

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

Gabriel Phelipe Nascimento Rosolem

**MAPEAMENTO DE ÁREAS SUSCETÍVEIS A  
DESLIZAMENTOS RASOS NA BACIA DO RIO FORQUILHAS –  
SÃO JOSÉ-SC**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina, como requisito parcial para a obtenção do título em Engenharia Civil.

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

Florianópolis  
2014

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

Rosolem, Gabriel Phelipe Nascimento

Mapeamento de áreas suscetíveis a deslizamentos rasos na  
bacia do rio Forquilhas - São José-SC / Gabriel Phelipe  
Nascimento Rosolem ; orientador, Rafael Augusto dos Reis  
Higashi - Florianópolis, SC, 2014.

164 p.

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

Inclui referências

1. Engenharia Civil. 2. Deslizamentos. 3. Mapeamento  
geotécnico. 4. Sistema de Informações Geográficas. 5.  
SHALSTAB. I. Higashi, Rafael Augusto dos Reis. II.  
Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em  
Engenharia Civil. III. Título.

Gabriel Phelipe Nascimento Rosolem

**MAPEAMENTO DE ÁREAS SUCEPTÍVEIS A  
DESLIZAMENTO NA BACIA DO RIO FORQUILHAS – SÃO  
JOSÉ-SC**

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, 11 de julho de 2014

Prof.. Luis Alberto Gómez, Dr.  
Coordenador do Curso de Graduação em Engenharia Civil

**Banca examinadora:**

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

Prof. Carlos Loch, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Orlando Martini de Oliveira, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina



Ao meus pais, Nelsi e Indalecio, e meus irmãos, Ana Clara e Guilherme, pelo apoio e amor incondicional.



## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por todas as bênçãos proporcionadas em minha vida e por me guiar quando os caminhos parecem incertos.

A minha família, pelo amor, motivação e apoio em todos os momentos da minha vida.

Ao meu orientador Prof. Rafael Higashi, pela paciência e pelos valiosos ensinamentos.

Ao prof. Carlos Loch, pela amizade, apoio, oportunidades e preciosos conselhos, que permitiram ampliar minha visão sobre a engenharia.

A Hugo Namba Imai, Lucas Groff Campos, Pedro Ivo Oliveira Almeida e demais amigos do Laboratório de Mapeamento Geotécnico, que contribuíram imensamente para o desenvolvimento deste trabalho.

A Anderson Schmitt, Matheus Soares Reis, Mirtz Orige Oliveira, Yuzi Anai Zanardo Rosenfeldt e demais amigos do LabFSG, pela amizade, auxílio e troca de conhecimentos durante a minha graduação.

Aos amigos: Ana Cristina Vidalis Frasson, Bruno Espirito Santo, Cassiano Mozar Fachinello Bremm, Fabio Caon de Souza, Hudson Fagundes, Jobber Luis Gonçalves Resenes, Jaffer Bressan Borinelli, Jonas de Freitas Kühlkamp, Mariana de Souza Rufino, Taisa Inara Messias e Vicente Casagrande Machado da Rosa, pela amizade e companheirismo que sei que permanecerão além da graduação.

A todos que contribuíram para meu desenvolvimento profissional.



“Confia no Senhor de todo seu coração, e não te estribes no teu próprio entendimento”.

Salmos 3:5



## RESUMO

No Brasil, os movimentos de massa são um dos principais processos associados a desastres naturais com maior número de vítimas fatais. Para mitigar tais ocorrências, o congresso aprovou a Lei Federal 12.608 como uma de suas diretrizes a prevenção de desastres naturais, tornando obrigatório aos municípios identificar e mapear as áreas de risco, além de elaborar uma carta geotécnica de aptidão a urbanização. Desta forma, este trabalho pretende elaborar um mapa das áreas suscetíveis a deslizamentos translacionais rasos na bacia do Rio Forquilhas, em São José-SC, por meio da caracterização dos solos da área e modelagem computacional. Para tanto, o trabalho utiliza a metodologia de Dias (1995) para criar o mapa geotécnico, que subsidia a definição das coletas de amostras para ensaios de caracterização e resistência dos solos. Os atributos ensaiados são georreferenciados e utilizados no modelo SHALSTAB para delimitação das áreas suscetíveis a deslizamentos rasos. Os resultados apontam que áreas com as encostas mais instáveis estão localizadas nas unidades geotécnicas de solos cujo substrato são de rochas ígneas, no intervalo de relevo entre ondulado a escarpado.

**Palavras-chaves:** deslizamentos, mapeamento geotécnico, SIG, SHALSTAB.



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Interação dos fatores de formação do solo. ....	5
Figura 2 – Corpo de prova do método expedito das pastilhas. ....	12
Figura 3 – Referenciais topocêntricos e geocêntricos. ....	16
Figura 4 – Dado representado vetorialmente, a esquerda, e matricialmente, a direita. ....	19
Figura 5 – Dados em representação matricial. ....	20
Figura 6 – Dados em representação vetorial. ....	20
Figura 7 – Princípio básico da metodologia elaborada por Dias (1995). ....	25
Figura 8 – Simbologia das unidades geotécnicas segundo Dias (1995). ....	26
Figura 9 – Talude Infinito no lado direito da encosta. ....	29
Figura 10 – Forças atuantes em uma lamela genérica de talude infinito. ....	30
Figura 11 – Superfícies de ruptura de taludes, a) superfície circular e b) plana. ....	32
Figura 12 - Procedimento de massa. ....	32
Figura 13 – Método das fatias. ....	33
Figura 14 – Forças atuantes no método de Fellenius. ....	34
Figura 15 – Forças atuantes em uma fatia genérica no método de Bishop Simplificado. ....	35
Figura 16 – Esforços atuantes na cunha de solo no método de Culmann. ....	37
Figura 17 – Rastejo (creep) ....	39
Figura 18 – Deslizamento translacional. ....	40
Figura 19 – Deslizamento rotacional. ....	41
Figura 20 - a) Tombamento e b) rolamento. ....	42
Figura 21 - Corrida de detritos. ....	43
Figura 22 - Análise de algumas das forças atuantes em um talude infinito. ....	47
Figura 23 - Decomposição de algumas das forças atuantes no talude infinito. ....	47
Figura 24 - Modelo hidrológico estacionário de recarga uniforme. ....	50
Figura 25 – Determinação da direção do fluxo subsuperficial a partir de um MDT. ....	53
Figura 26 - Direção do fluxo definida pelo método D-Infinito proposto por Tarboton (1997). ....	54
Figura 27 - Mapa de localização do município de São José-SC. ....	56
Figura 28 – Mapa de localização da bacia do Rio Forquilhas. ....	58

Figura 29 - Mapa pedológico da bacia do Rio Forquilhas. ....	60
Figura 30 - Mapa geológico da bacia do Rio Forquilhas. ....	61
Figura 31 - Fluxograma da metodologia.....	63
Figura 32 - Procedimento simplificado da estimativa de unidades geotécnicas.....	65
Figura 33 - Métodos de representação do modelo digital do terreno....	66
Figura 34 - Escala granulométrica, em mm, adotada pela NBR6502:1995.....	67
Figura 35 - Gráfico da classificação MCT pelo Método Expedito das Pastilhas.....	71
Figura 36 – Transformação de SAD69, em preto, para SIRGAS2000, em vermelho.....	76
Figura 37 – Vetores de deslocamentos horizontais entre SAD69 e um sistema geocêntrico.....	76
Figura 38 - Curvas de nível em escala 1:2000 da bacia do rio Forquilhas.....	79
Figura 39 - Modelo Digital de Terreno em malha triangular.....	80
Figura 40 – Mapa Hipsométrico em malha retangular de resolução 10x10m.....	81
Figura 41 - Mapa de declividades em malha triangular.....	82
Figura 42 - Mapa de declividades em malha retangular de resolução 10x10m.....	83
Figura 43 - Pontos de coletas de amostras na bacia do rio Forquilhas..	85
Figura 44 - Coleta de amostra em talude escalonado no Ponto 5.....	86
Figura 45 - Vista frontal do Ponto 5.....	87
Figura 46 – Talude de corte no Ponto 8.....	88
Figura 47 - Vista a partir do Ponto 8.....	89
Figura 48 - Resultados dos ensaios da classificação MCT.....	92
Figura 49 - Corpos de provas do Ponto 6 submetidos a ascensão capilar de água.....	93
Figura 50 - Curvas granulométricas dos solos da bacia do Rio Forquilhas.....	96
Figura 51- Envoltórias dos ensaios de cisalhamento direto.....	97
Figura 52 - Mapa geotécnico da bacia do rio Forquilhas.....	100
Figura 53 - Resultado dos ensaios de MCT – Infiltrabilidade e perda de massa por imersão.....	101
Figura 54 - Procedimento de correção do mapa hipsométrico.....	104
Figura 55 - Coesão estimada para os solos da bacia do Rio Forquilhas.....	106
Figura 56 - Ângulo de atrito interno estimado para os solos da bacia do Rio Forquilhas.....	107

