g$  = Aceleração da Gravidade ( $m^2/s$ );

$\gamma$  = Massa específica do Solo ( $kN/m^3$ );

$\gamma w$  = Massa específica de Água ( $kN/m^3$ );

Substituindo as equações (11), (12) e (13) na equação (9), obtemos:

$$\gamma \times g \times z \cos \theta \sin \theta = c + (\gamma g \times z \cos^2 \theta - \gamma w g \times h \cos^2 \theta) \tan \phi \quad (14)$$

Aplicando algumas formulações matemáticas trigonométricas e de simplificação, chegamos a:

$$\frac{h}{z} = \frac{\gamma}{\gamma w} \times \left(1 - \frac{\tan \theta}{\tan \phi}\right) + \frac{c}{\gamma w \times z \times g \times \cos^2 \theta \times \sin \theta} \quad (15)$$

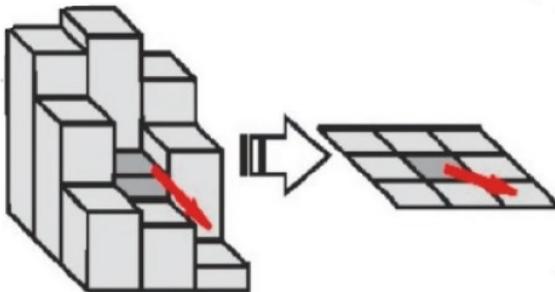
Por fim, podemos substituir a equação (8) na (15) e isolar os parâmetros q e T, para chegar na modelação apresentada pelo SHALSTAB, obtendo:

$$\frac{q}{T} = \sin \theta \frac{\gamma}{\gamma w} \times \left(1 - \frac{\tan \theta}{\tan \phi}\right) + \frac{c}{\gamma w \times z \times g \times \cos^2 \theta \times \sin \theta} \quad (16)$$

### 2.7.1.3 Limitações da Formulação SHALSTAB

Dentre as limitações do modelo desenvolvido por Dietrich and Montgomery (1994) está a utilização de um conjunto de dados geotécnicos para toda a bacia. Desta forma todo o solo contido na bacia terá a mesma coesão, ângulo de atrito interno, espessura e massa específica. Outra limitação está na determinação da área de contribuição ao assumir que o fluxo de água percorrerá um único caminho, determinado ao analisar a altimetria dos pixels de um Modelo Digital de Terreno (MDT), em uma das oito direções principais – método conhecido como D-8, representado na Figura 17 (CARVALHO, 2010).

**Figura 17** – Esquema do fluxo de água em função das células vizinhas



Fonte: Carvalho (2010).

Para alterar a primeira limitação, Michel (2013) desenvolveu um algoritmo executável em ambiente ArcGis®, que consiste em adicionar duas variáveis (coesão das raízes e peso da vegetação) a formulação inicial do SHALSTAB, tornando possível local espacialmente os parâmetros geotécnicos para cada uma das unidades.

Quanto à direção de fluxo no mapa de áreas de contribuição, podemos buscar *softwares* alternativos, que realizem a análise de pixels do *raster* de forma menos limitada, como é o caso do TauDEM (*Terrain analysis using Digital Elevation Models*), que gera o mapa através de infinitas direções para o fluxo.

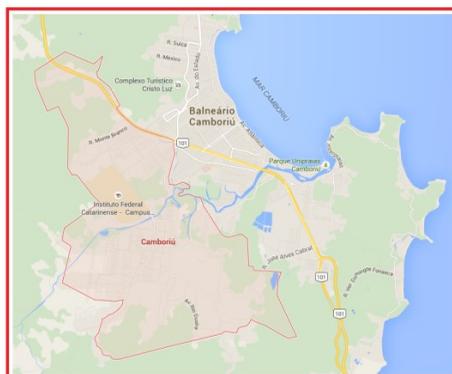
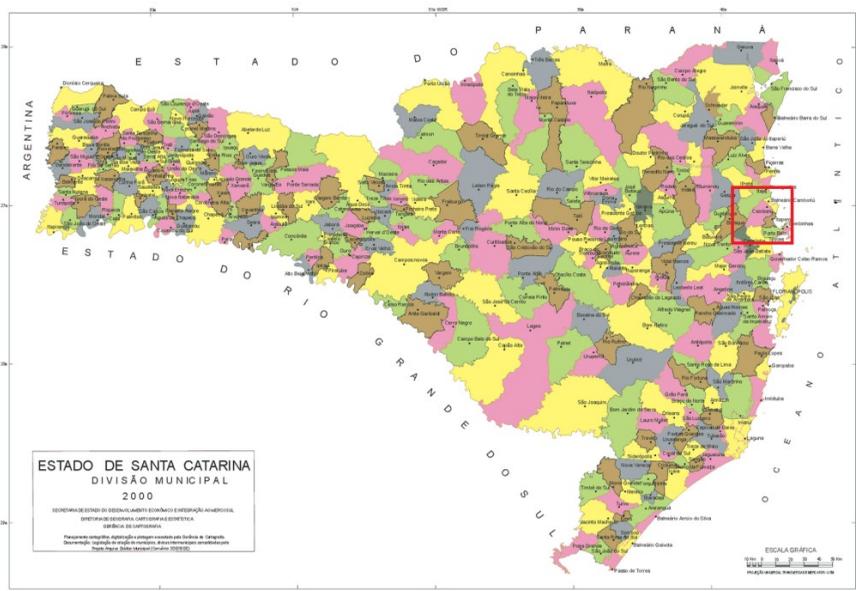
### **3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO**

#### **3.1. Camboriú**

O município de Camboriú (Figura 18) está presente na região do Vale do Itajaí, pertence ao estado de Santa Catarina, no Brasil. Localizada a uma latitude 27° 01' 31'' sul e a uma longitude 48° 39' 16'' oeste. Sua rede hidrográfica constitui-se da bacia do Rio Camboriú, que corta o município e o abastece com água potável. Suas nascentes estão no extremo sul do município. De lá, corre por quarenta quilômetros até desembocar no mar, em Balneário Camboriú. Seus principais afluentes são os rios: Peroba, Camboriú Pequeno, do Braço, dos Macacos e Canoas.

Está constituído em uma área de 212,32 km<sup>2</sup> e possui população aproximada de 62 mil habitantes (PMC, 2015). Salienta-se ainda o aumento da urbanização nos últimos anos, sendo esse, influenciado pela oferta de trabalho na região, principalmente em Balneário Camboriú e Itajaí. Esse desenvolvimento, também desordenado, ocasionou na ocupação de áreas de risco e de preservação permanente. A falta de planejamento e também de infraestrutura adequada, tornou-se um dos grandes problemas socioambientais do município, destacando, sobretudo, a ausência de sistema de tratamento de esgoto. (PMC, 2012).

**Figura 18 – Localização de Camboriú**



**Fonte:** Autor.

### 3.2. Bacia do Rio Camboriú

A região onde está inserida a Bacia Hidrográfica do Rio Camboriú começou a ser colonizada no início do século XVIII, dando origem aos povoados de Camboriú, Penha, Piçarras, Itajaí e Tijucas. Em 1964 o Município de Balneário Camboriú se emancipou de Camboriú

(Corrêa, 1985 apud Urban, 2008). A bacia localiza-se na Região Hidrográfica do Atlântico Sul, compreendida na Região hidrográfica do Vale do Itajaí, porém como deságuas diretamente no Oceano Atlântico é considerada uma bacia independente.

A Tabela 12 traz informações sobre as características físicas da Bacia do Rio Camboriú, em estudo realizado pela EPAGRI, com equipe multidisciplinar, coordenado pelo Ciram.

**Tabela 12** – Características Físicas da Bacia do Rio Camboriú

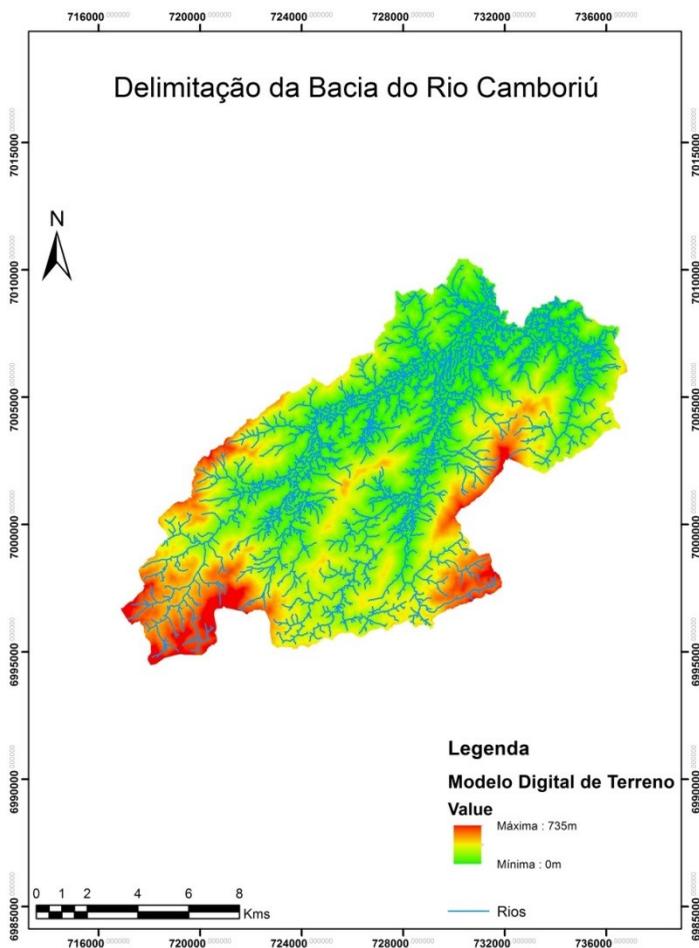
<b>PARÂMETRO</b>	<b>ATRIBUTO</b>
Área de drenagem	199,8 km <sup>2</sup>
Perímetro da bacia hidrográfica	94,9 km
Coefficiente de compacidade	1,797
Comprimento axial da bacia hidrográfica	26,4 km
Fator de forma	0,30
Ordem da bacia hidrográfica	5 <sup>a</sup>
Comprimento do rio principal	33,8 km
Comprimento de todos os cursos d'água	643,9 km
Densidade de drenagem	3,22 km/km <sup>2</sup>
Extensão média do escoamento superficial	0,077 km
Menor distância entre nascente e foz	25,7 km
Índice de sinuosidade do curso d'água	26,03%
Declividade média	25,45%
Altitude máxima	735 m
Altitude média	163 m
Altitude mínima	0
Tempo de concentração	10 horas

**Fonte:** EPAGRI/Ciram (1999).

Ao adquirir os mapas topográficos e analisar as restrições de drenagem da bacia, optou-se por restringir a área de drenagem de algumas micro bacias, pertencentes a áreas completamente planas e urbanizadas, cujo efeito para o estudo de susceptibilidade seria pequeno. É importante salientar, caso o foco da pesquisa fosse o estudo de erosão e/ou inundação, deveríamos considerar a bacia como um todo.

Considerando isto, na Figura 19 são apresentados os limites definidos no estudo, contemplando cerca de 160 km<sup>2</sup> dos 199,8 km<sup>2</sup> delimitados pela EPAGRI.

**Figura 19**– Limites de estudo da Bacia do Rio Camboriú



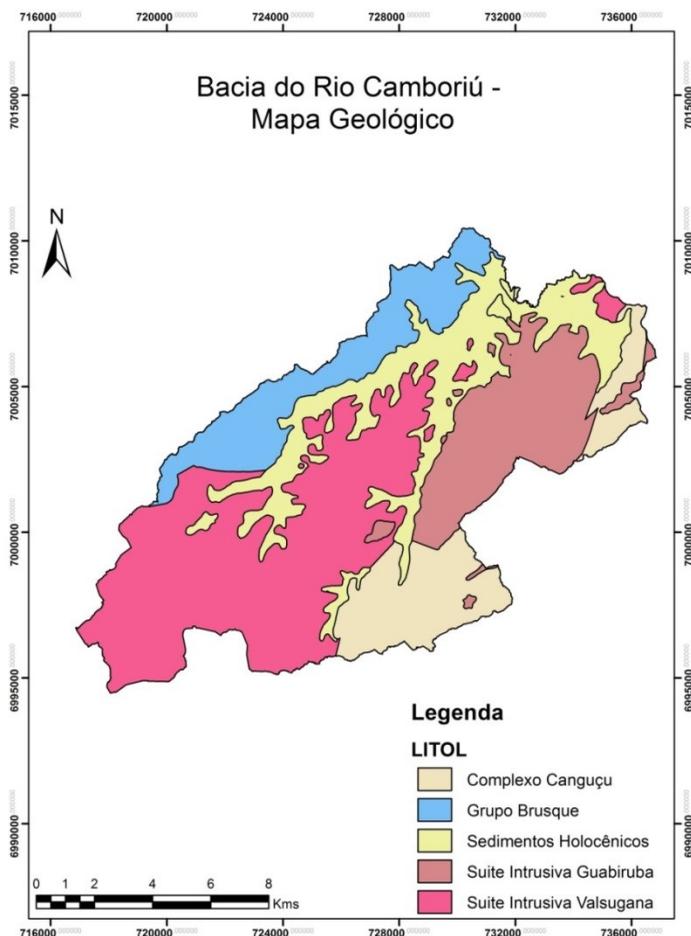
**Fonte:** Autor.

Os pontos de maior altitude se localizam no extremo sul da bacia, com destaque para o pico da pedra a 750 m do nível do mar. As altitudes mais elevadas são frutos de ramificações da Serra Geral, como indicado pela PMC (2012).

### 3.2.2. Geologia

A Figura 20 apresenta as formações geológicas presentes na Bacia do Rio Camboriú, em escala 1:75.000.

**Figura 20**– Mapa Geológico da Bacia do Rio Camboriú



**Fonte:** Autor.

Observando as formações, notasse que a principal litologia das unidades presentes na Bacia é o granito.

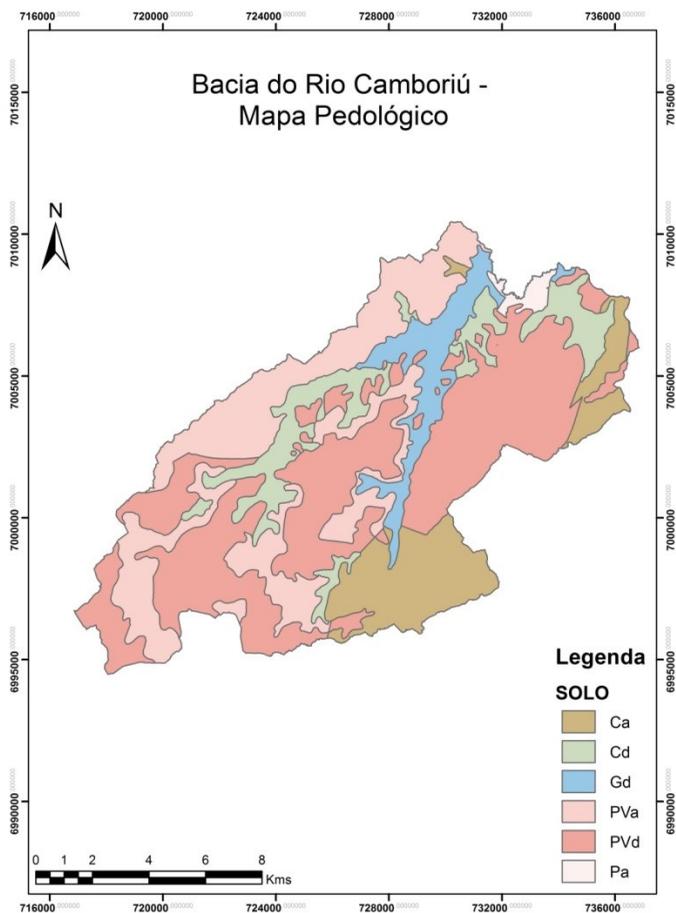
A descrição das unidades geológicas é apresentada conforme levantamento dos solos do Estado de Santa Catarina, pela Embrapa (1999), de forma resumida:

- **Complexo Canguçu:** São constituídas por metatexitos, diatexitos, gnaisses porfiroblásticos, com enclaves dioríticos, quartzo-dioríticos, anfibolíticos e metassedimentares.
- **Grupo Brusque:** Os metamórficos do Complexo Brusque localmente são constituídos de rochas filíticas de coloração avermelhada-marrom quando intemperizadas, extremamente friáveis, com pontuações estiradas esbranquiçadas ao longo dos planos de xistosidade, provável feldspato. Outras litologias podem eventualmente ocorrer em outras porções geográfica do município (ZANINI apud PMC, 2013).
- **Sedimentos Holocênicos:** formações recentes, depósitos de encostas, de praias, etc.
- **Suíte Intrusiva Guabiruba:** compreende uma série de pequenos corpos monzogranitos, sienogranitos e raramente granodioritos com quartzo, micropertitas plagioclásio e biotita como mineirais essenciais e, opcaos, esfeno zircão e alanita como minerais acessórios.
- **Suíte Intrusiva Valsunaga:** apresenta textura porfírica grossa e muito grossa. Como indica a Embrapa (1999), estes granitos de granulação mais grosseira, são responsáveis pela formação de solos das classes Podzólico Vermelho-Amarelo, Podzólico Vermelho-Escuro, Cambissolo e Solos litólicos – todos eles cascalhentos.