Figura 57 – Massa específica natural estimado para os solos da bacia do Rio Forquilhas.....	108
Figura 58 - Massa específica saturado estimado para os solos da bacia do Rio Forquilhas.....	109
Figura 59 - Direções do fluxo subsuperficial estimado pelo método D-8 do ArcGIS.....	110
Figura 60 - Direções do fluxo subsuperficial estimado pelo método D-Infinito do Taudem.....	111
Figura 61 - Áreas de contribuição estimadas pelo método D-8 do ArcGIS.....	112
Figura 62 - Áreas de contribuição estimadas pelo método D-Infinito do Taudem.....	113
Figura 63 - Áreas suscetíveis a deslizamentos translacionais rasos com $\gamma$ nat., profundidade de 2 metros e fluxo subsuperficial pelo método D-8.....	114
Figura 64 - Áreas suscetíveis a deslizamentos translacionais rasos com $\gamma$ nat., profundidade de 2 metros e fluxo subsuperficial pelo método D-Infinito.....	115
Figura 65 - Áreas suscetíveis a deslizamentos translacionais rasos com $\gamma$ nat., profundidade de 5 metros e fluxo subsuperficial pelo método D-8.....	116
Figura 66 - Áreas suscetíveis a deslizamentos translacionais rasos com $\gamma$ nat., profundidade de 5 metros e fluxo subsuperficial pelo método D-Infinito.....	117
Figura 67 - Áreas suscetíveis a deslizamentos translacionais rasos com $\gamma$ nat., profundidade de 7 metros e fluxo subsuperficial pelo método D-8.....	118
Figura 68 - Áreas suscetíveis a deslizamentos translacionais rasos com $\gamma$ nat., profundidade de 7 metros e fluxo subsuperficial pelo método D-Infinito.....	119
Figura 69 - Áreas suscetíveis a deslizamentos translacionais rasos com $\gamma$ sat., profundidade de 2 metros e fluxo subsuperficial pelo método D-8.....	120
Figura 70 - Áreas suscetíveis a deslizamentos translacionais rasos com $\gamma$ sat., profundidade de 2 metros e fluxo subsuperficial pelo método D-Infinito.....	121
Figura 71 - Áreas suscetíveis a deslizamentos translacionais rasos com $\gamma$ sat., profundidade de 5 metros e fluxo subsuperficial pelo método D-8.....	122

Figura 72 - Áreas suscetíveis a deslizamentos translacionais rasos com $\gamma$ sat., profundidade de 5 metros e fluxo subsuperficial pelo método D-Infinito. ....	123
Figura 73 - Áreas suscetíveis a deslizamentos translacionais rasos com $\gamma$ sat., profundidade de 7 metros e fluxo subsuperficial pelo método D-8. ....	124
Figura 74 - Áreas suscetíveis a deslizamentos translacionais rasos com $\gamma$ sat., profundidade de 7 metros e fluxo subsuperficial pelo método D-Infinito. ....	125
Figura 75 - Comparação área de contribuição pelo método D-Infinito, a esquerda, e cursos d'água de restituição aerofotogramétrica EPAGRI em escala 1:50.0000, a direita. ....	126
Figura 76 - a) áreas suscetíveis a deslizamentos pelo método D-8, b) mapa de declividade. ....	127
Figura 77 - a) áreas suscetíveis a deslizamentos pelo método D-INFINITO, b) mapa de declividade. ....	128
Figura 78 - Localização de um loteamento hipotético, em vermelho. ....	129
Figura 79 - Loteamento hipotético, em amarelo, sobreposto ao modelo digital de terreno com as áreas suscetíveis a deslizamentos, em tonalidade de vermelho. ....	129
Figura 80 - Áreas suscetíveis a deslizamentos sobrepostas ao mapa geotécnico. ....	131

## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 – Resumo dos ensaios MCT.....	7
Quadro 2 – Características dos solos lateríticos na metodologia MCT. 10	
Quadro 3 – Características dos solos não lateríticos na metodologia MCT.....	11
Quadro 4 – Classes de solo do SIBCS .....	13
Quadro 5 – Principais metodologias de mapeamento geotécnico segundo Kopezinski (2000).....	23
Quadro 6 – Principais movimentos de massas associados a encostas... 38	
Quadro 7 – Classes de estabilidade SHALSTAB.....	52
Quadro 8 - Dados cartográficos obtidos para o desenvolvimento do trabalho.....	64
Quadro 9- Classes de relevo segundo Embrapa (2006).....	78
Quadro 10 - Coordenadas UTM dos pontos de coleta de amostras.....	84
Quadro 11 - Resultados dos ensaios de caracterização dos solos da bacia do Rio Forquilhas.....	90
Quadro 12 – Porcentagem em cada faixa granulométrica nos solos amostrados da bacia do Rio Forquilhas.....	90
Quadro 13 – Resultado dos índices físicos dos solos da bacia do Rio Forquilhas.....	91
Quadro 14 - Principais características geotécnicas de cambissolos e argissolos vermelho-amarelo na região sul do Brasil.....	92
Quadro 15 - Resultados de alguns ensaios de MCT no estado de Santa Catarina. ....	95
Quadro 16 - Resultado dos ensaios de cisalhamento direto e índices físicos relacionados aos corpos de provas com solo indeformado. ....	97
Quadro 17 - Alguns valores de coesão e ângulo de atrito dos solos de Santa Catarina para Cambissolos e Argissolos Vermelho-Amarelo. ....	98
Quadro 18 - Simbologia e área das unidades geotécnicas da bacia do Rio Forquilhas.....	99



## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1. OBJETIVO GERAL.....	2
1.2. OBJETIVO ESPECÍFICO.....	2
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>5</b>
2.1. SOLO.....	5
<b>2.1.1. Classificação MCT .....</b>	<b>6</b>
<b>2.1.2. Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos.....</b>	<b>13</b>
2.2. SISTEMAS GEODÉSICOS DE REFERÊNCIA.....	15
<b>2.2.1. South America Datum of 1969.....</b>	<b>17</b>
<b>2.2.2. Sistema Geodésico de Referência para as Américas 2000 .....</b>	<b>18</b>
2.3. SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS .....	19
2.4. MAPEAMENTO GEOTÉCNICO.....	21
<b>2.4.1. Metodologias .....</b>	<b>22</b>
2.5. TALUDES .....	26
<b>2.5.1. Resistência ao cisalhamento .....</b>	<b>27</b>
2.6. ESTABILIDADE DE TALUDES .....	28
<b>2.6.1. Taludes infinitos.....</b>	<b>29</b>
<b>2.6.2. Taludes finitos .....</b>	<b>31</b>
2.7. MOVIMENTOS DE MASSA .....	37
<b>2.7.1. Rastejo .....</b>	<b>39</b>
<b>2.7.2. Escorregamentos.....</b>	<b>39</b>
<b>2.7.3. Quedas .....</b>	<b>42</b>
<b>2.7.4. Corridas.....</b>	<b>433</b>
2.8. MÉTODOS DE PREVISÃO DE ÁREAS SUSCETÍVEIS A DESLIZAMENTOS RASOS.....	43
2.9. MODELOS DE PREVISÃO DE ÁREAS SUSCETÍVEIS A DESLIZAMENTOS RASOS.....	45
<b>2.9.1. Shalstab.....</b>	<b>45</b>
<b>3. ÁREA DE ESTUDO.....</b>	<b>55</b>
<b>4. MÉTODOS E MATERIAIS .....</b>	<b>63</b>
4.1. DADOS PREEXISTENTES.....	64
4.2. TRANSFORMAÇÃO DO SISTEMA GEODÉSICO DE REFERÊNCIA.....	64
4.3. MAPAS .....	65
4.4. ENSAIOS .....	66
<b>4.4.1. Caracterização .....</b>	<b>67</b>
<b>4.4.2. Resistência .....</b>	<b>71</b>
4.5. BANCO DE DADOS GEORREFERENCIADO .....	73

4.6.	MAPA GEOTÉCNICO.....	73
4.7.	MODELO SHALSTAB.....	73
<b>5.</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>75</b>
5.1.	TRANSFORMAÇÃO DA BASE CARTOGRÁFICA.....	75
5.2.	PARÂMETROS TOPOGRÁFICOS.....	77
5.3.	ENSAIOS.....	84
<b>5.3.1.</b>	<b>Pontos de coleta de amostras.....</b>	<b>84</b>
<b>5.3.2.</b>	<b>Caracterização.....</b>	<b>90</b>
<b>5.3.3.</b>	<b>Resistência.....</b>	<b>97</b>
5.4.	MAPA GEOTÉCNICO.....	99
<b>5.4.1.</b>	<b>Depósitos aluvionares substrato sedimentos quartenários (ASq)</b>	<b>101</b>
<b>5.4.2.</b>	<b>Cambissolo de substrato granito (Cg).....</b>	<b>102</b>
<b>5.4.3.</b>	<b>Cambissolo de substrato depósitos de encostas (Cde).....</b>	<b>102</b>
<b>5.4.4.</b>	<b>Cambissolo de substrato gnaisses e migmatitos (Cgn).....</b>	<b>102</b>
<b>5.4.5.</b>	<b>Argissolo Vermelho-Amarelo de substrato gnaisses e migmatitos (PVAgn).....</b>	<b>103</b>
5.5.	ÁREAS SUSCETÍVEIS A DESLIZAMENTOS.....	103
<b>5.5.1.</b>	<b>Análise dos resultados.....</b>	<b>126</b>
<b>6.</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>132</b>
6.1.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS POSTERIORES.....	133
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>135</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O rápido crescimento demográfico das cidades proporcionado pelo início da industrialização no país, aliado a falta de infraestrutura e planejamento urbano tornou-se um dos maiores problemas urbanos brasileiros. A oferta de trabalho fomentou a migração urbana e a especulação imobiliária impulsionou a construção civil, por consequência ocorreu um demasiado crescimento da periferia das cidades. Essa dinâmica urbana proporcionou o aumento das construções irregulares e das construções em áreas de risco, como encostas e leitos de rios. Além da dinâmica urbana, as condições físico-ambientais, como a geologia, geomorfologia, aspectos climáticos e hidrológicos favorecem a ocorrência de movimentos de massa, nos quais estão incluídos os deslizamentos.

No Brasil, os movimentos de massa são um dos principais processos associados a desastres naturais com maior número de vítimas fatais (BAPTISTA et al., 2005 apud UFSC, 2011). Segundo UFSC (2012) foram registradas 31909 registros oficiais de ocorrências de movimentos de massa no país entre os anos de 1991 e 2010. No Estado de Santa Catarina, para o mesmo período, foram realizados apenas 20 registros oficiais sem nenhuma ocorrência de vítima. Entretanto, os movimentos de massa, em especial os ocorridos em novembro de 2008, deixaram elevado número de mortes, que segundo a Defesa Civil do Estado de Santa Catarina chegaram a 135 óbitos confirmados (UFSC, 2011).

A ocorrência de movimento de massa de tamanha proporção está associada principalmente a precipitações atípicas e extremas. No caso de 2008, chuvas assolaram o estado por um período de 3 meses e acumularam 1000mm precipitados, sendo a média mensal de 150mm (EPAGRI, 2014). Assim, o fator pluviométrico é um dos principais gatilhos para desencadear os deslizamentos das encostas, visto que o aumento de no nível de água no solo diminui a sua resistência e pode leva-lo ao colapso.

Em relação a eventos naturais extremos, o Estado de Santa Catarina merece atenção principalmente a precipitações intensas. A região sul do país é uma área de passagem de frentes frias, que proporcionam mudanças bruscas no tempo e desvios nas precipitações anuais. Além das frentes frias, o estado também sofre episódios pluviais irregulares em função do fenômeno *El Niño*, que provocam chuvas intensas em determinados períodos (CARDOZO, 2009). Associado as precipitações anormais, a área costeira do estado entre o Oceano Atlântico e o planalto da Serra Geral, generalizadamente, são consideradas de alto risco a

ocorrência de deslizamentos. Isto se deve as condições climáticas regionais, geológicas, pedológicas, geomorfológicas e de uso da terra (UFSC, 2011).

Ao se comparar os impactos de deslizamentos nos países em desenvolvimento, verifica-se que, na maioria dos casos, os impactos estão associados à perda humana em áreas densamente ocupadas, ao passo que nos países desenvolvidos, estes impactos estão associados a perdas econômicas. Podem-se relacionar essas diferenças ao fato de que em países desenvolvidos preocupam-se mais com medidas preventivas, enquanto nos países em desenvolvimento prevalecem pressões antropogênicas desprovidas de planejamento (LISTO, 2011). Assim torna-se imprescindível que as políticas públicas para gestão territorial utilizem mapas e cartas com informações do meio físico para o planejamento regional e urbano.

O município de São José-SC pertence a Grande Florianópolis e localiza-se na região costeira catarinense. Segundo Herrmann org.(2005 apud CARDOZO, 2009) até o ano de 2008, o município sofreu 44 ocorrências de desastres naturais, das quais 11 foram de deslizamentos de encostas, afetando principalmente os bairros localizados na bacia do Rio Forquilhas. Esta bacia possui características físicas e ambientais suscetíveis a deslizamentos de encostas, principalmente em sua porção norte, com a presença da Serra do Leste Catarinense.

Desta forma, este trabalho pretende elaborar um mapa das áreas suscetíveis a deslizamentos translacionais rasos na bacia do Rio Forquilhas por meio da caracterização dos solos da área e modelagem computacional. Ao final espera-se que este trabalho possa vir a servir para a delimitação das áreas de riscos do município.

### 1.1. OBJETIVO GERAL

O objetivo deste trabalho é realizar o mapeamento de áreas suscetíveis a deslizamentos rasos na Bacia do Rio Forquilhas, em São José-SC, utilizando o modelo SHALSTAB em um Sistema de Informações Geográficas (SIG).

### 1.2. OBJETIVO ESPECÍFICO

Para alcançar o objetivo geral, este trabalho tem por objetivos específicos:

- i. Caracterizar o solo da Bacia do Rio Forquilhas;
- ii. Gerar um banco de dados geotécnico em ambiente SIG;

- iii. Identificar as unidades geotécnicas;
- iv. Analisar as áreas suscetíveis aos deslizamentos rasos obtidos através da aplicação do modelo SHALSTAB.



## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

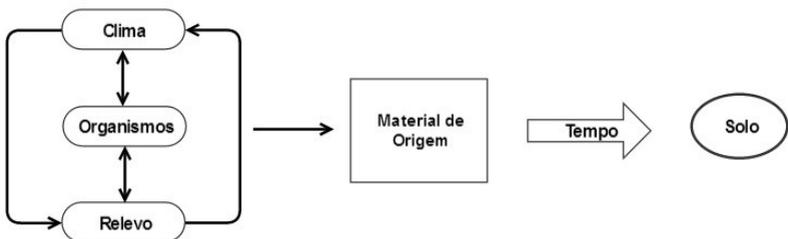
A fim de uma adequada compreensão, apresentar-se-á aqui conceitos essenciais relacionados a temática do trabalho.

### 2.1. SOLO

Pode-se definir solo como um conjunto tridimensional dinâmico, constituído por parte sólida, líquida e gasosa, formado por agregados não cimentados de grãos minerais e matéria orgânica – resultantes da ação de processos pedogenéticos e da intensidade da manifestação dos fatores de formação. (EMBRAPA, 2006; DAS, 2011; OLIVEIRA, 2008).

A superfície terrestre possui uma imensa quantidade de diferentes tipos de solos. De acordo com Jenny (1941 apud PRADO, 1996) são cinco os fatores de formação do solo: material de origem, clima, relevo, organismos e tempo. As ações destes fatores são interdependentes (Figura 1), assim Prado (2003) explica: “o solo resultou da ação do clima e de organismos sobre o material de origem, no relevo, durante determinado tempo”. Segundo Oliveira (2008) as inúmeras combinações de ação destes fatores, com diferentes intensidades, propiciam a formação de uma imensa variedade de solos com natureza, composição, comportamento diferentes.

Figura 1 - Interação dos fatores de formação do solo.



Fonte: adaptado de Prado (1996)

A ação conjunta dos fatores de formação inicia um processo de reações químicas e físicas, intemperismo, no material de origem, rocha e/ou sedimentos, formando uma camada que se transforma em solo (PRADO, 2003). Este processo é definido como uma sequência de

eventos, desde complexas reações a simples rearranjo de materiais, que afetam diretamente o solo ao qual atuam (BUOL et al., 1973 apud OLIVEIRA, 2008).