### 3.2.3. Pedologia

O mapa das unidades pedológicas generalizadas está representado na figura 21, cedido pela prefeitura Municipal de Camboriú, em escala 1:75.000.

**Figura 21**– Mapa Pedológico da Bacia do Rio Camboriú



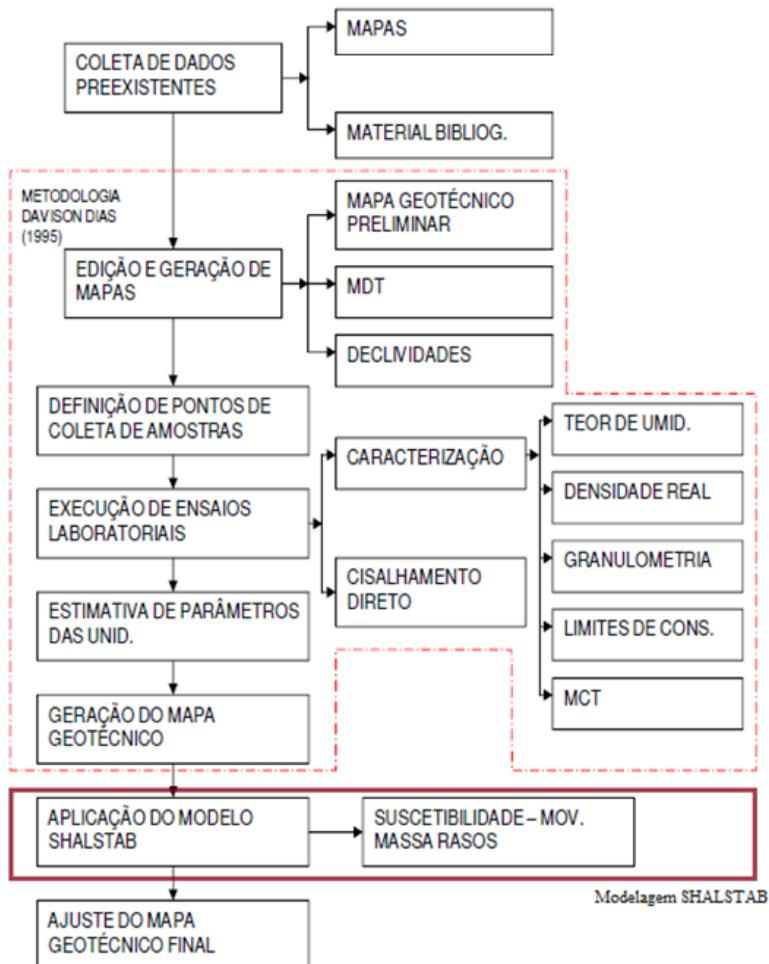
**Fonte:** Autor.

A descrição das unidades pedológicas é apresentada conforme levantamento dos solos do Estado de Santa Catarina, pela Embrapa (1999), de forma resumida:

- **Cambissolos (Ca, Cd):** compreende solos minerais, não hidromórficos, com horizonte B incipiente bastante heterogêneo, no que se refere à cor, espessura e textura. São derivados de materiais relacionados a rochas de composição e natureza bastante variáveis.
- **Podzólicos Vermelho-Amarelo (Pa, PVa, PVd):** compreende solos minerais, não hidromórficos, com horizonte B textural, em geral vermelho-amarelado ou bruno-amarelado, com características morfológicas, físicas e químicas bem variáveis dentro da classe. Formam-se em áreas de relevo suave ondulado até forte ondulado, sob condições climáticas variáveis de tropical a subtropical.
- **Gleissolos (Gd):** caracterizam-se, pela forte gleização, em decorrência da saturação por água, associado à demanda de oxigênio pela atividade biológica. São solos hidromórficos, constituídos por material mineral, que apresentam horizonte glei. Comumente encontrados em proximidades do curso d'água em áreas planas.

## 4. MÉTODO

A metodologia utilizada para execução deste trabalho é apresentada resumidamente no fluxograma a seguir. O programa empregado para execução das etapas digitais dessa metodologia, foi o ArcGIS® versão 10.1.



Fonte: Autor.

#### 4.1. Edição dos Mapas

O primeiro passo, antes mesmo de entrar na metodologia Davison Dias em si, é obter dados topográficos, pedológicos e geológicos da região da bacia em estudo.

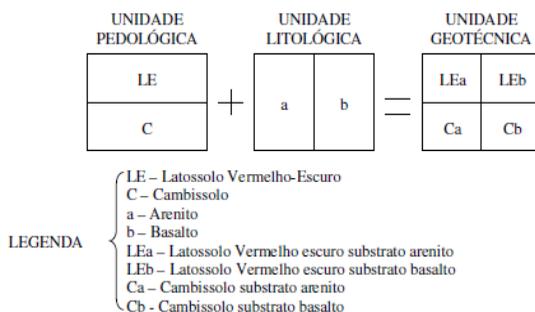
A partir da obtenção destes dados, criam-se os mapas que irão embasar o estudo de riscos de deslizamentos, objetivo final do estudo. É necessário ainda, padronizar a base cartográfica a fim de atender a resolução do IBGE, de modo a ter todos os mapas em SIRGAS2000 ou WGS 1984, que são praticamente equivalentes. Estas transformações geográficas foram feitas no programa ArcGIS® 10.1.

A escala utilizada para representar os mapas gerados nesta seção da metodologia foi 1:75.000.

Seguimos a metodologia, elaborando o Mapa de Estimativa das Unidades Geotécnicas, através da manipulação dos mapas acima citados, onde cada unidade geotécnica tem a influência de características geológicas e pedológicas.

As unidades são representadas por letras maiúsculas e minúsculas, como exemplificado a seguir, na Figura 22.

**Figura 22** – Exemplo de Estimativa de Unidades Geotécnicas



**Fonte:** Higashi (2006).

Para obtenção do Modelo Digital de Terreno (MDT), foi utilizado o mapa de curvas de nível cedido pela Prefeitura Municipal de Camboriú em escala 1:8.000. O MDT representa a distribuição espacial das variações de altitude no terreno, obtido a partir de manipulação com a ferramenta *topo to raster* no ArcMap. Foi utilizado também *hillshade* com transparência para melhorar a representação gráfica, e aplicado o processo de *fill* na aba *hidrology*, para correção de imperfeições do modelo gerado, que possam interferir nas análises de fluxo futuras.

É possível representar o terreno também através de uma Rede Triangular Irregular (TIN), através da ferramenta *create TIN* com dados de entrada do mapa de curvas de níveis. Esta representação é mais fiel às feições do terreno, por calcular as renderizações de forma vetorial, porém acaba tornando-se muito pesada para os demais cálculos. Foi gerada no trabalho apenas para mostrar o terreno de forma tridimensional.

O mapa de Declividades é elaborado através da ferramenta *slope*, a partir do MDT anteriormente gerado, e apresenta as características do perfil de relevo, podendo ser em graus ou porcentagem. No trabalho, adotou-se o mapa em porcentagem, com a classificação da EMBRAPA (1999), para o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos.

A elaboração do Modelo Digital de Terreno (MDT) e do mapa de declividades é importante para definir os pontos de coleta de amostras, visto que solos em diferentes elevações e declividades podem apresentar comportamentos heterogêneos devido à intemperismos, mesmo dentro de uma mesma unidade geotécnica, como indicado por Zuquette e Gandolfi (1987) apud Oliveira (2014).

Por fim, foi gerado o mapa de direções de fluxo em *flow direction*, e a partir dele, o mapa da área de contribuição da bacia em *flow accumulation*, representando o acúmulo do fluxo de água na bacia do Rio Camboriú. Este, é obtido para ser utilizado no modelo SHALSTAB, como parâmetro hidrológico da bacia.

## **4.2. Ensaios de caracterização**

Os ensaios de caracterização foram executados embasados na norma NBR 6457/86, a qual prescreve o procedimento de preparo das amostras.

### **a) Teor de Umidade Natural**

O teor de umidade natural foi determinado com base na NBR 6457:1986, pelo método da estufa. É previsto pela norma que se ensaiem pelo menos três amostras para cada ponto de estudo, pesando antes e depois de permanecerem na estufa por no mínimo 24 horas. O teor de umidade é dado pela média aritmética da diferença de peso entre as três amostras para cada ponto.

## b) Granulometria

O ensaio granulométrico tem seu procedimento normalizado pela NBR 7181:1984, a fim de definir a dimensão das partículas de solos analisadas. O procedimento pode ser dividido em três etapas: sedimentação, peneiramento fino e grosso.

**Tabela 13** – Escala Granulométrica

Classificação	Diâmetro dos grãos
Argila	menor que 0,002 mm
Silte	entre 0,06 e 0,002 mm
Areia	entre 2,0 e 0,06 mm
Pedregulho	entre 60,0 e 2,0 mm

**Fonte:** NBR 7181:1984.

O peneiramento é composto por uma diversidade de peneiras de abertura de malha definidas pela NBR 5437 dispostas em uma sequência crescente e submetidas a um agitador mecânico.

Após agitadas as peneiras, verifica-se a massa de material retida em cada peneira. Neste trabalho, foi executado peneiramento grosso, com lavagem do material retido na peneira de 2,0mm, e peneiramento fino, com lavagem do material retido na peneira 0,075mm.

A fase de sedimentação, para determinação da parcela fina de solo, utilizando-se da Lei de Stokes, não foi executada no trabalho, por tornar o ensaio demasiadamente demorado.

## c) Massa específica real dos grãos

A massa específica real dos grãos de solo é normalizada pela NBR 6508:1984. O ensaio basicamente consiste em determinar o peso seco da amostra, e em seguida seu volume pelo princípio de Arquimedes, realiza-se o ensaio com pares de amostras em um picnômetro de 500 ml, adotando-se a média dos valores.

## d) Índice de Plasticidade

O Índice de Plasticidade (IP) é obtido pela diferença numérica entre o Limite de Liquidez (LL) e o Limite de Plasticidade (LP). A

determinação dos Limites de Liquidez e Plasticidade é normalizada pela NBR 6459:1984 e NBR 7180:1984, respectivamente.

Representa basicamente uma porção de água em massa que pode ser adicionada a uma porção de massa da amostra de solo, a partir do seu Limite de Plasticidade, mantendo a consistência plástica do solo. A partir disto, podemos caracterizar a amostra como: fracamente plásticas (1 à 7), mediamente plásticas (7 à 15) e altamente plásticas (>15).

### **e) Método expedito das pastilhas - MCT**

O procedimento e os equipamentos para realização dos ensaios visando a caracterização do solo através da metodologia MCT (método das pastilhas), foi realizado neste trabalho tal qual Sant'Ana (2002) e descrito a seguir, visto que não é de uso comum na maioria dos trabalhos de Mecânica dos Solos.

Equipamentos para o ensaio:

- Equipamentos convencionais: almofariz, proveta, peneiras (n40 e n200), balança de 5 kg, placa de vidro despolido, espátula e papel filtro.
- Equipamentos específicos: anéis de PVC rígido, teflon ou similar com 20 mm de diâmetro e peso total de 10g, placas de teflon de cerca de 1 mm de espessura, fio de nylon esticado em arco de arame, circulador de ar, lupa (10x), escala de precisão graduada em mm, placa de pedra porosa capaz de manter a carga hidráulica negativa de 0,5 mm.

Para a execução do ensaio devem-se peneirar aproximadamente 30g de material passante na # n40 (0,42 mm) de uma amostra previamente seca ao ar.

Adiciona-se água a este material e mexe-se com a espátula intensamente até obter consistência adequada (aproximadamente 400 vezes). Esta consistência é representada pela penetração de 1 mm no mini-penetrômetro.

Da pasta obtida pela mistura do solo e água, determina-se o seu teor de umidade e retira-se a quantidade de material suficiente para moldar uma esfera de 1 cm de diâmetro, aproximadamente. A pasta preenche um anel de PVC que repousará previamente na placa de teflon.

A energia para a colocação e acomodação do material no interior do anel, deverá ser suficiente para permitir o preenchimento de modo homogêneo de todos os espaços do anel, inclusive da parte inferior.

Estando a amostra no interior do anel um fio de nylon esticado é passado com auxílio do arco de arame para deixar plana a superfície.

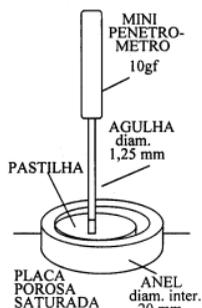
Preenchem-se pelo menos quatro anéis para cada amostra. Do material restante, confeccionam-se duas esferas de cerca de 20 mm de diâmetro. Todo o material, anéis e esferas deverão ser secos em estufa a 60°C durante um período de 6 horas, no mínimo.

Após retirar as amostras da estufa, fazem-se as medições e observações para classificar o solo, fazendo a medida radial da contração do diâmetro de solo em relação ao diâmetro interno do anel, após o equilíbrio térmico, obtendo um valor médio de contração diametral em milímetros.

Em seguida, os anéis e o material contido nele são colocados sobre papel filtro em uma pedra porosa saturada até que a carga hidráulica atinja (-) 5 mm. Anota-se o tempo decorrido até que a superfície das amostras fique tomada pela frente úmida. O material permanece em repouso até que a superfície das amostras fique tomada pela frente úmida. O material permanece em repouso sobre a pedra porosa durante pelo menos 2 horas, período em que as alterações observadas na superfície das pastilhas como trincas, inchamentos e abaulamentos são anotadas.

Findado este tempo, mede-se a profundidade alcançada pela penetração do mini-penetrômetro na pastilha do solo, tomando-se o cuidado para que este se mantenha em posição vertical e atue sob o peso próprio, após ser cuidadosamente disposto em contato com a superfície do solo (Figura 23).

**Figura 23** - Esquema de penetração de pastilhas de solos.



**Fonte:** NOGAMI e VILLIBOR, 1994 e 1996.

Deve-se atentar ao posicionamento do mini-penetrômetro, que deve ser o mais afastado possível dos bordos do anel, e em caso de mais uma penetração em uma mesma pastilha, deve-se manter distância entre as penetrações convenientes.