Os eventos podem ocorrer simultaneamente, ampliando ou reduzindo mutuamente suas ações. Pedólogos nomearam alguns desses como, lixiviação, gleização, latossolização, entretanto, em última análise, podem-se resumir a cinco processos gerais: adição, perdas, transformações, transportes no interior do perfil e remanejamento mecânico (SIMONSON, 1959 apud OLIVEIRA, 2008).

### 2.1.1. Classificação MCT

Após a introdução da mecânica dos Solos no Brasil, verificou-se que os solos tropicais possuíam propriedades e comportamentos diferentes do que verificado nos livros (NOGAMI; VILLIBOR, 1991). Estas distinções estavam condicionadas as classificações desenvolvidas em países de clima temperado, como Estados Unidos e países europeus, conseqüentemente aos solos destas regiões (MOURA; SANT'ANA; BERNUCCI, 2006).

Nogami e Villibor (1994) cita que os procedimentos tradicionais de classificações geotécnicas, baseados no gráfico de plasticidade e granulometria, não são apropriados para solos tropicais, pois atribuem propriedades mecânicas e hidráulicas distintas que o observado nas amostras e no comportamento nas obras. Devido às limitações e deficiência da aplicação das classificações tradicionais aos solos tropicais, Nogami e Villibor desenvolveram uma classificação própria a este tipo de solos denominada MCT (SANTOS, 2006).

Segundo Nogami e Villibor (1988) a metodologia MCT significa Miniatura Compactada para solos Tropicais, na qual a designação Miniatura Compactada refere-se à utilização de corpos de provas de tamanhos reduzidos, diâmetro igual ou menor a 50 mm, com solo em condição compactada.

O princípio geral da classificação é determinar as propriedades mecânicas e hidráulicas em corpos de provas de solos compactados de maneira expedita. Assim a maior amplitude de propriedades verificadas nesta metodologia (Quadro 1), como contração, sorção e permeabilidade, permitem aplicar adequadamente os solos tropicais, de forma que se reduzam os custos das obras (NOGAMI; VILLIBOR, 1988).

Quadro 1 – Resumo dos ensaios MCT.

<b>OBJETIVO</b>	<b>ENSAIO</b>	<b>DESCRIÇÃO</b>
<b>Classificação do solo</b>	<b>Mini-MCV</b>	Preparo de cp's com teores de umidade diferentes, compactado sem uma única face, segundo uma determinada série de golpes (Parsons ou Simplificada). Traçado das curvas de compactação e deformabilidade para obtenção dos coeficientes $d'$ e $c'$ , sendo $d'$ utilizado para o cálculo do $e'$ .
	<b>Perda de água por imersão</b>	Imersão dos cp's obtidos no ensaio mini-MCV para obter o coeficiente PI parâmetro utilizado para o cálculo do $e'$
<b>Compactação (densidade máx e hót)</b>	<b>Mini-Proctor</b>	Preparo de corpos-de-prova com 5 teores de umidade (utilizando energia normal, intermediária ou modificada). Esta etapa é geralmente utilizada para a preparação de cp's para ensaios de mini-CBR, contração, sorção e permeabilidade, pois se utiliza o mesmo procedimento. Os corpos-de-prova possuem diâmetro de 50,0mm e altura de 50 mm +/- 1,0mm. Traçado da curva de compactação para obtenção do $\gamma_{s,max}$ e hót.
<b>Capacidade de suporte</b>	<b>Mini-CBR</b>	Cp's preparados no ensaio mini-Proctor, com 5 teores de umidade Imersão por 24 horas dos cp's (Mini-CBRimerso). Mede-se a altura do cp antes e após a imersão para obtenção da expansão (axial em %) Separar outra série de cp's (Mini-CBR sem imersão). Levar as duas séries de cp's para a prensa onde será procedida a penetração do pistão padrão (diâmetro de 16,0 mm) à velocidade constante. Traçado das curvas tensão x penetração e obtenção do Mini-CBR

Continua

Quadro 1 - Resumo dos ensaios MCT.

<b>OBJETIVO</b>	<b>ENSAIO</b>	<b>DESCRIÇÃO</b>
<b>Suscetibilidade ao trincamento</b>	<b>Contração</b>	Cp's preparados no ensaio mini-Proctor, com 5 teores de umidade. Levá-los aos suportes com extensômetro, para perda de umidade até sua constância de massa. Medir periodicamente a variação de altura dos corpos-de-prova. Obtenção da contração (axial em %).
<b>Suscetibilidade à infiltração de água sem carga hidrostática</b>	<b>Sorção (infiltrabilidade)</b>	Levar os cp's preparados no ensaio mini-Proctor, com 5 teores de umidade às bases com pedra porosa. Medir periodicamente a variação da frente úmida. Traçado das curvas vazão de infiltração x (raiz do tempo) e obtenção do coefic. de sorção
<b>Suscetibilidade à infiltração de água com carga hidrostática</b>	<b>Permeabilidade</b>	Cp's preparados no ensaio mini-Proctor, com 5 teores de umidade Saturação dos corpos-de-prova Levá-los às bases c/ pedra porosa e ligá-los aos permeâmetros de carga variável. Medir periodicamente a variação no permeâmetro. Traçar as curvas de altura de nível d'água na bureta x tempo. Obtenção do coeficiente de permeabilidade

Fonte: Moura; Sant'Ana; Bernucci (2006)

De acordo com Nogami e Villibor (1995), algumas das dificuldades de abordar as características dos solos tropicais se encontram na ausência de uma terminologia para estes. Entre as terminologias adotadas nesta classificação estão:

- i. Solo tropical: solo que apresenta propriedades e comportamentos peculiares, comparadas aos solos não tropicais, decorrentes da ação de processos geológicos e/ou pedológicos típicos de regiões tropicais úmidas (Committee on Tropical Soils of ISSMFE, 1985 apud NOGAMI; VILLIBOR, 1995). Cabe ressaltar que para ser considerado como tropical, não é suficiente estar localizado na

- faixa astronômica tropical ou em região tropical úmida (NOGAMI; VILLIBOR, 1995). Dentre os solos tropicais destacam-se duas classes: os solos lateríticos e os saprolíticos.
- ii. Solo Laterítico: na definição pedológica o processo pedogenético de laterização é a migração química de sílica do solo superficial e como consequência a concentração de alumínio e ferro com ou sem a formação de laterita (PRADO, 2003). Segundo Oliveira (2008) o termo “laterita” foi substituído por “plintita” na literatura pedológica na década de 60 por conta da imensa quantidade de conceitos em relação a denominação anterior. Para fins da classificação MCT o solo laterítico será aquele de “comportamento laterítico”. De acordo com Godoy e Bernucci (2000 apud SANT’ANA, 2002), solos com comportamento laterítico apresentam, em estado seco, resistência e capacidade de suporte e na presença de água, preservam significativamente a baixa deformabilidade e permeabilidade, além da alta resistência.
  - iii. Solo Saprolítico: solo resultante da decomposição e/ou desagregação da rocha, no local, mantendo nitidamente a estrutura da rocha de sua origem (Committee on Tropical Soils of ISSMFE, 1985 apud NOGAMI; VILLIBOR, 1995).

Fontes (2001) cita que a metodologia MCT classifica os solos tropicais em duas classes principais: os solos com comportamento laterítico, designados pela letra maiúscula “L”, e os de comportamento não laterítico, designados pela letra maiúscula “N”. Dentro de cada classe os solos serão classificados quanto a fração granulométrica predominante, sendo “A” areia, “A” arenoso, “S” siltoso e “G” argiloso (MOURA; SANT’ANA; BERNUCCI, 2006). Dentro da classe laterítico tem-se três grupos (Quadro 2) e dos não lateríticos quatro grupos (Quadro 3): areias lateríticas (LA), solos arenosos lateríticos (LA’), os solos argilosos alteríticos (LG’), areias não lateríticas (NA), os solos arenosos não lateríticos (NA’), os solos siltosos não lateríticos (NS’) e solos argilosos não lateríticos (NG’) (FONTES, 2001).

Quadro 2 – Características dos solos lateríticos na metodologia MCT.