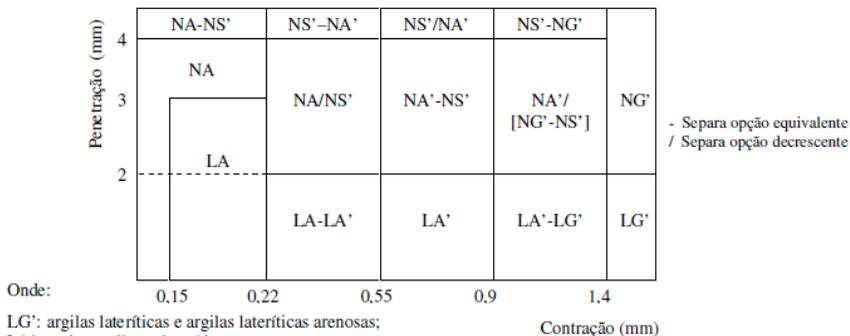
Das duas esferas de 20 mm de diâmetro confeccionadas e secas em estufa, a primeira é imersa em água, observando o seu comportamento, que segundo Godoy (1996) poderá ser um dos seguintes:

- i) A esfera se desagrega nos primeiros 10 segundos de imersão e as partículas de solo resultantes podem ser identificadas;
- ii) A esfera se desagrega em partículas em até 2 horas e as partículas de solo podem ser identificadas;
- iii) A esfera se rompe em blocos milimétricos;
- iv) A esfera de solo se trinca ou não se altera;

A outra esfera será submetida ao esmagamento com o auxílio do polegar, podendo ocorrer as seguintes situações:

- i) A esfera é quebrada sob a pressão do polegar e indicador;
- ii) A esfera é quebrada sob a pressão do dedo polegar em uma superfície plana;
- iii) A esfera não se quebra

Os dados obtidos de contração da pastilha de solo e penetração são inseridos no gráfico da figura 24. O símbolo “-“ utilizando em alguns casos separa opções equivalentes quanto ao grupo de solo, e o “/”, separa opções com menor grau de incidência.

**Figura 24** – Gráfico para a determinação expedita MCT

**Fonte:** NOGAMI e VILLIBOR, 1994 e 1996.

### 4.3. Resistência ao Cisalhamento

O ensaio de cisalhamento direto está diretamente relacionado ao critério Mohr-Coulomb e foi executado segundo a norma ASTM D3080. O ensaio basicamente busca determinar os parâmetros de resistência ao cisalhamento de um solo.

#### 4.3.1. O ensaio

Normalmente, o ensaio é realizado em duas etapas, uma de Consolidação, onde o corpo de prova é consolidado com cargas normais, e uma etapa de Ruptura, onde são aplicadas tensões no corpo de prova até sua ruptura, em condições drenadas.

A seguir serão apresentados, resumidamente, os procedimentos de ensaio.

##### 4.3.1.1. Preparação da amostra

Na realização do ensaio foram utilizadas amostras de solo moldadas in loco em um molde metálico de dimensões 10,16 x 10,16 x 2 cm.

A amostra é posicionada na prensa de cisalhamento e inundada, de modo a alcançar saturação completa da amostra, evitando contrapressão de água na amostra.

#### 4.3.1.2. Consolidação e Cisalhamento

A consolidação do corpo de prova se dá através da aplicação de cargas normais em condição drenada, ou seja, permitindo que água saia da amostra. Deve-se aguardar o fim de toda compressão causada pelo carregamento normal, antes de proceder a etapa de ruptura.

Estabilizada a deformação vertical do corpo de prova, o ensaio prossegue com a movimentação da parte inferior da caixa metálica bipartida, gerando assim a tensão de cisalhamento. Os ensaios de cisalhamento direto podem ser por tensão controlada ou deformação controlada, sendo este último o adotado.

#### 4.3.2. Resultados

Os resultados obtidos são utilizados para construção de gráficos de tensão x deformação horizontal, deformação vertical x deformação horizontal e tensão cisalhante máxima x tensão normal. Com isso é possível obter o gráfico de Tensão Cisalhante máxima ( $\tau_{máx.}$ ) x Tensão Normal ( $\sigma$ ), e desta forma, determinar o ângulo de atrito interno e a coesão das amostras de solos coletadas em campo.

#### 4.4. Mapa Geotécnico

Nesta seção, é feito o ajuste do mapa geotécnico preliminar com os resultados obtidos a partir da metodologia de Davison Dias (1995), a inclusão dos parâmetros geotécnicos dos ensaios, em ambiente SIG, para cada unidade preliminar, formando um documento final, que contenha todas as informações, formando um banco de dados georreferenciado, para que se possa seguir com a modelagem de riscos de deslizamentos rasos.

É importante salientar que as amostras coletadas para ensaios foram realizadas, buscando ter pelo menos um ponto em cada uma das unidades geotécnicas identificadas. Além disso, procurou-se retirar as amostras de solo sempre do horizonte C.

#### 4.5. Modelo SHALSTAB

Foi utilizado o modelo SHALSTAB (*Shallow Landsliding Stability Model*), já que todas as etapas de obtenção de parâmetros e edição de mapas foram executadas.

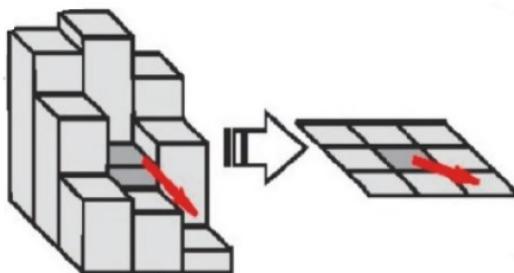
O modelo original consiste em designar o grau de estabilidade de uma encosta, para deslizamentos translacionais rasos, através da resolução de uma equação por iteração, onde é considerado um único conjunto de parâmetros geotécnicos para toda área de estudo, além de um fluxo de água unidirecional e constante.

As extrapolações realizadas acabam gerando limitações este modelo. Com intuito tornar os resultados mais sólidos e confiáveis, foi utilizado o algoritmo proposto por Michel (2013), que consiste em incluir duas novas variáveis a equação, tornando assim possível local espacialmente os parâmetros geotécnicos em função de cada uma das unidades geotécnicas da bacia de estudo.

A aplicação do algoritmo foi realizada com a ferramenta *raster calculator*, considerando nulos os parâmetros de coesão das raízes e peso da vegetação incluídos no cálculo por Michel (2013). Além disso, 3 diferentes espessuras de solo foram utilizadas no modelo com objetivo de gerar diferentes cenários de profundidade de ruptura, sendo eles 2, 5 e 10m.

Quanto ao modelo hidrológico, foi gerado no *software* do ArcGIS® 10.1 através do método D-8, representadas como na figura 25.

**Figura 25** – Mapa de Sumidouros



**Fonte:** Carvalho (2010).

Com isso, o fluxo de água a montante dos pixels é distribuído as células a jusante de forma proporcional a declividade, considerando 8 direções existentes.

## 5. RESULTADOS – BACIA DO RIO CAMBORIÚ

Os resultados obtidos no desenvolvimento deste trabalho têm como objetivo mapear as áreas susceptíveis a deslizamentos translacionais rasos na bacia do Rio Camboriú, utilizando o modelo SHALSTAB, executado através do *software* ArcGIS®, da ESRI.

Para que esse resultado possa melhor ser analisado, dividiu-se da seguinte maneira, como apresentado a seguir:

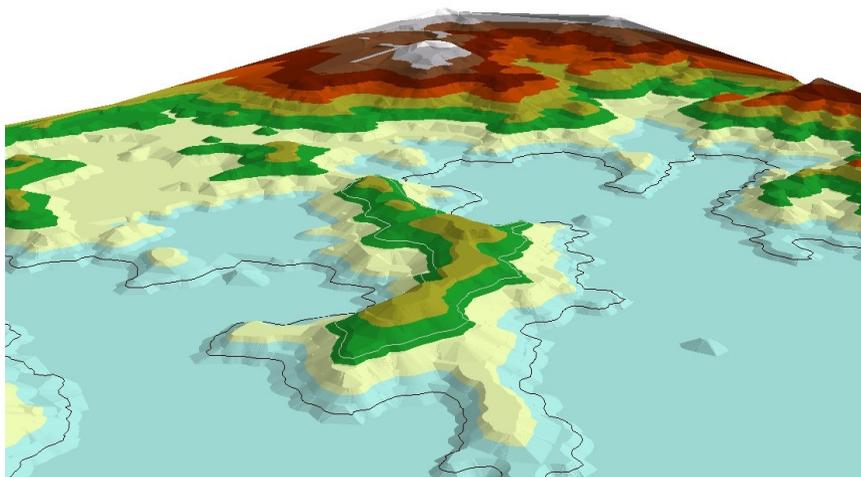
- Parâmetros Topográficos da bacia do Rio Camboriú – são apresentados os atributos da bacia, como curvas de nível, modelo digital de terreno e declividade, que subsidiarão as análises espaciais futuras;
- Resultados dos ensaios de caracterização dos solos da bacia do Rio Camboriú – resultados de granulometria, teor de umidade natural, densidade real das partículas, Limites de Atterberg e MCT – junto com suas seguintes avaliações;
- Resultados dos parâmetros de resistência dos solos;
- Apresentação do Mapa Geotécnico – segundo a metodologia de Dias (1995), com a definição das unidades geotécnicas e parâmetros geotécnicos estimados pelos ensaios;
- Análise das áreas susceptíveis a deslizamentos rasos através do modelo SHALSTAB, resultante da iteração do modelo digital de terreno da bacia e dos parâmetros geotécnicos obtidos;

## 5.1. Parâmetros Topográficos

### 5.1.1. Rede triangular irregular (TIN)

A figura 26 mostra parte do terreno em rede triangular irregular, permitindo visão preliminar do modelo digital da superfície.

**Figura 26** – TIN em vista parcial tridimensional

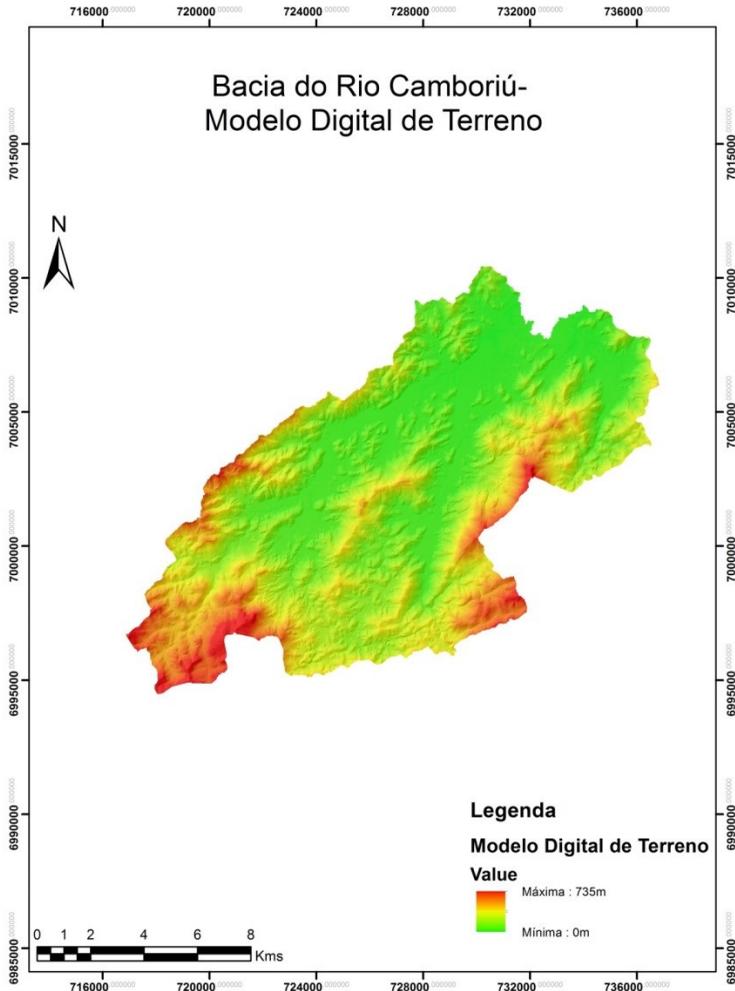


**Fonte:** Autor.

### 5.1.2. Modelo Digital do Terreno (MDT)

O Modelo Digital do Terreno mostrado na Figura 27 representa a distribuição espacial das variações de altitude no terreno.

**Figura 27 – Mapa Digital do Terreno**

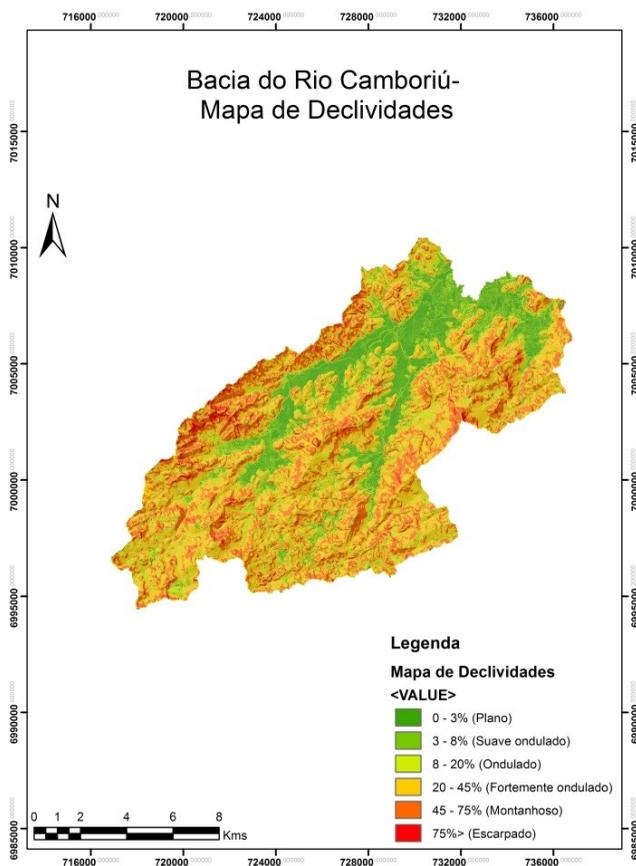


**Fonte:** Autor.

### 5.1.3. Mapa de Declividades

A Figura 28 traz a representação do Mapa de Declividades, que apresenta as características do perfil de relevo na Bacia. É um dos principais influenciadores de suscetibilidade no Modelo SHALSTAB, sendo que, as áreas mais íngremes, tem maior propensão a deslizamentos.

**Figura 28 – Mapa de Declividades**

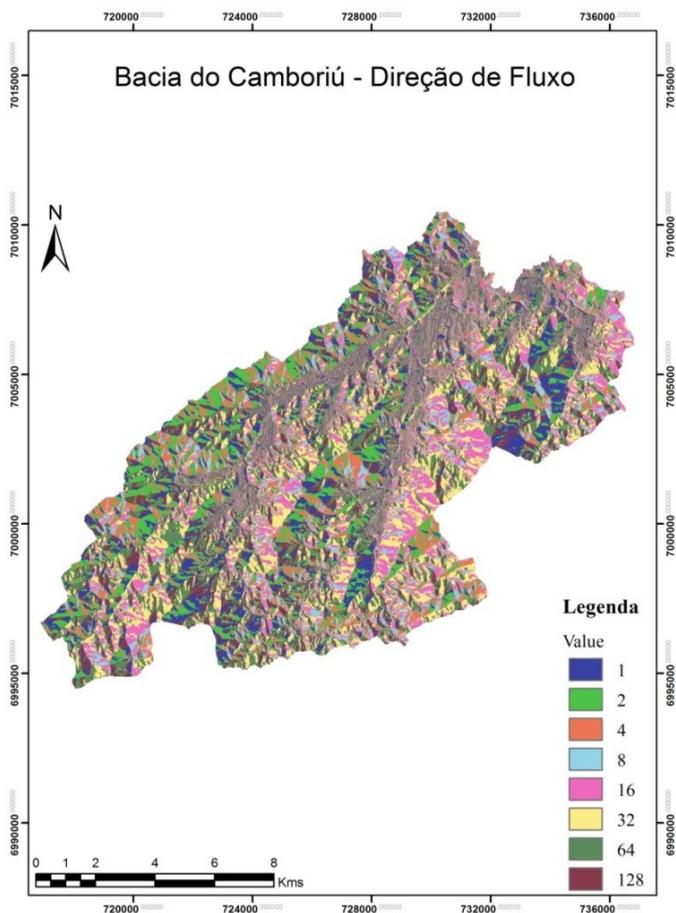


Fonte: Autor.

### 5.1.4. Mapa de Direções de Fluxo

No mapa da Figura 29, é mostrado o mapa gerado, que serve de base para obtenção das áreas de contribuição da bacia, sendo que cada direção adotada pelo fluxo é plotada no mapa com uma cor.