<b>CLASSE DOS LATERÍTICOS</b>	<b>LA</b>	Areias lateríticas	Areias com muito pouco finos (argilas e siltes) lateríticos, pouco coesivas e pouco plásticas. Infiltrabilidade elevada a média; permeabilidade média. Contraí muito pouco por secagem, com trincamento ausente ou pouco desenvolvido. Geralmente desfaz-se quando solto e encharcado, podendo escoar facilmente pela ação de água corrente. De maneira geral, predominam condições em que se comporta com grau elevado de erodibilidade
	<b>LA'</b>	Solos arenosos laterítico	Areias argilosas lateríticas, pouco plásticas e pouco coesivas. Infiltrabilidade e permeabilidade baixas. Contraí por secagem, com desenvolvimento moderado de trincas. Superfícies expostas moderadamente resistentes ao amolecimento e a desagregação. Variedades menos coesivas, desmancham-se facilmente quando solto e encharcado, podendo escoar com facilidade pela ação da água corrente. Geralmente aumenta consideravelmente de resistência a erosão quando bem compactado.
	<b>LG</b>	solos argilosos lateríticos	Argilas ou argilas lateríticas, muito plásticas a muito coesivas. Infiltrabilidade e permeabilidade baixas. Muito contráctil por secagem, com intenso desenvolvimento de trincas. Baixa expansibilidade. Superfícies expostas muito resistentes ao amolecimento e a desagregação. Agregados naturais ou resultantes da compactação bastante resistentes, proporcionando razoável estabilidade mesmo em estado solto e encharcado.

Fonte: adaptado de Villibor, Nogami e Fabri (1986).

Quadro 3 – Características dos solos não lateríticos na metodologia MCT.

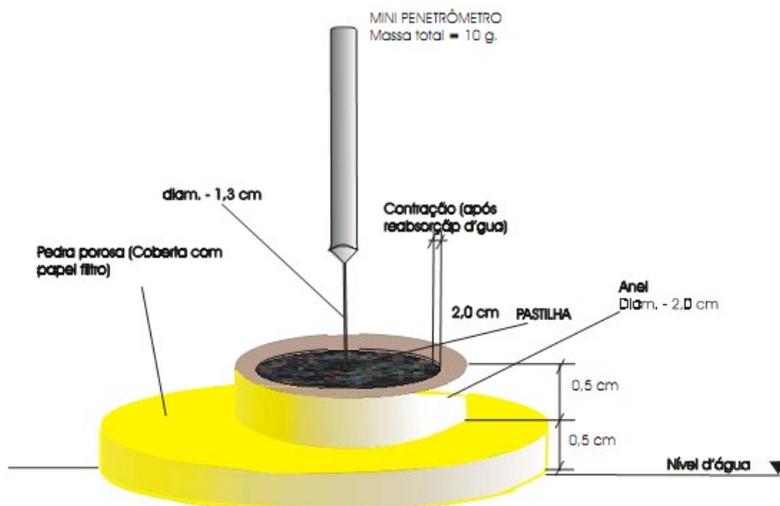
<b>CLASSE DOS NÃO LATERÍTICOS</b>	<b>NA</b>	areias não lateríticas	Areias limpas, não coesivas ou muito coesivas, não plásticas. Permeabilidade e infiltrabilidade elevadas. Superfície exposta amolece e desagrega facilmente. Praticamente não contrai quando seco, não desenvolvendo trincas. Desmorona facilmente quando encharcado em estado solto, podendo liquefazer-se facilmente pela ação de água corrente, que entretanto não se forma nas suas superfícies expostas, a não ser na ocasião de chuvas muito intensas, devido a sua elevada capacidade de infiltração.
	<b>NA'</b>	solos arenosos não lateríticos	Areias argilosas ou siltosas, pouco plásticas e pouco coesivas, com finos não lateríticos, de expansibilidade média a elevada. Infiltrabilidade e permeabilidade baixas a médias. Pequena contração por secagem, com trincamento moderado. Superfície exposta resistente a pouco resistente (amolece e desagrega). Quando solto seco, desmancha-se com o encharcamento, podendo liquefazer pela ação de água corrente. De maneira geral possui erodibilidade difícil de ser prevista apenas pelo conhecimento do grupo MCT.
	<b>NS'</b>	Solos siltosos não lateríticos	Solos de comportamento siltoso, contendo siltes pouco coesivos e pouco plásticos. Permeabilidade e infiltrabilidade médias. Superfície exposta amolece e desagrega facilmente. Não contrai ou contrai muito pouco, com trincamento eventual pouco intenso. Quase sempre expansivo, porém com baixa pressão de expansão. Comportamento variando quando encharcado em estado solto, havendo variedades com agregados de finos (torrões) resistentes e outros com agregados não resistentes ao encharcamento. Geralmente com grau elevado de erodibilidade em quase todas as circunstâncias.
	<b>NG'</b>	solos argilosos não lateríticos	Argilas ou argilas siltosas, muito coesivas e muito plásticas. Permeabilidade baixa. Infiltrabilidade média devido ao desenvolvimento de trincas. Geralmente bastante resistentes a ação da água corrente quando compactado e úmido. Expansibilidade e contração elevadas, com intenso desenvolvimento de trincas. Quando solto e seco, submetido ao encharcamento, desagrega intensamente, dando origem a lama.

Fonte: adaptado de Villibor, Nogami e Fabri (1986).

A classificação MCT mostra-se adequada aos solos dos países tropicais, entretanto devido a complexidade dos seus ensaios, a familiaridade dos profissionais de laboratório com as metodologias tradicionais, os investimentos em novos equipamentos e o próprio custo desses ensaios, impulsionaram os pesquisadores da metodologia MCT a desenvolver métodos simplificados que alcançassem igualmente os objetivos desejados (SANT'ANA, 2002).

Segundo Fontes (2001) e Costa Junior (2001), a primeira tentativa de uma identificação expedita para a classificação MCT foi realizada por Nogami e Cozzolino em 1985 e o procedimento era visual-táctil. Nogami e Villibor (1994) demonstram uma quarta aproximação do método expedito das pastilhas, mais simples, com baixo custo no que refere-se a aparelhagem, material e mão de obra. O método consiste em obter empiricamente os valores e parâmetros da classificação MCT, analisando-se a contração por secagem, consistência com uso de mini-penetrômetro e inchamento quanto a reabsorção de água, de corpos de provas moldados em anéis de 20mm de diâmetro (Figura 2). (FONTES, 2001; COSTA JUNIOR, 2001). Os detalhes do método expedito das pastilhas serão apresentados no subseção 4.4.1 alínea e) deste trabalho.

Figura 2 – Corpo de prova do método expedito das pastilhas.



Fonte: Costa Junior (2001).

### 2.1.2. Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos

O Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos (SIBCS) é o referencial taxionômico nacional para profissionais, pesquisadores e estudantes envolvidos com a ciência do solo. O desenvolvimento iniciou-se a partir da década de 70, envolvendo diversas instituições de pesquisa e ensino do país. Desde então foram elaboradas diversas aproximações que resultaram na publicação da primeira edição do SIBCS em 1999 e consequente adoção deste sistema como oficial para a classificação dos solos do país (EMBRAPA, 2006).

O SIBCS possui um sistema hierárquico e multicategórico estruturado de forma descendente e composto por seis níveis categóricos. Sendo do primeiro nível ao sexto, respectivamente, ordem, subordem, grande grupo, subgrupo, família e série (PRADO, 2003).

Atualmente o SIBCS está na segunda edição, lançada em 2006, na qual revisou e atualizou os parâmetros e critérios da edição anterior aos novos conhecimentos e pesquisas nacionais e internacionais. Uma das mudanças entre a primeira e a segunda edição é que agora são 13 classes de solos (Quadro 4) (EMBRAPA, 2006).

Quadro 4 – Classes de solo do SIBCS

<b>Nomenclatura</b>	<b>Etimologia</b>
ARGISSOLOS	Do latim <i>argilla</i> , conotando solos com processo de acumulação de argila.
CAMBISSOLOS	Do latim <i>cambiare</i> , trocar; conotativo de solos em formação (transformação).
CHERNOSSOLOS	Do russo <i>chern</i> , negro; conotativo de solos ricos em matéria orgânica, com coloração escura
ESPODOSSOLOS	Do grego <i>spodos</i> , cinza vegetal, solos com horizonte de acumulação de materiais orgânicos e outros
GLEISSOLOS	Do russo <i>gley</i> , massa de solo pastosa; conotativo de excesso de água.
LATOSSOLOS	Do latim <i>lat</i> , material altamente alterado (tijolo); conotativo de elevado conteúdo de sesquióxidos.
LUVISSOLOS	Do latim <i>luere</i> , lavar; conotativo de acumulação de argila.
NEOSSOLOS	Do grego <i>néos</i> , novo, moderno; conotativo de solos jovens, em início de formação.

Continua

Quadro 4 - Classes de solo do SIBCS

Nomenclatura	Etimologia
NITOSSOLOS	Do latim <i>nitidus</i> , brilhante; conotativo de superfícies brilhantes em unidades estruturais.
ORGANOSSOLOS	Do grego <i>organikós</i> , pertinente ou próprio dos compostos de carbono. Conotativo de solos de constituição orgânica, ambientes de grande umidade.
PLANOSSOLOS	Do latim <i>planus</i> , plano, horizontal; conotativo de solos desenvolvidos com encharcamento superficial estacional.
PLINTOSSOLOS	Do grego <i>plinthos</i> , ladrilho; conotativo de materiais argilosos, coloridos, que endurecem quando expostos.
VERTISSOLOS	Do latim <i>vertere</i> ; conotativo de movimento na superfície do solo (expansão/contração).

Fonte: adaptado de IBGE (2007).

Segundo Uberti (2005) a cobertura pedológica catarinense, com base em Santa Catarina (1973 apud UBERTI, 2005) e Embrapa (2006), em relação ao desenvolvimento pedológico tem a seguinte hierarquia descendente: latossolo, nitossolo, argissolo, chernossolo, cambissolo, neossolo e organossolo. Resumidamente, as suas características são (OLIVEIRA, 2008):

- i. Latossolo: solos que apresentam elevado intemperismo com predomínio de argilas de baixa expansibilidade, como a caulinita, e elevada permeabilidade. Localizam-se em trechos bem drenados da paisagem e possuem grande espessura, sendo a classe mais representativa no Brasil.
- ii. Nitossolo: são solos profundos, de característica argilosa e boa permeabilidade. As superfícies dos agregados apresentam brilho característico, cerosidade, causado pelo acúmulo de argila.
- iii. Argissolo: são solos que apresentam maiores teores de argilas no horizonte subsuperficial em comparação ao superficial. Devido esta característica é mais suscetível a erosão. Apresentam profundidades variadas de rasos a profundos e encontram-se em relevo suave ondulado a ondulado.
- iv. Chernossolo: solos com elevado potencial agrícola, devido a elevada taxa de minerais essenciais ao desenvolvimento das

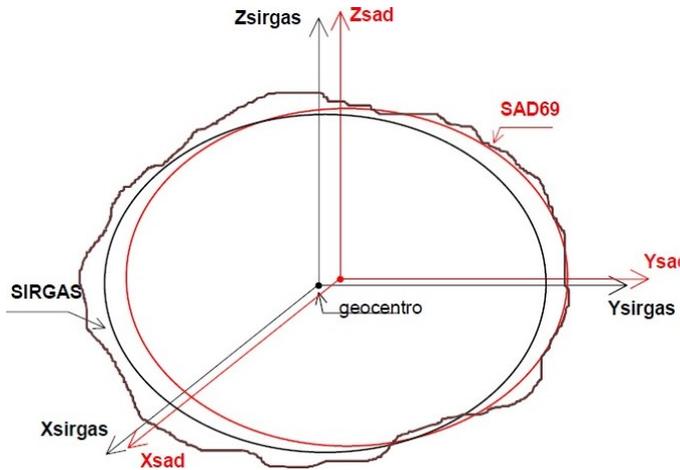
- plantas, e matéria orgânica - conferindo-lhe um horizonte superficial aerado e bem estruturado;
- v. Cambissolo: são solos em estágio intermediário de intemperismo, portanto não sofreram muitas alterações físicas e químicas. Ocorrem em qualquer forma de relevo desde plano a íngreme. Em igualdade de relevo e uso, são menos suscetíveis a erosão que os argissolos;
  - vi. Gleissolo: são solos geralmente encontrados em planícies aluviais. Possuem o lençol freático elevado durante a maior parte do ano, tendo como característica marcante a má drenagem;
  - vii. Neossolo: solos pouco espessos e muito jovens devido a pouca expressividade dos processos pedogenéticos, do tipo de material de origem e do relevo.
  - viii. Organossolo: solos poucos evoluídos, de origem orgânica, geralmente localizados em ambientes com má a muito mal drenados e com elevados teores de carbono orgânico. Possuem coloração preta, cinza muito escura ou marrom.

Para classificar um solo entre as 13 classes apresentadas, são analisados os horizontes diagnósticos de um perfil de solo. Por sua vez, estes horizontes diagnósticos são definidos com base em atributos geomorfológicos e analíticos. Devido a complexidade em resumir uma grande variedade de conceitos pedológicos necessários ao entendimento da classificação dos solos contida no SIBCS, recomenda-se a leitura de Prado (2003), EMBRAPA (2006), IBGE (2007), Oliveira (2008).

## 2.2. SISTEMAS GEODÉSICOS DE REFERÊNCIA

Um Sistema Geodésico de Referência (SGR) tem como objetivo permitir a identificação espacial de qualquer ponto sobre a superfície terrestre (DALAZOANA, 2000). Estes sistemas são definidos pelos órgãos ou instituições responsáveis pela cartografia em cada país (FERNANDES, 2009). Um SGR pode ser classificado, em termos de sua concepção, como global ou Sistema Geocêntrico, quando o sistema de coordenadas possui origem no centro geométrico da superfície de referência e o mesmo coincide com o centro de massa da Terra, e regional ou Sistema Topocêntrico, quando não coincide (Figura 3) (ROSOLEM et al., 2012).

Figura 3 – Referenciais topocêntricos e geocêntricos.



Fonte: IBGE (2000).

A irregularidade da superfície da Terra torna difícil e complexa a realização de cálculos sobre esta. Para a praticidade nos cálculos, desenvolveram-se na Geodésia diversos modelos de representação da superfície terrestre, dentre esses o geoide. O geoide é um modelo físico cuja superfície equipotencial é a que mais se aproxima do nível médio dos mares (GAMAEL, 1999 apud DALAZOANA, 2000). Verificou-se que o equacionamento do modelo ainda era complexo para defini-lo como referência geométrica. Assim um modelo matemático viável do ponto de vista geométrico é o elipsoide de revolução, cujos parâmetros são o semieixo maior e o achatamento (DALAZOANA, 2000).

Para implantar um SGR são necessárias duas etapas: as definições e materializações na superfície terrestre. A definição envolve a escolha de parâmetros, constantes e convenções necessárias se determinar a origem do sistema de coordenadas e de um elipsoide de revolução sobre o qual são impostas a posição e orientação espacial (FERNANDES, 2009; IBGE, 2000). A materialização inclui a coleta, processamento e análise de pontos definidos na superfície terrestre, aos quais é definido um conjunto de coordenadas de referência. (FERNANDES, 2009; UFRGS, 2014). Quanto à definição e orientação, os sistemas geodésicos de referências podem ser classificados em Clássico e Moderno (BASSO, 2010).

As diferenças básicas entre os sistemas clássicos e modernos, resumidamente, são a metodologias de determinação e orientação. Nos sistemas clássicos, topocêntricos, os métodos consistem em referências de pontos sobre a superfície terrestre de modo ajustar melhor o elipsoide a uma região. Enquanto os sistemas modernos, geocêntricos, os métodos adotados utilizam técnicas de posicionamento espacial de alta precisão e um elipsoide cujo centro coincide com o centro de massa da Terra, melhor ajustando o elipsoide ao geóide terrestre (BASSO, 2010).

No Brasil, o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) é o responsável pelo estabelecimento e manutenção do Sistema Geodésico Brasileiro (SGB) (DALAZOANA, 2000). O Brasil convive com diferentes sistemas geodésicos de referência, dos quais podem se destacar Córrego Alegre, SAD69 e o sistema oficial atual SIRGAS2000. A existência simultânea de vários SGR trás várias dificuldades e complicações, entre as quais se citam: analisar cartografia de diferentes épocas, trabalhar com Sistema de Informações Geográficas com dados advindos de diferentes bases cartográficas, entre outros (FERNANDES, 2009).

### 2.2.1. South America Datum of 1969

O *South American Datum of 1969* (SAD69), um sistema topocêntrico, é o resultado do propósito de um referencial uniforme para a América do Sul. O desenvolvimento deste projeto iniciou em 1944, foi definido em 1969 na XI Consulta Pan-americana em Cartografia, mas somente em 1979 foi adotado como SGR para trabalhos geodésicos e cartográficos no Brasil (FERNANDES, 2009).

A origem e orientação do elipsoide de referência, Elipsoide de Referência Internacional de 1967, foram estabelecidas de forma a minimizar a diferença em relação ao geóide na América do Sul e que tivesse uma rede de referência planimétrica continental. O ponto de origem adotado foi o vértice de triangulação Chuá, localizado no estado de Minas Gerais (DALAZOANA, 2000).