**Figura 29** – Mapa de Direções de Fluxo

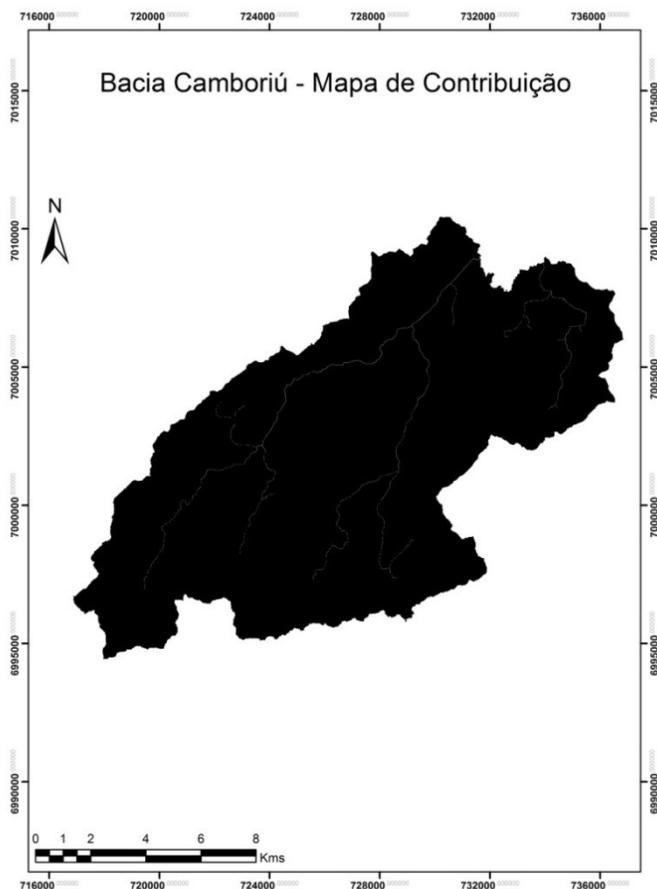


**Fonte:** Autor.

### 5.1.5. Mapa de Contribuição

É a rede de drenagem aplicada para a modelagem no SHALSTAB, como parâmetro hidrológico na análise de suscetibilidade da bacia, e é representado como na Figura 30. Em escala reduzida, a plotagem deste mapa dificulta a visualização dos detalhes.

**Figura 30** – Mapa de Contribuição



Fonte: Autor.

## 5.2. Ensaios

A partir da metodologia, definiu-se 6 pontos de coleta de (Tabela 14). Estes pontos foram escolhidos em função do acesso à coleta de amostras, a fim de que os diversos parâmetros da bacia fossem determinados.

Em cada um dos pontos, foram coletados cerca de 2 kg de amostras deformadas de solos de cada ponto, para realização dos ensaios de caracterização. Além disso, foram moldados 4 corpos de provas quadráticos em moldes metálicos para realização do ensaio de cisalhamento direto. Para todas as coletas, tomou-se cuidado para preservar a integridade e umidade das amostras, para que fossem posteriormente realizados os ensaios no Laboratório de Mecânica dos Solos da UFSC. Procurou-se fazer a retirada das amostras em horizonte C.

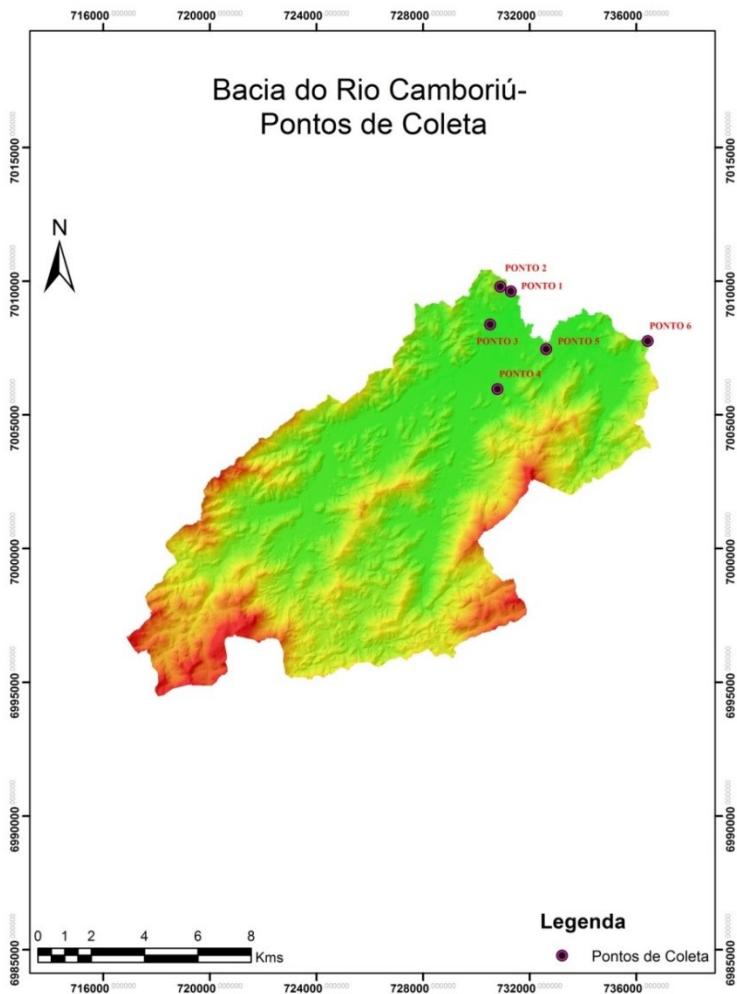
A Tabela 14 e a Figura 31 indicam o posicionamento da coleta de amostras na bacia de estudo.

**Tabela 14** – Coordenadas UTM dos pontos amostrados.

Ponto	Unidade Geotécnica	Leste	Norte
1	Podzólico Vermelho-Amarelo de substrato Xisto	730505	7008379
2	Podzólico Vermelho-Amarelo de substrato Xisto	730889	7009821
3	Podzólico Vermelho-Amarelo de substrato Xisto	731285	7009636
4	Glei de Substrato de Sedimentos Quaternários	730770	7005958
5	Podzólico Vermelho-Amarelo de substrato granito	732622	7007457
6	Cambissolo de Substrato Gnaisse	736445	7007784

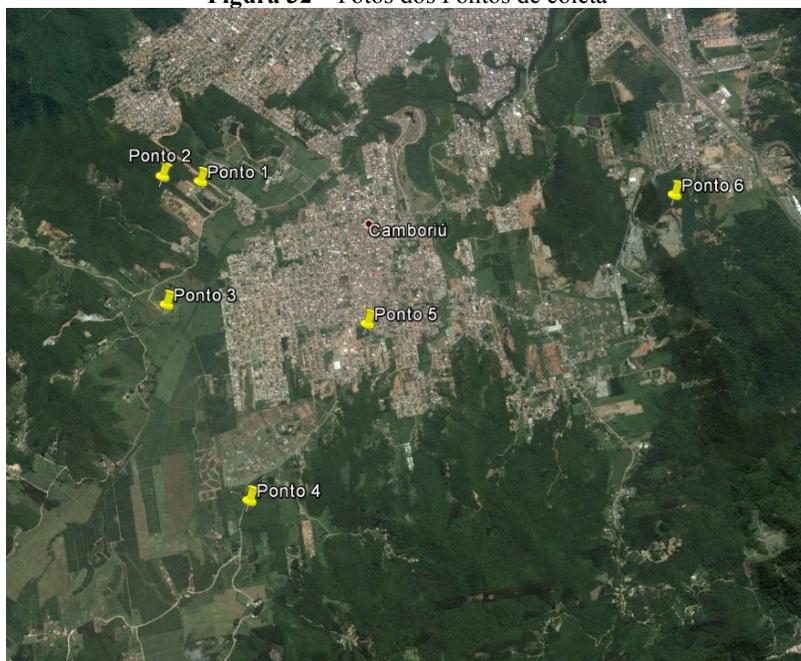
**Fonte:** Autor.

**Figura 31** – Pontos de coleta na Bacia com projeção das Unidades Geotécnicas e relevo.



Fonte: Autor.

**Figura 32 – Fotos dos Pontos de coleta**



**Fonte:** Google Earth.

**Figura 33 – Talude de Coleta do Ponto 1 e Ponto 2, respectivamente.**



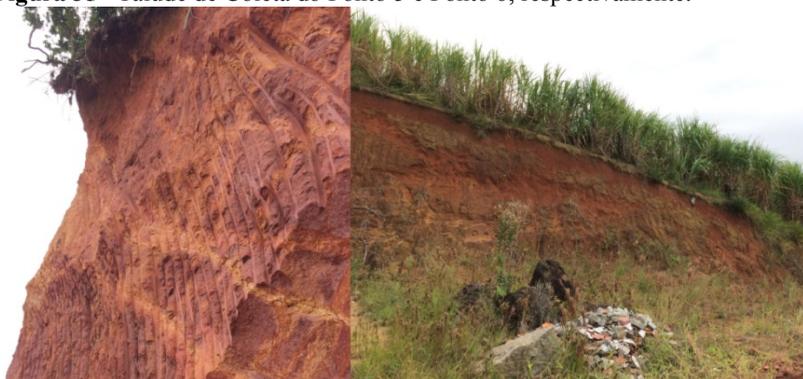
**Fonte:** Autor.

**Figura 34** – Talude de Coleta do Ponto 3 e Ponto 4, respectivamente.



**Fonte:** Autor.

**Figura 35**– Talude de Coleta do Ponto 5 e Ponto 6, respectivamente.



**Fonte:** Autor.

Os pontos 1, 2 e 3 apesar de pertencerem a mesmas unidades e cota aproximada, apresentaram diferenças notáveis em sua constituição. Este fator foi creditado principalmente à característica anisotrópica desta unidade neste horizonte, fato que será discorrido nas próximas secções.

### 5.2.1. Caracterização das Amostras

A Tabela 15 apresenta os resultados dos ensaios, seguidos de análises.

**Tabela 15** – Resultados dos Ensaios de Caracterização dos solos da bacia

<b>Amostra</b>	<b>Y<sub>nat</sub> (kN/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Umidade Nat (%)</b>	<b>δ (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>LL (%)</b>	<b>LP(%)</b>	<b>IP(%)</b>	<b>MCT</b>
<b>Ponto 1</b>	1.58	27.78	2.53	40	35	5	NS'-NG'
<b>Ponto 2</b>	1.36	28.08	2.55	51	41	10	NS'/NA'
<b>Ponto 3</b>	1.40	30.56	2.60	33	27	6	NS'/NA'
<b>Ponto 4</b>	1.51	15.56	2.63	32	22	10	NS'-NA'
<b>Ponto 5</b>	1.54	28.93	2.67	44	30	14	NS'/NA'
<b>Ponto 6</b>	1.47	9.74	2.61	NP	NP	NP	NS'-NA'

\*δ (massa específica real), LL (limite de liquidez), LP (limite de plasticidade), NP (não plástico)

**Fonte:** Autor

#### 5.2.1.1. Classificação Granulométrica

Na Tabela 16, são apresentados os resultados da análise granulométrica dos solos da bacia em estudo.

**Tabela 16** – Resultados da Classificação Granulométrica

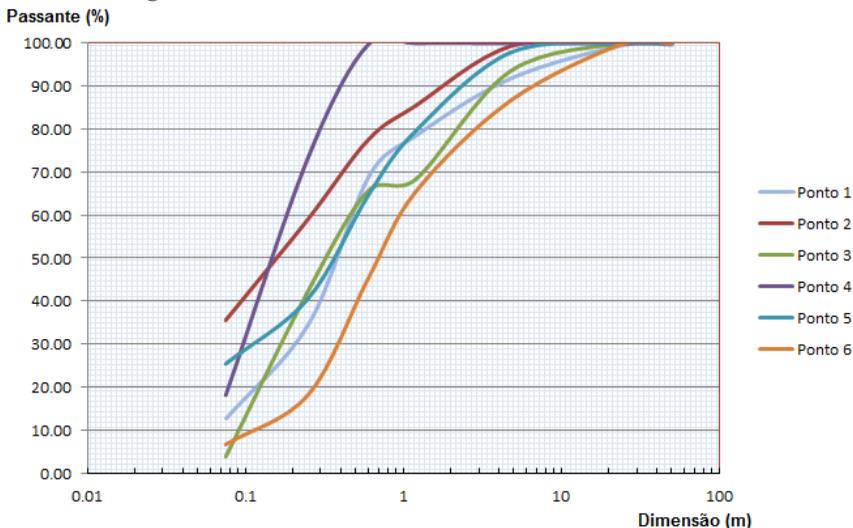
<b>Amostra</b>	<b>Argila + Silte</b>	<b>Areia Fina</b>	<b>Areia Média</b>	<b>Areia Grossa</b>	<b>Ped. Fino</b>	<b>Ped. Médio</b>	<b>Ped. Grosso</b>
<b>Ponto 1</b>	13.11	22.02	34.26	9.59	13.31	7.76	0.00
<b>Ponto 2</b>	35.53	23.62	18.40	7.96	13.81	1.05	0.00
<b>Ponto 3</b>	3.80	38.63	23.25	2.68	25.23	6.90	0.00
<b>Ponto 4</b>	18.07	55.43	26.16	0.56	0.00	0.00	0.00
<b>Ponto 5</b>	25.38	15.23	24.02	15.01	18.23	1.86	0.00
<b>Ponto 6</b>	6.61	11.62	27.08	20.18	21.22	12.58	0.00

**Fonte:** Autor.

Analisando os dados, pode-se perceber que com exceção dos solos do ponto 2 e ponto 5, que indicam solos argilo-siltosos, os outros pontos tem comportamento arenoso, o que vai ser reforçado pela baixa

coesão encontrada nestes pontos, nos ensaios de cisalhamento direto. A Figura 36 mostra a classificação granulométrica dos solos amostrados.

**Figura 36** – Pontos de coleta na Bacia do Rio Camboriú



Fonte: Autor.

### 5.2.1.2. Classificação MCT

Nesta análise de resultados é importante lembrar que se devem tomar os dados apresentados como estimativas, uma vez que se tratam somente dos resultados alcançados pelo método expedito das pastilhas e não pela metodologia como um todo.

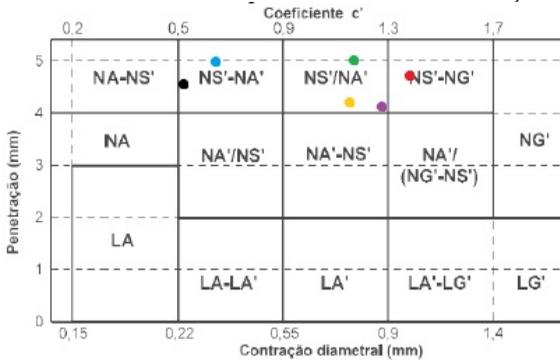
A Tabela 17 apresenta os resultados encontrados no ensaio, seguidos da classificação encontrada pelo método expedito das pastilhas.

**Figura 37** – Amostras dos Pontos 1 e 2 no processo de reabsorção de água



**Fonte:** Autor.

**Tabela 17** – Resultados dos ensaios da classificação MCT.



Amostra	Contração	Penetração	Classificação
Ponto 1	0,97	4,75	NS'-NG'
Ponto 2	0,73	4,20	NS'/NA'
Ponto 3	0,77	5,0	NS'/NA'
Ponto 4	0,35	5,0	NS'-NA'
Ponto 5	0,87	4,13	NS'/NA'
Ponto 6	0,23	4,66	NS'-NA'

**Fonte:** Autor.

Os resultados do MCT apontam para solos predominantemente não lateríticos, nos taludes estudados. Resultados estes, que ficam mais evidentes quando observada a Tabela 18, da análise da imersão em água, onde o comportamento altamente reativo das esferas a água revelam solos com pouca coesão, também evidenciado pela granulometria onde se notou solos mais arenosos, e apontado Godoy (1997), como comportamento de solos pouco lateríticos.

**Tabela 18** – Observações MCT.

<b>P1</b>	Após a reabsorção o solo voltou as dimensões originais e apresentou leve inchamento.
	A esfera se desagregou rapidamente, e as partículas podem ser identificadas.
	A esfera submetida ao esmagamento não se quebrou.
<b>P2</b>	Após a reabsorção o solo voltou as dimensões originais e apresentou leve inchamento.
	A esfera se desagregou rapidamente, e as partículas podem ser identificadas.
	A esfera submetida ao esmagamento se quebrou sob a pressão dos dedos.
<b>P3</b>	Após a reabsorção o solo voltou as dimensões originais.
	A esfera se desagregou rapidamente, e as partículas podem ser identificadas.
	A esfera submetida ao esmagamento se quebrou sob a pressão do dedo polegar e a superfície plana.
<b>P4</b>	Após a reabsorção o solo voltou as dimensões originais e apresentou leve inchamento.
	A esfera se desagregou rapidamente, e as partículas podem ser identificadas.
	A esfera submetida ao esmagamento se quebrou sob a pressão dos dedos.
<b>P5</b>	Após a reabsorção o solo voltou as dimensões originais e apresentou leve inchamento.
	A esfera se desagregou rapidamente, e as partículas podem ser identificadas.
	A esfera submetida ao esmagamento se quebrou sob a pressão dos dedos.
<b>P6</b>	Após a reabsorção o solo voltou as dimensões originais.
	A esfera se desagregou rapidamente, e as partículas podem ser identificadas.
	A esfera submetida ao esmagamento não se quebrou.

**Fonte:** Autor.

### 5.2.1.3. Limites de Atterberg

Na Tabela 19, os resultados dos limites de consistência de Atterberg.

**Tabela 19 – Limites de Atterberg**

<b>Índices de Plasticidade</b>			
<b>Amostras</b>	<b>LL (%)</b>	<b>LP (%)</b>	<b>IP (%)</b>
<b>Ponto 1</b>	40	35	5
<b>Ponto 2</b>	34	24	10
<b>Ponto 3</b>	33	27	6
<b>Ponto 4</b>	32	22	10
<b>Ponto 5</b>	44	30	14
<b>Ponto 6</b>	NP	NP	NP

Segundo colocado por Caputo (1988), a classificação de Jenkins indica a plasticidade dos solos através do Índice de Plasticidade (IP), da seguinte forma:

Fracamente plásticas	$1 < IP < 7$
Medianamente plásticas	$1 < IP < 15$
Altamente plásticas	$IP > 15$

A amostra do Ponto 1, segundo a classificação de Jenkins, podem ser ditas fracamente plásticas, o que é suportado pelas propriedades de sua classificação no ensaio MCT. As amostras de solos do Ponto 2, 3, 4 e 5 apresentaram-se medianamente plásticas, quanto ao Ponto 6, não é plástica.

### 5.3. Parâmetros de Resistência

A Tabela 20 mostra os resultados obtidos pelos ensaios de cisalhamento direto nas amostras inundadas dos pontos de coleta da bacia do Rio Camboriú.

**Tabela 20** – Resultados dos ensaios de Cisalhamento Direto

Ponto	Coesão (kN/m <sup>2</sup> )	Ângulo de Atrito (graus)	Y <sub>sat</sub> (kN/m <sup>3</sup> )	Y <sub>nat</sub> (kN/m <sup>3</sup> )	Umidade (%)	Unidade
1	0	17.1	1.92	1.55	27.78	PV <sub>x</sub>
2	19.2	28.1	1.67	1.36	28.08	PV <sub>x</sub>
3	4.8	24.5	1.68	1.40	30.56	PV <sub>x</sub>
4	3.4	35.3	1.85	1.51	15.56	Gesq
5	36	20.2	1.72	1.61	28.93	PV <sub>g</sub>
6	10.9	34.2	1.63	1.47	9.74	Cgn

**Fonte:** Autor.

Analisando a origem predominante dos solos da região, já era esperado encontrar solos com valores de coesão baixos e médios, visto que grande parte da bacia possui uma interface de solos residuais de origem granítica.

Quanto ao ponto 4, o solo foi identificado inicialmente como Gleissolo. Porém, ao analisar os resultados com a pedologia e geologia da área, notou-se a presença de solos residuais na parte plana da bacia, com solos de características mais arenosas, e não argilosas, como indica a Figura 38, onde é notável a presença de solo granular.

**Figura 38** – Ponto de retirada de coleta da amostra 4

**Fonte:** Autor.

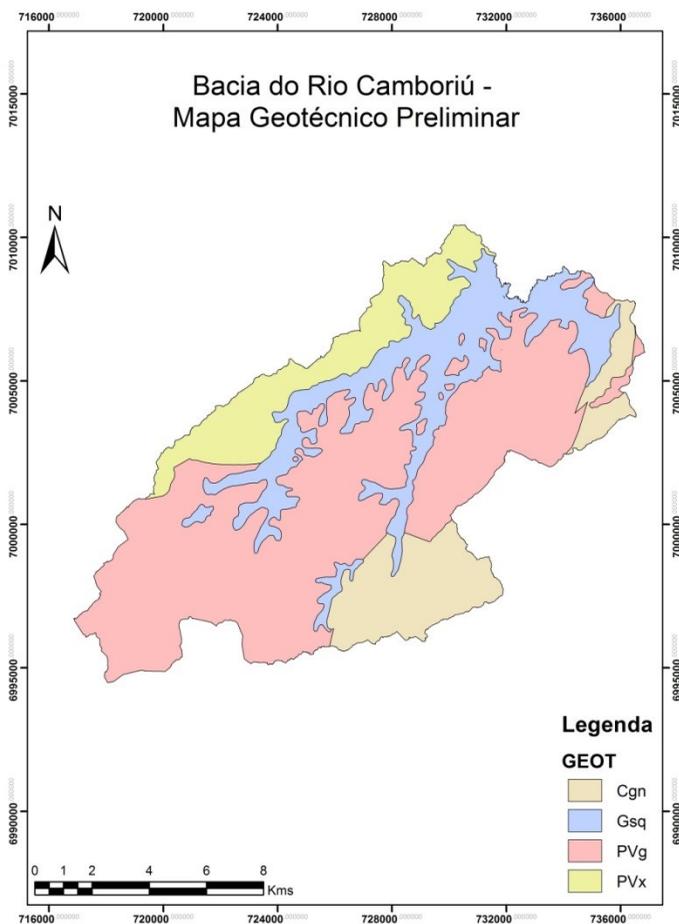
Como o Ponto 4 se encontra em uma região inteiramente sem encostas, optou-se por não realizar mais amostras, devido ao tempo hábil para realização da pesquisa, uma vez que não haverá suscetibilidade a deslizamentos na área plana.

No que se diz respeito à variabilidade dos resultados, foi considerada a anisotropia de solos desta origem em relação ao intemperismo sofrido. Fatores como declividade, a cota de retirada das amostras, são relevantes no nível de intemperismo e até na quantidade de material fino presentes na rocha, influenciando nos resultados mecânicos.

## 5.4. Mapeamento Geotécnico

O mapa geotécnico foi gerado, seguindo a metodologia de Davison Dias (1995) e representado na Figura 39.

**Figura 39** – Mapa Geotécnico preliminar do Município



Fonte: Autor.

A quantificação das áreas de cada unidade pode ser visualizada na Tabela 21.

**Tabela 21** – Simbologia e Áreas das unidades da Bacia.

<b>Unidade</b>	<b>Abrev.</b>	<b>Área (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Porcentagem</b>
Podzólico Vermelho-Amarelo de substrato Xisto	PVx	20,78	12,93
Glei de Substrato de Sedimentos Quaternários	Gesq	30,92	19,25
Podzólico Vermelho-Amarelo de substrato Granito	PVg	88,24	54,93
Cambissolo de substrato Gnaisse	Cgn	20,70	12,88
	Total	160,64	100,00

**Fonte:** Autor.

É necessária verificação da unidade de Glei de Substrato de Sedimentos Quaternários, uma vez encontrada inconsistências entre o indicado pelo mapa geotécnico e as caracterizações realizadas no ponto coletado.

Nas seções a seguir, serão apresentadas algumas observações de cada uma das unidades identificadas na bacia, com breve descrição, embasada nos trabalhos de Santos (1997).

#### **5.4.1. Podzólico Vermelho-Amarelo de substrato Xisto**

Os solos dessa unidade apresentam uma grande variação de textura, como observado pelos ensaios granulométricos nos pontos da unidade. Ocorrem variações nos horizontes, sendo encontrados núcleos de resistência mediana, dependendo do início do processo de intemperismo segundo os planos de falhas da rocha. Nesse horizonte os planos de argilização ficam preservados e interferem na estabilidade dos taludes.

Apresenta horizonte C, quando exposto no estado natural, muito erodível, constituindo um material de textura bastante grosseira e sem muita coesão. No horizonte B, que se apresenta mais evoluído, o teor de argila vai aumentando, e com isso, maior resistência a erodibilidade.

Na bacia, a unidade geotécnica está localizada em uma faixa muito íngreme de relevo, desde montanhoso até escarpado, como mostrado na Figura 40.

**Figura 40 - Declividade na Unidade PVx**

**Legenda**

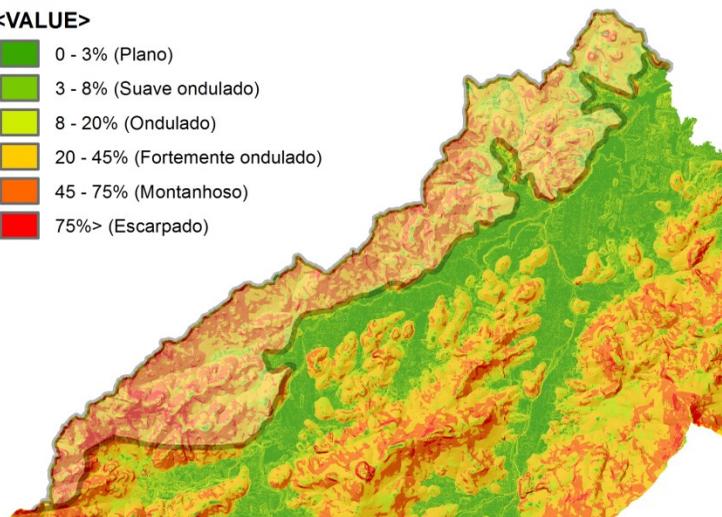
**GEOT**

 PVx

**Mapa de Declividades**

**<VALUE>**

-  0 - 3% (Plano)
-  3 - 8% (Suave ondulado)
-  8 - 20% (Ondulado)
-  20 - 45% (Fortemente ondulado)
-  45 - 75% (Montanhoso)
-  75%> (Escarpado)



**Fonte:** Autor.

#### **5.4.2. Glei de Substrato de Sedimentos Quaternários**

O termo Glei indica intensa redução de ferro durante o desenvolvimento do solo em condições de má drenagem ou alagamento.

As cores destes solos na bacia de estudo são próximas às neutras (cinzas e pretas), correspondendo à ausência de ferro e podem apresentar-se com mosqueados ou não.

São solos mal ou muito mal drenados, com forte gleização. Na bacia de estudo são desenvolvidos nas áreas de várzeas, áreas deprimidas, planícies aluviais, locais de terras baixas, ou seja, estão normalmente vinculadas ao excesso de água.

Este tipo de solo corresponde às clássicas argilas moles (hidromórficas ou não) estudadas pela geotecnia. O horizonte A desta

unidade é escuro e relativamente espesso, enquanto que o horizonte Glei, que ocorre abaixo do horizonte A, apresenta uma camada de cor acinzentada, ou variegada, com ou sem mosqueado.

De uma forma geral, esta unidade apresenta elevada deformação (por adensamento) e baixa resistência ao cisalhamento quando solicitada por esforços mecânicos.

Na bacia, encontra-se na planície, acompanhando a rede de drenagem, como apresentado na Figura 41.

**Figura 41** - Declividade na Unidade Gesq

**Legenda**

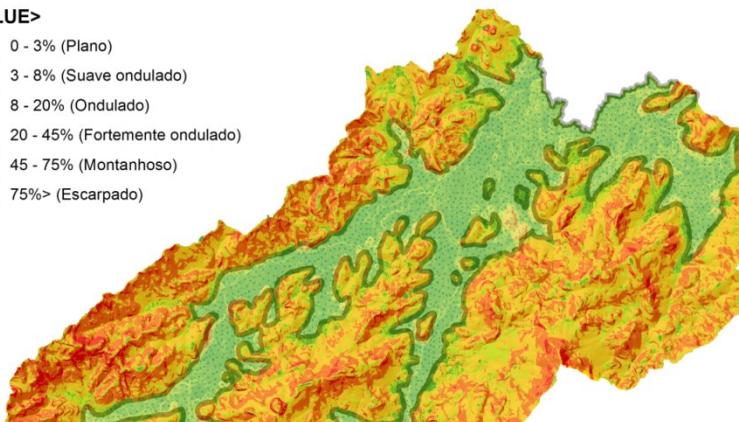
**GEOT**

 Gsq

**Mapa de Declividades**

**<VALUE>**

-  0 - 3% (Plano)
-  3 - 8% (Suave ondulado)
-  8 - 20% (Ondulado)
-  20 - 45% (Fortemente ondulado)
-  45 - 75% (Montanhoso)
-  75%> (Escarpado)



**Fonte:** Autor.

A ocupação dessas áreas deve ser criteriosa, pois nesses locais podem surgir intercalações de camadas silto-argilosas com camadas arenosas, ocorrendo, frequentemente níveis de solos orgânicos de baixa capacidade de suporte ( $N_{spt} < 4$ ) entre as mesmas.

Para o uso e ocupação desta unidade sugere-se que para estimar os recalques dos aterros e fundações de edificações é necessário que, além das sondagens do tipo SPT, sejam executados ensaios de adensamento para a definição dos parâmetros de compressibilidade, sobretudo do coeficiente de compressão, uma vez que esta unidade corresponde a argilas normalmente adensadas (NA), sobretudo nas regiões costeiras do Estado de Santa Catarina (HIGASHI, 2006).

Esta unidade apresenta baixa permeabilidade e nível do lençol freático próximo à superfície (solo saturado). Desta forma, para as cargas da engenharia que solicitam mecanicamente o solo de forma imediata, tal qual aterros rodoviários, deve ser avaliada a resistência não drenada. Sugere-se que os ensaios de compressão triaxial na condição UU (Não consolidado; Não drenado) sejam executados para a determinação dos parâmetros de resistência.

Ressalta-se que caso não seja investigado o solo para a execução de obras de engenharia, é possível que ocorram sérios problemas de rupturas e consideráveis recalques de fundações com retificações extremamente onerosas.

#### **5.4.3. Podzólico Vermelho-Amarelo de substrato Granito**

Os Podzólicos Vermelho-Amarelos de substrato granito são característicos de regiões de clima úmido, com perfis bem desenvolvidos, profundidade mediana, moderadamente ou bem intemperizados. Esta unidade apresenta um horizonte A inferior a 50 cm, um horizonte B de cores vermelhas com aproximadamente 1m de espessura, mais argiloso que o horizonte A, e um horizonte C granular, podendo alcançar até 30m de espessura.

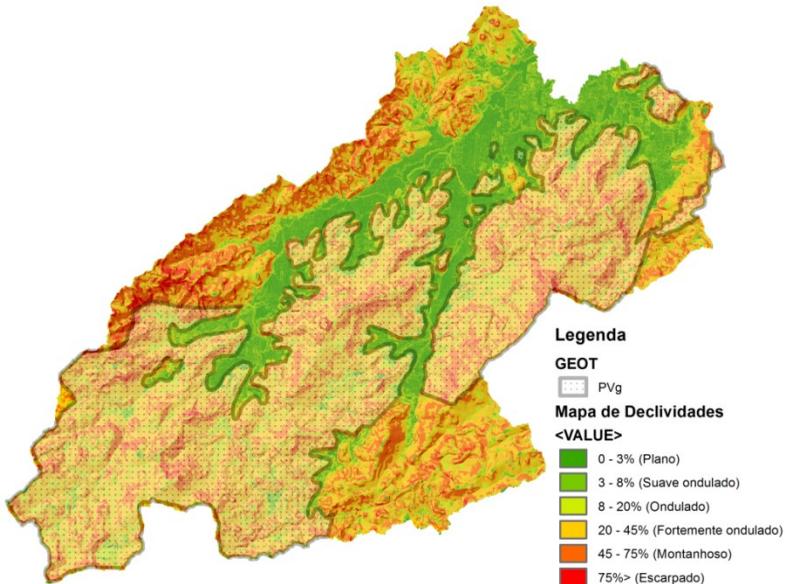
O teor de argila presente em seu horizonte B (de cor vermelha ou vermelho-amarelada), normalmente, é bem maior do que a quantidade deste material localizada no horizonte A.