Na década de 80, O IBGE iniciou o reajustamento da rede geodésica brasileira e em 1996 este trabalho foi concluído. Podem-se inferir alguns motivos: corrigir distorções causadas pelo método utilizado na concepção inicial, inserção de novos pontos de controle e melhorar a precisão com o emprego de novos métodos, como o GPS. Este reajuste ficou conhecido como SAD69/96 (DALAZOANA, 2000; FERNANDES, 2009). As características principais do SAD69 podem ser resumidas como (IBGE, 2014b):

- i. Sistema topocêntrico;
- ii. Sistema de Referência: Geodetic Reference System 1967 – GRS67;
- iii. Figura geométrica da Terra: Elipsoide de Referência Internacional de 1967;
- iv. Semieixo maior:  $(a) = 6378160,0 \text{ m}$ ;
- v. Achatamento:  $1/298,247167427$ .

### 2.2.2. Sistema Geodésico de Referência para as Américas 2000

O Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS) foi criado na Conferência Internacional para Definição de um Referencial Geocêntrico para a América do Sul, desenvolvida pela Associação Internacional de Geodésia (IAG), Instituto Pan-americano de Geografia e História (IPGH) e da Agência Cartográfica do Departamento de Defesa dos EUA, em 1993. O novo SGR compreende as atividades necessárias à adoção no continente de um sistema de referência com precisão compatível as atuais de posicionamento, as quais estão relacionadas ao Sistema de posicionamento Global (BASSO, 2010).

Por ser um SGR moderno, o SIRGAS2000 possui um elipsoide de revolução, *Geodetic Reference System 1980* (GRS80), com centro coincidindo com centro de massa da Terra. A adoção desse novo sistema no continente americano contribui para o uso direto do GPS, garantindo a qualidade dos levantamentos GPS no território, além de compatibilização na produção cartográficas com os países vizinhos (IBGE, 2000). As características principais do SIRGAS2000 podem ser resumidas como (FERNANDES, 2009)

- i. Sistema geocêntrico ;
- ii. Sistema de Referência: International Terrestrial Reference System;
- iii. Figura geométrica para a Terra: Geodetic Reference System 1980 – GRS80,
- iv. Semieixo maior =  $6.378.137 \text{ m}$  ;
- v. Achatamento =  $1/298,257222101$  .

### 2.3. SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS

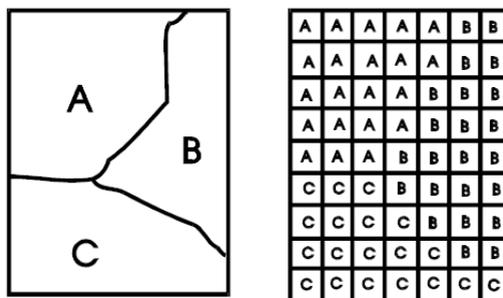
A obtenção de informações sobre a distribuição geográfica de matéria primas, propriedade, entre outras, sempre foi de interesse da sociedade. Antes do advento da informática essas análises eram realizadas sobre mapas e documentos em papel, o que impedia a combinação de dados. Com o desenvolvimento desta tecnologia, os dados antes em papel puderam ser representados nos computadores – surgindo então o Geoprocessamento (CÂMARA; DAVIS; MONTEIRO, 2001).

Geoprocessamento pode ser compreendido com uma área de conhecimento que se utiliza de técnicas matemáticas e computacionais para tratamento da informação geográfica, e que tem no Sistema de Informações Geográficas (SIG) suas ferramentas computacionais (CÂMARA; DAVIS; MONTEIRO, 2001).

Na literatura existem diversas definições de SIG. Rocha (2000, apud OLIVEIRA, 2011) conceitua como um sistema de para aquisição, armazenamento, análise, processamento e exibição de informações em ambiente digital georreferenciadas associadas ou não a dados alfanuméricos. Para McDonnell & Burrough (2009 apud ROSENFELDT, 2012) é uma ferramenta computacional que realiza diagnósticos complexos a partir de um banco de dados georreferenciados, formado por bases de dados de diversas fontes.

Os bancos de dados georreferenciados são formados por dados que estão associados a um sistema de coordenadas e um sistema de referência conhecido (MOLENAAR & OOSTEROM, 2009; FITZ, 2008 apud ROSENFELDT, 2012). Os dados em SIG podem ser representados de forma matricial (raster) e vetorial (Figura 4).

Figura 4 – Dado representado vetorialmente, a esquerda, e matricialmente, a direita.



Fonte: Câmara, Davis e Monteiro (2001).

Dados representados no formato matricial (Figura 5) consistem no uso de uma quadriculada, sendo sua dimensão em função do número de linhas e colunas. Assim, nesta representação o espaço é representado por uma matriz, onde cada célula (pixel) possui um número de linha e coluna, bem como o valor correspondente ao atributo estudado (CÂMARA; DAVIS; MONTEIRO, 2001). São exemplo de dados matriciais as fotografias aéreas, imagens de satélites, modelos numéricos do terreno, entre outros (HAMADA; GONÇALVES, 2007).

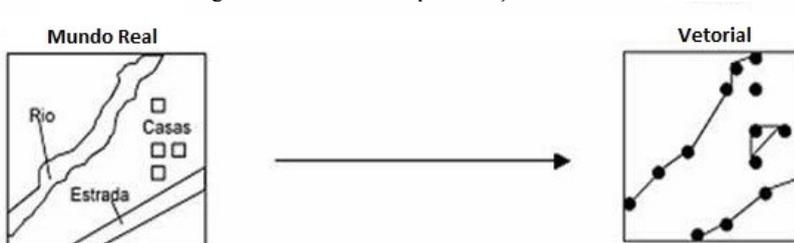
Figura 5 – Dados em representação matricial



Fonte: Silva (2004).

Nos dados vetoriais (Figura 6) busca-se representar os elementos ou objetos de forma mais fiel possível. Neste tipo de representação são utilizados três elementos gráficos: pontos, linhas e polígonos (áreas). Os pontos são pares ordenados de coordenadas geográficas, as linhas um conjunto de pontos conectados e polígonos são regiões limitadas por linhas de forma que o primeiro e último ponto sejam idênticos. Em todos estes elementos podem-se associar atributos (CÂMARA; DAVIS; MONTEIRO, 2001).

Figura 6 – Dados em representação vetorial.



Fonte: Silva (2004).

Além dos dados representados em forma vetorial e matricial existem os dados alfanuméricos. Conhecidos como atributos descritivos, são constituídos por caracteres, associados a um dado elemento ou objeto geográfico, que podem ser armazenados em tabelas, constituindo um banco de dados (FITZ, 2008; CÂMARA & MEDEIROS, 1998 apud PAZ, 2011). Estes atributos têm por objetivo fornecer informações qualitativas e/ou quantitativas das características de um elemento gráfico, estando sempre associado a um deles que, por sua vez, está vinculado a um sistema de referencia e coordenadas (USERY et. al., 2009 apud PAZ, 2011).

As informações geradas a partir do banco de dados podem ser representadas através de mapas temáticos e analisadas em conjunto com outras informações. Desta forma, o SIG auxilia a tomada de decisões e torna-se uma ferramenta essencial para o planejamento e gestão territorial.

#### 2.4. MAPEAMENTO GEOTÉCNICO

Segundo Mafra Jr. (2007) existem muitas definições de mapeamento geotécnico, sendo que muitas dessas têm a influência das metodologias utilizadas pelos autores.

Unesco (1976 apud XAVIER, 2010) define mapa geotécnico como um tipo de mapa geológico que representa todos os componentes geológicos significantes para planejamento do solo, projetos e obras relacionadas a engenharia civil e de minas.

Para Zuquette (1993 apud FRANCO et al., 2010) o mapeamento geotécnico é um processo que tem por objetivo levantar, avaliar e analisar características que compõem o meio físico. As informações geradas das análises dos dados visam auxiliar o planejamento, ocupação, manejo e conservação do espaço, minimizando problemas em curso e prevenindo os futuros.

O início do mapeamento geotécnico aconteceu por volta de 1913 na Feira de Construções de Leipzig, na Alemanha, com a exposição de documentos gráficos. A partir de então foram surgindo mapas com mais informações, análises mais complexas e classificações do meio físico para diferentes usos. Mesmo tendo início do século XX, somente após a II Guerra Mundial surgiram metodologias mais adequadas e de práticas mais sistemática (FRANCO et al., 2010)

Segundo Higashi (2002), o mapeamento geotécnico no Brasil iniciou-se em 1907 com a elaboração de um documento de geologia aplicada a obras de engenharia, referente ao prolongamento da estrada

de ferro Nordeste do Brasil. Mafra Jr. (2007) cita que a partir da década de 60, surgiram trabalhos mais consistentes baseados em metodologias estrangeiras, tendo na década de 80 o surgimento de metodologias brasileiras como a do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC-USP) e da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) – esta desenvolvida a partir do trabalho de Dias (1987).