O comportamento mecânico do horizonte C (saprolítico) desta unidade guarda a estrutura da rocha de origem, com presença de matações (intemperismo esferoidal), e apresenta um comportamento variável em função do grau de intemperismo dos minerais primários presentes no horizonte C.

Estes horizontes (B e C), em geral, são parcialmente saturados e bem drenados.

Na bacia aparece em altitudes mais elevadas, em uma ampla faixa de declividades, como mostrado na Figura 42.

**Figura 42 - Declividade na Unidade PVg**



**Fonte:** Autor.

No que diz respeito ao uso e ocupação por fundações superficiais de edificações, estas devem ser assentadas após o horizonte B, e assim contar com maior resistência e menor compressibilidade.

Uma característica importante dos solos da unidade PVg é a redução da resistência ao cisalhamento com a inundação. Este solo apresenta significativa perda de coesão com a variação do grau de saturação, independente do substrato e do horizonte (B ou C). Essa redução, notada para a coesão do solo, é observada em muito menor escala no ângulo de atrito interno, que, algumas vezes, eleva seu valor.

O horizonte C é muito suscetível à erosão. Desta forma, é importante manter o horizonte A e B dos solos em obras de engenharia que envolvam grande movimentação de terra.

Devido à anisotropia, típica do horizonte C deste tipo de unidade, ocorre a grande dispersão dos resultados de ensaios geotécnicos. Mesmo no horizonte B, a variação da textura interna desta camada de solo também é responsável pela variabilidade dos resultados.

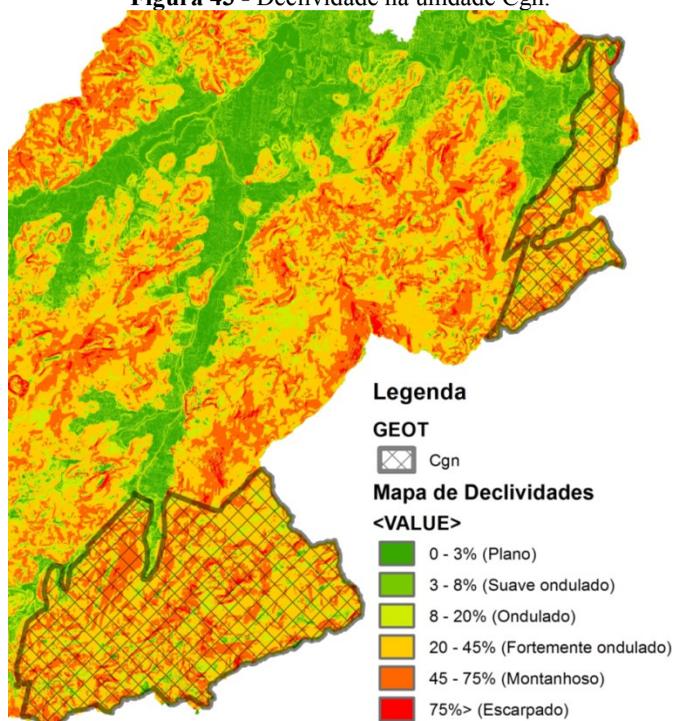
Nos locais onde ocorrem diques de diabásio, as espessuras de solo são maiores e o horizonte C, dependendo do grau de alteração, pode

ser expansivo. O solo de alteração de diabásio pode ocorrer dentro dos maciços rochosos, ou abaixo de corpos graníticos de grandes dimensões, trazendo sérios problemas geotécnicos para obras de engenharia. Os movimentos de massa que ocorrem nesta unidade, geralmente estão associados aos diques de diabásio.

#### 5.4.4. Cambissolo de substrato Gnaisses e Migmatitos

A unidade Cgn é composta por solos com horizonte B incipiente e com origem de gnaisse e migmatitos. Apresentam todas as seqüências de horizontes de espessura variável. Na bacia encontra-se em relevo acidentado, variando do ondulado a escarpado, como representado na Figura 43.

**Figura 43 - Declividade na unidade Cgn.**



**Fonte:** Autor.

Os horizontes RA (rocha alterada) e R (rocha sã) deste tipo de solo apresentam elevada resistência. A execução de cortes e a solitação mecânica nestes horizontes devem estar condicionadas às fraturas e falhas geológicas que poderiam proporcionar algum tipo de plano de fraqueza.

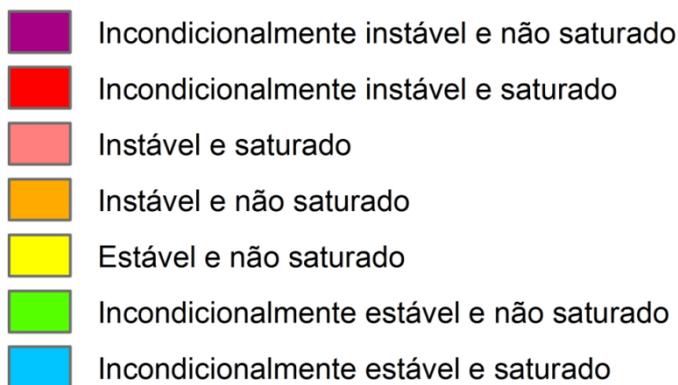
### 5.5. Mapa de Suscetibilidade a Deslizamentos Rasos – Modelagem SHALSTAB

Para o mapeamento das áreas de instabilidade, utilizou-se o modelo SHALSTAB por meio do algoritmo de Michel (2013). Com isso, foi possível considerar espacialmente os diferentes parâmetros geotécnicos de cada unidade para iteração no modelo de suscetibilidade.

Cada parâmetro da equação do modelo deve estar contido em um dado *raster* de mesma dimensão do mapa de declividades em graus, gerando mapas de coesão estimada, ângulo de atrito interno, massa específica natural e saturada, apresentados nas figuras 45, 46, 47 e 48.

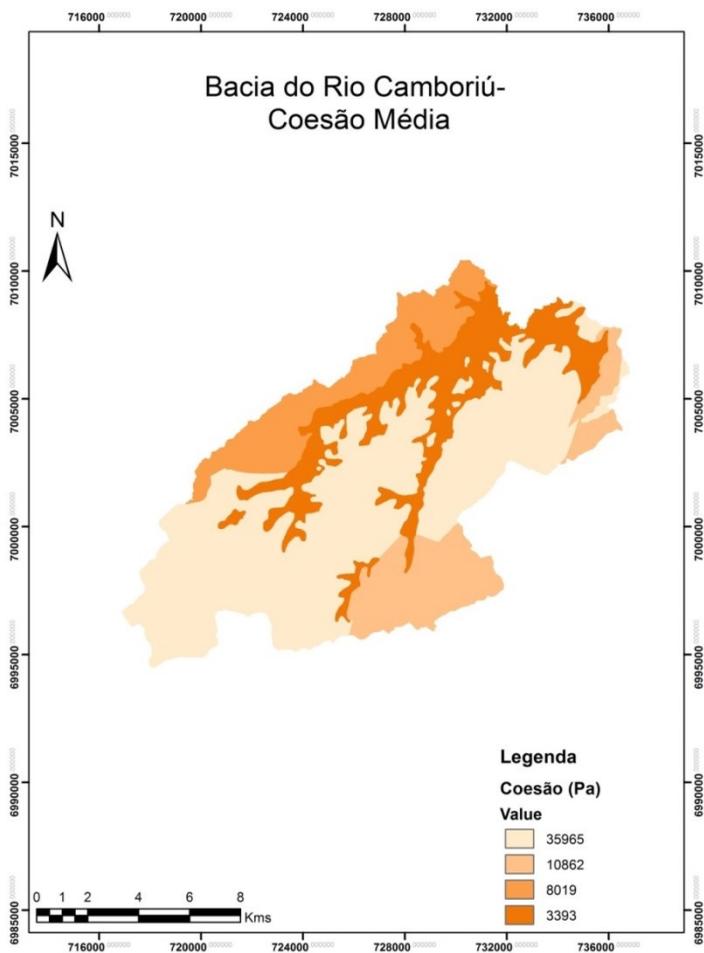
As 7 classes de estabilidade foram representadas nos mapas em diferentes classes de cores, como mostra a Figura 44.

**Figura 44** – Classes de estabilidade



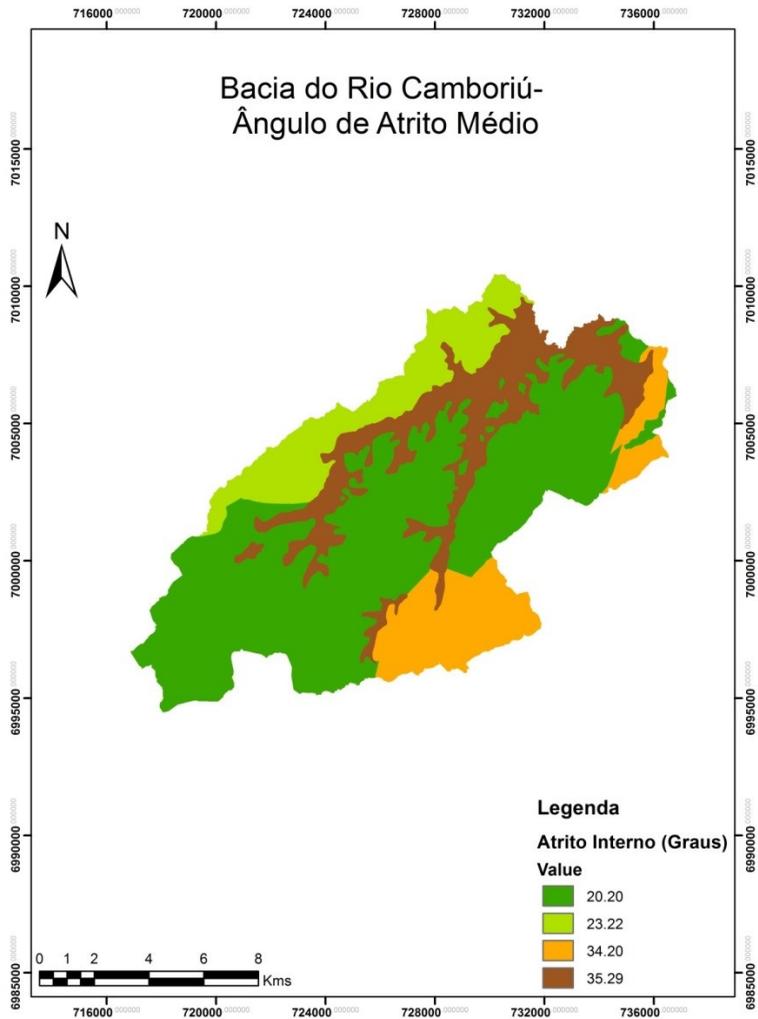
**Fonte:** Autor.

Figura 45 – Coesão média das Unidades da Bacia.



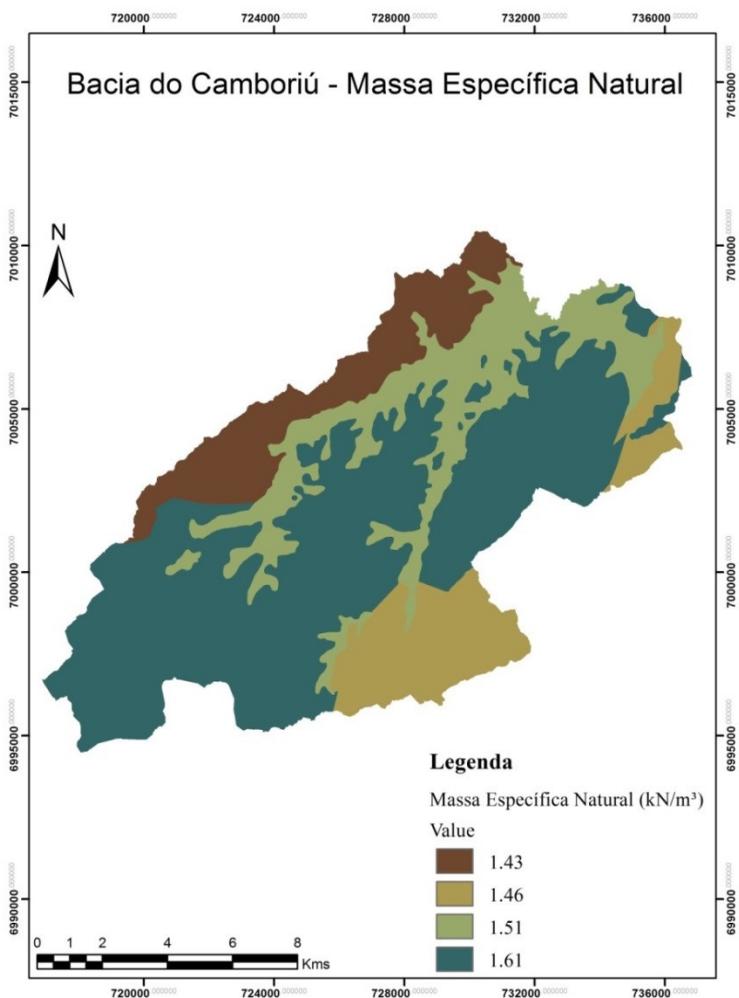
Fonte: Autor.

**Figura 46** – Ângulo de Atrito Interno médio das unidades da Bacia.



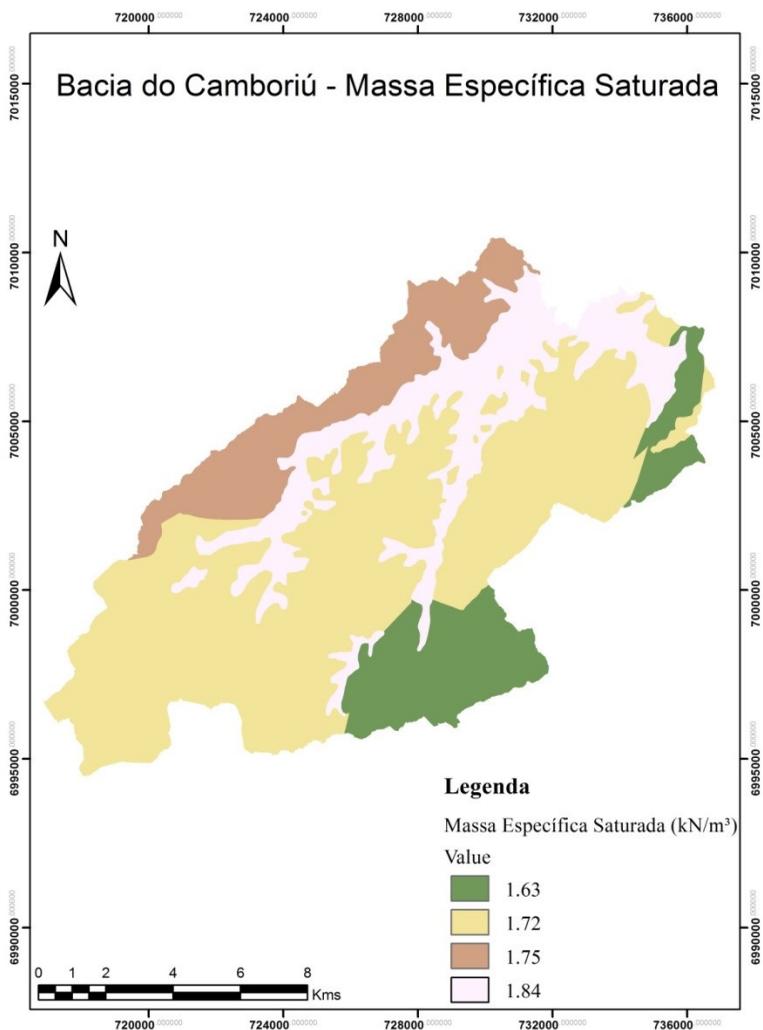
**Fonte:** Autor.

**Figura 47** – Massa Específica Natural das unidades da Bacia.



**Fonte:** Autor.

**Figura 48** - Massa Específica Saturada das unidades da Bacia.



**Fonte:** Autor.

Os cenários de suscetibilidade e parâmetros geotécnicos utilizados estão exemplificados na Tabela 22.

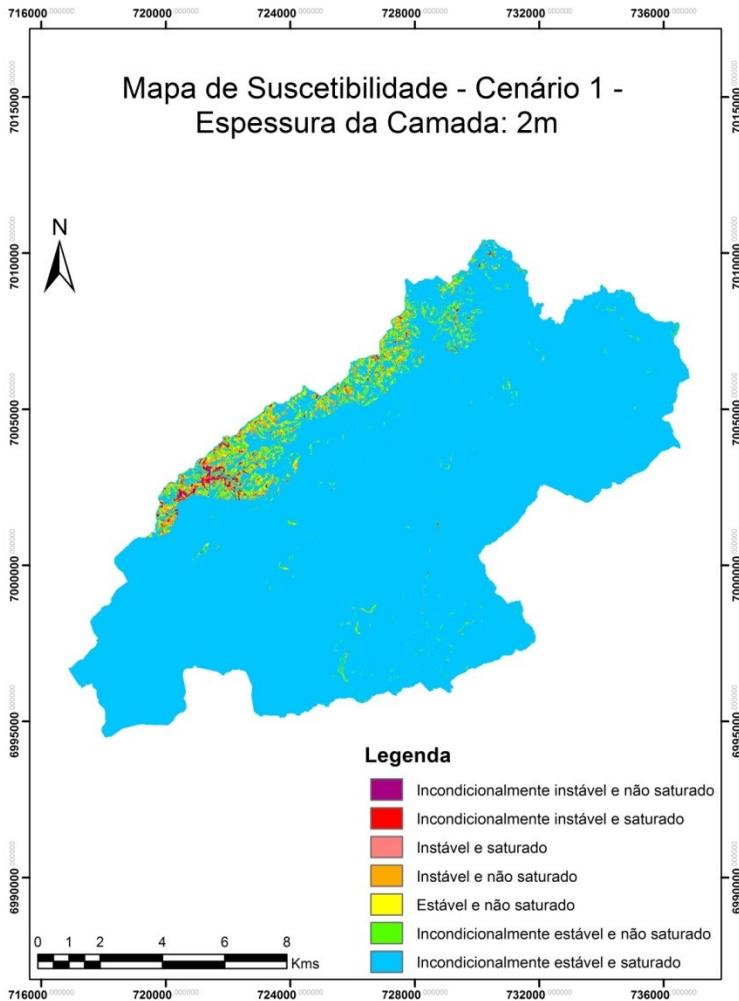
**Tabela 22** – Definição dos Cenários de Suscetibilidade

<b>Cenário</b>	<b>Profundidade (m)</b>	<b>Peso Específico (<math>\gamma</math>)</b>
1	2	$\gamma_{sat}$
2	5	$\gamma_{sat}$
3	10	$\gamma_{sat}$

Fonte: **Autor**.

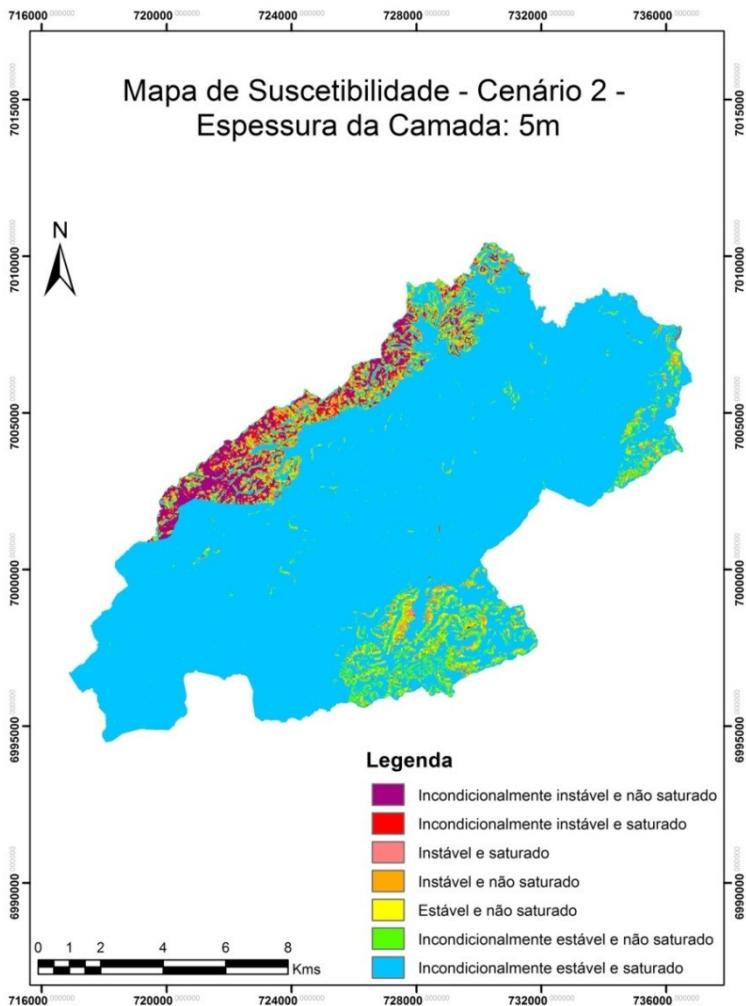
Foram utilizados em todos os cenários, o peso específico saturado do solo, a fim de gerar as piores condições naturais possíveis, e também, por levar em conta que a maior parte da bacia é constituída de unidades podzólicas, as quais tem característica de perder estabilidade quando inundadas.

**Figura 49** – Cenário 1 – Mapa de Suscetibilidade a deslizamentos rasos com espessura de camada de 2m e peso específica saturado do solo.



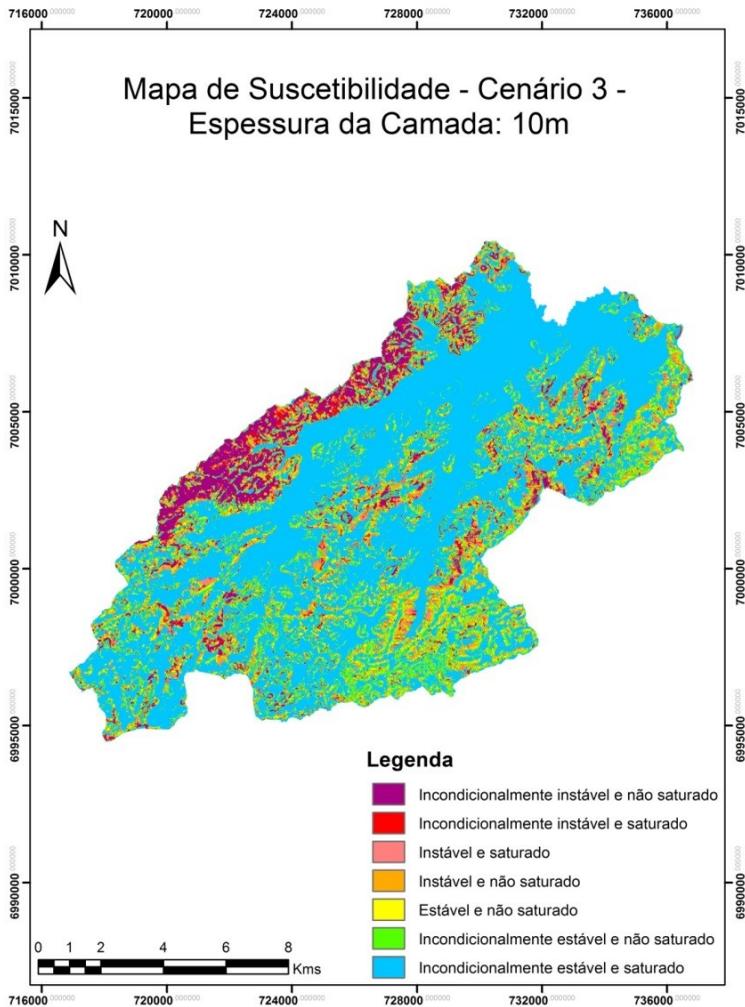
**Fonte:** Autor.

**Figura 50** – Cenário 2 – Mapa de Suscetibilidade a deslizamentos rasos com espessura de camada de 5m e peso específica saturado do solo.



Fonte: Autor.

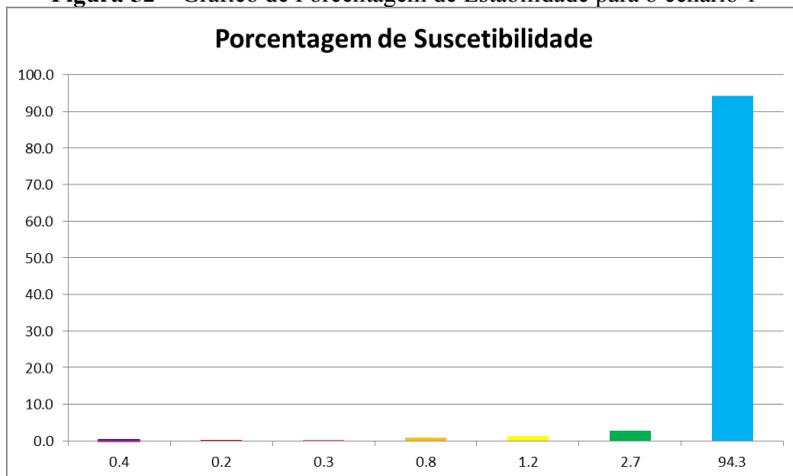
**Figura 51** – Cenário 3 – Mapa de Suscetibilidade a deslizamentos rasos com espessura de camada de 10m e peso específica saturado do solo.



Fonte: Autor.

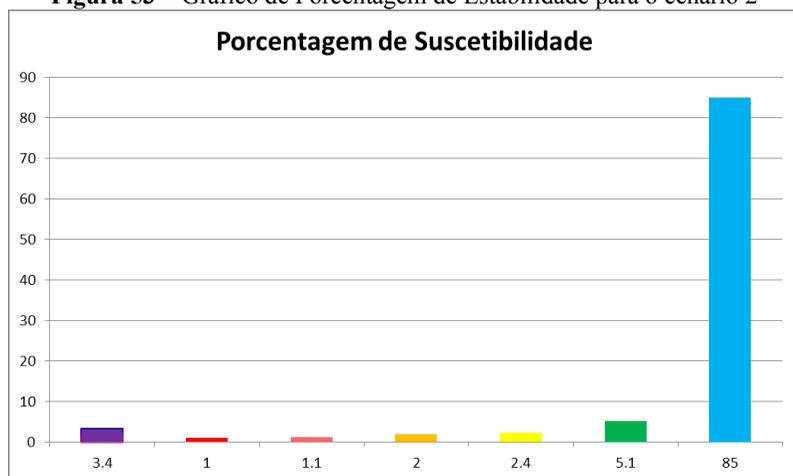
É possível a partir dos mapas de suscetibilidades gerados, quantificar a porcentagem de cada nível de estabilidade em relação ao total em área da bacia, como apresentado nas Figuras 52,53 e 54, para os diferentes cenários.

**Figura 52** – Gráfico de Porcentagem de Estabilidade para o cenário 1



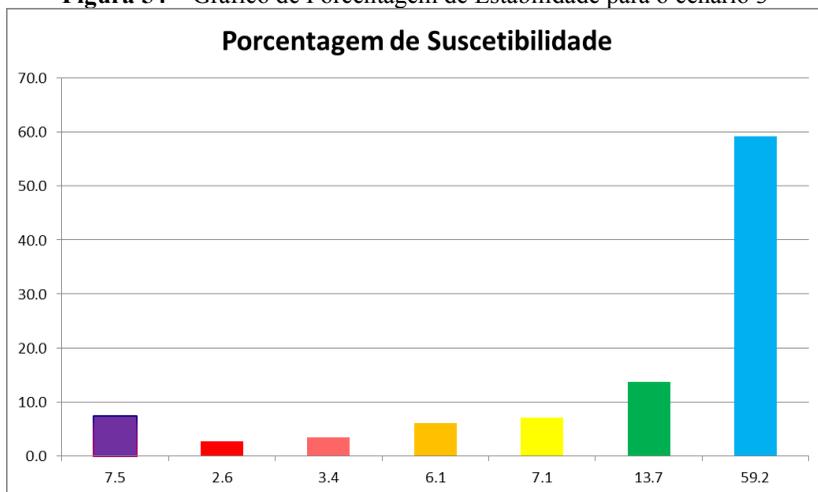
Fonte: Autor.

**Figura 53** – Gráfico de Porcentagem de Estabilidade para o cenário 2



Fonte: Autor.

**Figura 54** – Gráfico de Porcentagem de Estabilidade para o cenário 3



**Fonte:** Autor.

Com base nos cenários criados e comparando com o mapa de declividades, observa-se que as áreas mais instáveis estão correlacionadas as maiores declividades.

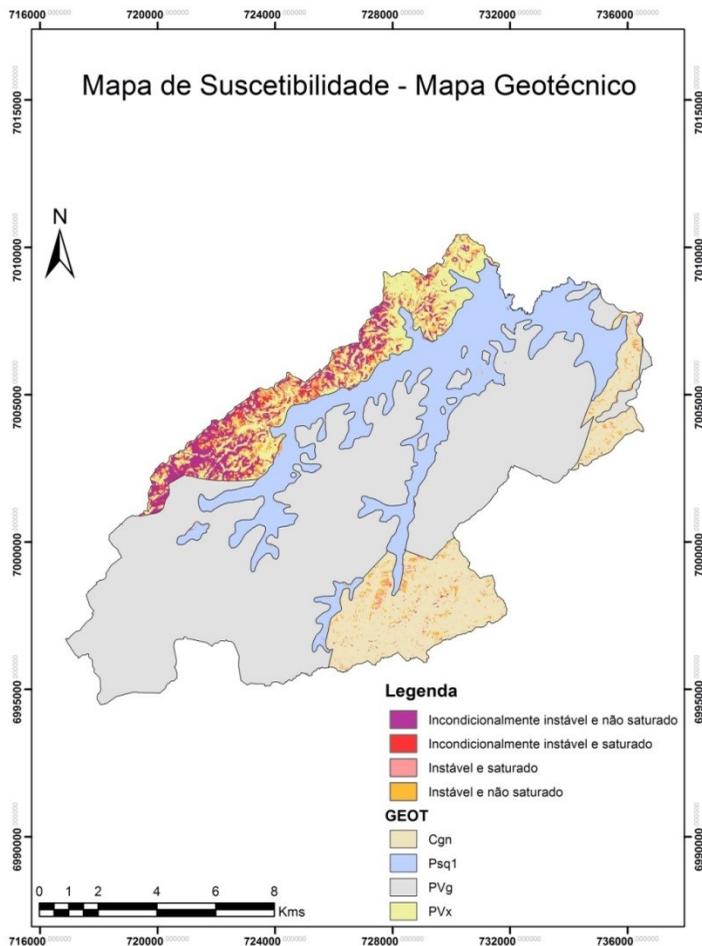
Analisando do ponto de vista das unidades geotécnicas, notamos que os Podzólicos Vermelho-Amarelo de substrato Xisto (PVx) são afetados desde o primeiro cenário, visto que além da declividade elevada neste ponto, a coesão alcançada nos ensaios foi baixa, tornando a região bastante instável. A segunda unidade mais afetada é o Cambissolo de substrato Gnaisse (Cgn), que normalmente é encontrado em regiões de declividade médio-alta, devido ao gnaisse ser de fácil intemperização e muito erodível.

A unidade predominante na bacia, o Podzólico Vermelho-Amarelo de substrato Granito (PVg), mostrou-se bem estável nos cenários criados, creditado a alta coesão encontrada nos ensaios, combinada a um relevo mais suave, sem muitas regiões montanhosas ou escarpadas.

Já no Gleite de substrato de sedimentos quaternários, apesar das inconsistências encontradas no valor de coesão do solo amostrado, a unidade mostrou pouca ou nenhuma suscetibilidade a deslizamentos rasos, por estar quase completamente em planície. No entanto, deve-se atentar que o modelo simula o início do deslizamento, e não prevê futuros danos que um deslizamento próximo possa causar em uma área estável, como corridas de detritos das encostas vizinhas, por exemplo.

Para melhor visualização das análises feitas, foi feita a sobreposição do mapa geotécnico com o mapa do cenário 2, filtrando as classes de instabilidade presentes nele (Figura 55).

**Figura 55** – Sobreposição do Mapa Geotécnica / Mapa de Suscetibilidade do Cenário 2.



Fonte: Autor.

## 6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

### 6.1. Conclusões

Após extensa pesquisa bibliográfica, procedimentos metodológicos e resultados obtidos, pode-se considerar que os objetivos da pesquisa foram obtidos de forma consistente.

A unidade Geotécnica com maior área na Bacia do Rio Camboriú foi a de Podzólico Vermelho-Amarelo substrato de granito (PVg), com 88,24 km<sup>2</sup>, cerca de 55% da área total da bacia.

Os resultados encontrados nos ensaios de caracterização foram satisfatórios, condizendo com os intervalos encontrados na bibliografia, com exceção da unidade de Glei de Substrato de Sedimentos Quaternários, que mostrou inconsistências.

Em relação ao ensaio MCT, realizado através do ensaio expedito das pastilhas, classificou os pontos com comportamento não laterítico, o que é suportado pelos resultados granulométricos, que apontaram em sua maioria solos arenosos, que possuem comportamento pouco laterítico, segundo Godoy (1997) apud Higashi (2006).

Nas análises granulométricas, encontrou-se uma variedade textural grande nos solos, o que é característica forte das unidades de Podzólico, predominante na bacia. Além disso, nos ensaios de caracterização os solos da bacia se mostraram em sua maioria com plasticidade mediana, e suscetibilidade alta a erosão.

Os resultados de cisalhamento direto se mostraram bem condizentes com a classificação granulométrica das amostras, lembrando sempre que a cota de coleta dos pontos influencia diretamente nos valores de coesão encontrados, devido à alta propensão a intemperismo nas principais unidades geológicas desta bacia.

Com o banco de dados de parâmetros geotécnicos devidamente georreferenciados nas unidades, foi possível atingir o objetivo de mapear as áreas de risco a deslizamentos rasos da bacia do Rio Camboriú. Para isto, foi utilizado o modelo *SHALSTAB*, de Dietrich e Montgomery (1998), através do algoritmo proposto por Michel (2013), possibilitando considerar os parâmetros de cada unidade na execução do modelo.

A análise foi realizada considerando diferentes cenários de rompimento, e considerando o pior caso, ou seja, com peso específico saturado.

Os resultados obtidos nos cenários foram considerados sólidos, relacionando as áreas de instabilidade diretamente com a

declividade do terreno. A unidade crítica da bacia é a Podzólico Vermelho-Amarelo de substrato Xisto, combinando declividades elevadas com coesão reduzida.

O mapa geotécnico e o mapa de suscetibilidade surgem como ferramentas de gestão pública, gerando diretrizes para o correto destino do uso e ocupação do solo da região da bacia do Rio Camboriú.

## **6.2. Sugestões para Trabalhos Futuros**

Para trabalhos que venham a ser realizados na mesma área, ou com mesmo embasamento técnico, sugere-se:

- Realizar mais ensaios em mais pontos da bacia, para melhor caracterização da área de estudo;
- Procurar banco de dados de cicatrizes de deslizamentos, para aferir ao mapa de suscetibilidade;
- Realizar estudos de vetores de crescimento da mancha urbana, para relacionar com a ocupação apropriada;
- Procurar softwares que considerem o fluxo de água de forma multidirecional, como o TauDem;
- Procurar referências sobre os parâmetros de coesão das raízes e peso da vegetação, considerados no algoritmo de Michel (2013);

## REFERÊNCIAS

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180: Solo: Determinação do Limite de Plasticidade.** Rio de Janeiro, 1984. 3p.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6508: Grãos de Solos que Passam na Peneira de 4,8mm: Determinação da Massa Específica dos Grãos.** Rio de Janeiro, 1984. 8p.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181: Solo: Análise Granulométrica.** Rio de Janeiro, 1984. 13p.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459: Determinação do Limite de Liquidez: Método de Ensaio.** Rio de Janeiro, 1984. 6p.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR11682: Estabilidade de Taludes.** Rio de Janeiro, 1986. 39p.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457: Amostras de solo - Preparação para Ensaio de Compactação e Ensaio de Caracterização.** Rio de Janeiro, 1986. 9p.

AUGUSTO FILHO, O. **Caracterização geológico-geotécnica voltada à estabilização de encostas: uma proposta metodológica,** In: Conferência brasileira sobre estabilidade de encostas. Anais... Rio de Janeiro, v.2. p. 721-733, 1992.

BASTOS, G. **Estruturação de Banco de Dados a partir do Mapeamento Geotécnico Aplicado à Região de Ribeirão Preto (SP).** Tese de Doutorado em Engenharia – Área Geotecnia. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2005, 306 p.

BRASIL. Ministério das Cidades / Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT. **Mapeamento de Riscos em Encostas e Margem de Rios/** Celso Santos Carvalho, Eduardo Soares de Macedo e Agostinho Tadashi Ogura, organizadores – Brasília: Ministério das Cidades; Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT, 2007. 176 p.

CABALLERO, M. **Evolución Histórica de los Mapas Geotécnicos**. In: BOLETÍN GEOLÓGICO Y MINERO, Espanha, 1973.

CAMARA NETO, G; BARBOSA, C. C. F.; DAVIS, C.; FONSECA, F. **Conceitos Básicos em Geoprocessamento**. In: Geoprocessamento: teorias e aplicações, São José dos Campos: INPE, 2000.

CAPUTO, Homero Pinto. **Mecânica dos solos e suas aplicações: vol. 1 – Fundamentos**. Rio de Janeiro: LTC, 1988.

CAPUTO, Homero Pinto. **Mecânica dos solos e suas aplicações: vol. 2 – Mecânica das rochas**. Rio de Janeiro: LTC, 1987.

CARVALHO, Celso Santos; MACEDO, Eduardo Soares de; OGURA, Agostinho Tadashi (Organizadores). **Mapeamento de riscos em encostas e margem de rios**. Brasília: Ministério das Cidades; IPT, 2007.

CARVALHO, P. R. S. et al. **Análise comparativa de métodos para delimitação automática das sub-bacias do alto curso do Rio Preto**. Espaço & Geografia Vol. 13 N° 2 (2010), 227:307.

CASTRO, Antônio Luiz Coimbra de. **Manual de desastres: desastres naturais**. Brasília: Ministério da Integração Nacional, 2003. 174 p.

CEPED – Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres – UFSC. **Capacitação Básica Em Defesa Civil- Livro Texto para Educação a Distância**. Florianópolis, 2011.

CEPED – Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres – UFSC. **Resposta ao desastre em Santa Catarina no ano de 2008: avaliação das áreas atingidas por movimentos de massa e dos danos em edificações durante o desastre**. Florianópolis, 2009.

CRUDEN, D. M. e VARNES, D. (1996), **Landslide Types and Processes**. In Landslides Investigation and Mitigation. Special Report 247.

DAS, Braja M. **Fundamentos de engenharia geotécnica**. 6 ed. São Paulo: Thomson Learning, 2007.

DAVID, Rodrigo Bortolloto de. **Estudo Preliminar de Zoneamento Ambiental para Ocupação Urbana da Bacia do Rio Ratonés.** (Dissertação de Mestrado – Engenharia Ambiental – UFSC. Florianópolis, 2014).

DAVISON DIAS, R. **Proposta de metodologia de definição de carta geotécnica básica em regiões tropicais e subtropicais.** In: Revista do Instituto Geológico, São Paulo, SP, 1995, p.51-55.

DAVISON DIAS, R. **Proposta de uma metodologia de estudos geotécnicos para implantação de rodovias, estradas rurais e vicinais em solos brasileiros.** In: Reunião Anual de Pavimentação, Florianópolis, SC, 2001, Anais.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Centro Nacional de Pesquisa de Solos – Ministério de Agricultura e Abastecimento. **Sistema brasileiro de classificação de solos.** Serviço de Produção de Informação, SPI, Brasília, DF, 1999, 411p.

EPAGRI. **Inventário das Terras da Bacia Hidrográfica do Rio Camboriú.** Florianópolis. 1999.

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

GERSCOVICH, D. M. S. **Estabilidade de Taludes.** São Paulo: Oficina de Textos, 2012. 169p.

GODOY, H.; BERNUCCI, L. B.; NOGAMI, J. S. **Diretrizes para a identificação expedita de solos lateríticos para uso em obras viárias.** In: 30ª Reunião Anual de Pavimentação, Salvador, 1996, Anais... ABPV, v.2, p.557-568.

GUIDICINI, Guido; NIEBLE, Carlos M. **Estabilidade de taludes naturais e de escavação.** São Paulo: Edgard Blücher, 1983.

GUIMARÃES et al. **Parameterization of soil properties for a model of topographic controls on shallow landsliding: application to Rio de Janeiro.** Engineering Geology, v. 69, n. 1, p. 99-108, 2003.

HIGASHI, R. R. UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. **Utilização de um SIG no desenvolvimento de um banco de dados geotécnicos do norte do estado do Rio Grande do Sul.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Florianópolis, 2002. 143 p.

HIGASHI, R. 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. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 485p, 2006.

HIGHLAND, Lynn M.; BOBROWSKY, Peter. **The landslide handbook: A guide to understanding landslides.** Reston, Virginia, EUA. Geological Survey, 2008. 129 p.

IBGE. **Resolução 1/2005 Altera a caracterização do Sistema Geodésico Brasileiro.** Disponível em: <[ftp://geoftp.ibge.gov.br/documentos/geodesia/projeto\\_mudanca\\_referencial\\_geodesico/legislacao/rpr\\_01\\_25fev2005.pdf](ftp://geoftp.ibge.gov.br/documentos/geodesia/projeto_mudanca_referencial_geodesico/legislacao/rpr_01_25fev2005.pdf)>. Acesso em: Maio de 2015.

IPT, Instituto de Pesquisas Tecnológicas. **Procedimentos Metodológicos para o Mapeamento de Riscos de Escorregamento em Assentamentos Precários no Município de São Paulo, SP.** Comunicação Técnica, Nº171036. São Paulo, 2012

KOBIYAMA et al. **Prevenção de desastres naturais: conceitos básicos.** Curitiba: Organic Trading, 2006.

KOPEZINSKI, I. **Mineração x Meio Ambiente: Considerações Legais, Principais Impactos Ambientais e seus Processos Modificadores.** Porto Alegre, Ed. Universidade/UFRGS, 2000.

LAMBE, T. W. **Soil Mechanics, SI Version.** John Wiley & Sons. 1979.

MACEDO, E.S.; OGURA, A.T., SANTORO, J. **O que é um Plano de Contingência ou Preventivo de Defesa Civil.** In BRASIL, Ministério das Cidades/Cities Alliance. Prevenção de Riscos de Deslizamentos em Encostas: Guia para elaboração de Políticas Públicas Municipais. Brasília: Ministério das Cidades; Cities Alliance, 2006. p.76-91.

MAFRA JR, Celso da Silva. **Elaboração do mapa preliminar de unidades geotécnicas do município de Brusque associado a um banco de dados geotécnico em ambiente de SIG.** Florianópolis, 2007, 123 pg.

MASSAD, Façal. **Obras de Terra.** 1º edição; Editora: Oficina de textos: São Paulo/SP, 2003.

MICHEL, Gean Paulo. **Estudo de Escorregamentos na Bacia do Rio da Cunha, Rio dos Cedros/SC, com modelos SHALSTAB E SINMAP.** 2011. 84 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina-UFSC, Florianópolis, 2011.

MICHEL, Gean Paulo. **Modelagem de Estabilidade de Encostas com consideração do efeito da vegetação.** 2013. 152 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina-UFSC, Florianópolis, 2013.

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

NOGAMI, J. S.; BERNUCCI, L. L. B.; VILLIBOR, D. F. **Contração de solos arenosos finos lateríticos: simplificações para a escolha desses solos para bases de pavimentos de baixo custo.** In: 29ª Reunião Anual de Pavimentação, Anais, Cuiabá, 1995, ABPv, v.1, p.345-363.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. **Importância e determinação do grau de laterização em geologia de engenharia.** In: 8º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, Anais, Rio de Janeiro, ABGE, 1996, v.1, p.345-358.

NOGAMI, J.S.; VILLIBOR, D.F. **Identificação expedita dos grupos da classificação MCT para solos tropicais**. In: X COBRAMSEF, Foz do Iguaçu. Anais... São Paulo, ABMS, 1994, v.4, p.1293-1300.

OLIVEIRA, Felipe Paulo de. **Mapeamento Geotécnico preliminar e aplicação do modelo SHALSTAB na análise de escorregamentos da bacia de Santo Antônio de Lisboa – Florianópolis/SC**. 2014. 191 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

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

PADILHA, Liara Rotta. **MODELAGEM DA QUALIDADE DA ÁGUA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO CAMBORIÚ/SC**: Subsídios à Gestão Integrada dos Recursos Hídricos. 2013. 123 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade do Vale do Itajaí, Itajaí, 2013.

PMC. Prefeitura Municipal de Camboriú. **Caderno Técnico do Plano Diretor Participativo**: Camboriú, programando o crescimento da cidade. Camboriú, 2013. 287 p. Disponível em: <[http://www.cidadedecamboriu.sc.gov.br/plano\\_diretor.php](http://www.cidadedecamboriu.sc.gov.br/plano_diretor.php)>. Acesso em: junho de 2015.

PMC. Prefeitura Municipal de Camboriú. <http://www.cidadedecamboriu.sc.gov.br>. Acesso em: junho de 2015.

QUEIROZ, Rudney C. **Geologia e geotecnia básica para engenharia civil**. São Carlos: RiMa, 2009. 406p.

REGINATTO, Gisele Marilha Pereira. **Caracterização de Movimentos de Massa na Bacia Hidrográfica do Rio Cunha, Rio dos Cedros – SC**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2013.

ROSNIECEK, Anderson; IMAI, Hugo Namba. **Mapeamento Geotécnico e Análise de áreas suscetíveis a deslizamentos rasos da bacia do Rio Ratonés - Aplicação do Modelo Shalstab**. 2013. 155 f.

TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

ROSOLEM, Gabriel Phelipe Nascimento. **Mapeamento de áreas suscetíveis a deslizamentos rasos na bacia do Rio Forquilhas – São José-SC.** 2014. 144 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

SANT'ANA, W. C. **Estudo de misturas de areia-asfalto a quente para o estado do Maranhão.** Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002. 155 f.

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

TOMINAGA, Lídia K; SANTORO, Jair; AMARAL, Rosangela do. **Desastres Naturais: conhecer para prevenir.** São Paulo: Instituto Geológico, 2009. 196p.

UNESCO – IAEG. **Engineering Geological Maps.** A Guide to Their Preparation. Paris : The unesc press, 79p. 1976.

URBAN, Sandro Rogério. **Uso do solo na Bacia Hidrográfica do Rio Camboriú (SC) e sua influência na qualidade de água.** 2008. 100 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciência e Tecnologia Ambiental, Universidade do Vale do Itajaí, Itajaí, 2008.

VARNES, D. J. **Landslides, analysis and control.** Special Report 176, National Academy of Sciences, cap. II, 1978.

ZUQUETTE, L. V. **Análise crítica da cartografia geotécnica e proposta metodológica para as condições brasileiras.** Tese de Doutorado em Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1987, 657p.

ZUQUETTE, L. V. ; GANDOLFI, N. **Proposta de sistemática para mapeamento geotécnico regional em pequenas escalas.** In: 6º Simpósio Regional de Geologia, 1987, Rio Claro/SP. 2, 1987. p. 431-436. 1987.