De acordo com Paula e Cerri (2008 apud FRANCO et al., 2010) as cartas e mapas geotécnicos disponíveis na literatura internacional e nacional podem ser divididos em dois tipos: as com finalidade para subsidiar a implantação de projetos de engenharia e as com o objetivo de subsidiar o planejamento territorial e uso do solo – sendo este produzido em maior número àquele.

A causa do maior número de produção de carta e/ou mapas para fins de planejamento e gestão se relaciona ao crescimento desordenado das cidades e as ações antrópicas (FRANCO et al., 2010). Esta ocupação do espaço urbano de forma desordenada causa diversas consequências danosas à qualidade de vida da população e problemas de ordem social, econômico e físico (HIGASHI, 2006).

Assim o mapa geotécnico é um instrumento de gestão territorial, uma vez que estabelece o zoneamento do solo em unidades territoriais homogêneas, segundo os critérios do meio físico (SANTOS, 1997). Devido a diversas fontes de dados utilizados como, topográficos, geológicos, pedológicos, entre outros, essencialmente espaciais, a utilização de SIG se torna uma ferramenta imprescindível para a preparação de mapas geotécnicos.

#### 2.4.1. Metodologias

Ao longo do tempo diversas metodologias de elaboração de cartografia geotécnica foram e têm sido desenvolvidas, as quais apresentam características distintas tanto nos procedimentos quanto na forma de representação do resultado final (VALENTE, 1999 apud XAVIER, 2010). No Quadro 5, Kopezinski (2000, apud HIGASHI, 2006) apresenta algumas metodologias mundiais de mapeamento geotécnico.

Quadro 5 – Principais metodologias de mapeamento geotécnico segundo Kopezinski (2000).

METODOLOGIA	ESCALA	FINALIDADE	UTILIZAÇÃO
IAEG (Internacional)	<1:100.000 >1:10.000	Específica Multifinalidade	Planejamento urbano e regional
Francesa	Regional Local <1:100.000 >1:2.000	Específica Regional	Planejamento urbano e regional
PUCE (Austrália)	Qualquer <1:2.500.000 >1:2.500	Específica Regional	Planejamento urbano e regional
Britânica (inglesa)	>1:10.000 <1:2.500	Específica Multifinalidade	Planejamento urbano e regional
Russa	<1:100.000.000 >500.000	Específica Regional	Planejamento urbano e regional
Hinojosa e Leon	<1:1.000.000 >500.000	Específica	Planejamento e projeto de estradas
ZERMOS	>1:50.000	Específica	Movimento de massa (planejamento)
Espanhola	>1:200.000 <1:2.000	Específica Regional	Planejamento regional e territorial
USA (Kiefer)	Regional e local	Específica Regional	Planejamento urbano e regional
Canadá	Regional e local	Específica Multifinalidade	Planejamento urbano e regional

Fonte: Kopezinski (2000 apud HIGASHI, 2006).

Serão apresentadas a seguir, sucintamente, a metodologia internacional IAEG e as metodologias nacionais propostas por Zuquette (1987 apud FRANCO et al., 2010) e Dias (1995).

#### a) Metodologia IAEG

Esta metodologia foi desenvolvida pela *Internacional Association of Engineering Geology* (IAEG) em 1976 e consistia em estabelecer um padrão internacional de mapeamento geotécnico viável tanto tecnicamente quanto economicamente a maiorias dos países (XAVIER, 2010).

Dentre os principais conceitos desta metodologia estão: o mapa geotécnico deve conter informações objetivas e necessárias a avaliação das características geotécnicas, bem como permitir o entendimento por profissionais de outras áreas, e prever as variações de situações geológicas (BASTOS, 2005).

Quanto aos conteúdos, os mapas podem ser classificados como analíticos, sintéticos, auxiliares e complementares. Os analíticos avaliam elementos individuais do meio geológico, os sintéticos apresentam um resumo das características geotécnicas, os auxiliares expõem

informações secundárias para elaboração de outros mapas e por fim os complementares apresentam informações obtidas por interpretação (BASTOS, 2005).

b) Metodologia Zuquette (1987 apud FRANCO et al., 2010)

A metodologia de Zuquette foi desenvolvida através de mapeamentos geotécnicos realizados pelo Departamento de Geotecnia da Universidade de São Paulo. A metodologia é abrangente, tendo como princípio básico o procedimento global do processo, desde a obtenção dos atributos até o resultado das cartas para os usuários (FRANCO et al., 2010)

O método compreende na análise do meio físico, rocha, água, relevo, entre outros, como fundamento para definir e identificar unidades homogêneas, que servirão de insumos para implementar o planejamento (MAFRA JR., 2007).

Os principais documentos elaborados no mapeamento geotécnico através desta metodologia são mapas básicos fundamentais, que representam o meio físico, mapas básicos opcionais, complementam os mapas básicos fundamentais, mapas auxiliares que registram os dados qualitativos e quantitativos, e as cartas derivadas - contendo informações obtidas através de análises dos mapas citados anteriormente (FRANCO et al., 2010).

c) Metodologia Dias (1995)

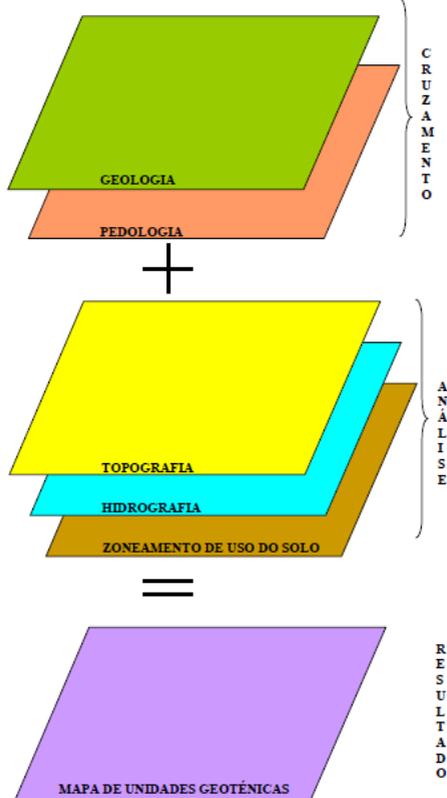
A Metodologia de Regina Davison Dias (1995) é uma metodologia destinada ao mapeamento de grandes áreas de solos tropicais e tem objetivo de prever o comportamento do solo ao relaciona-lo com a sua gênese (HIGASHI, 2002). Para tanto, consiste na estimativa de unidades geotécnicas, que são unidade territoriais homogêneas com ocorrência de solos de gênese, geomorfologia e comportamento geotécnico semelhantes frente ao uso e ocupação do solo (DIAS, 1995; XAVIER, 2010).

Para se estimar as unidades geotécnicas utilizam-se cartas pedológicas, geológicas e topográficas. As cartas geológicas permitem inferir os atributos do horizonte saprolítico, enquanto as cartas pedológicas permitem inferir os atributos dos horizontes superficiais do solo. Já as cartas topográficas auxiliam na delimitação das unidades, há variação de tipos de solos em diferentes posições da declividade do terreno (DIAS, 1995).

Resumidamente, a metodologia sobrepõe a informação dos mapas geológico e pedológico, conjuntamente a outros fatores físicos, com

indicações de comportamento dos solos para elaborar o mapa geotécnico preliminar (Figura 7). A partir deste procede-se a trabalhos de campo para verificar unidades geradas e confirmar seus limites e coletar amostras para averiguar as propriedades geotécnicas (HIGASHI, 2006; MAFRA JR, 2007).

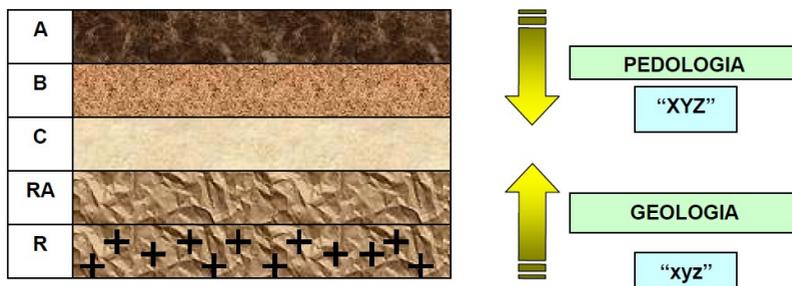
Figura 7 – Princípio básico da metodologia elaborada por Dias (1995).



Fonte: (MAFRA JR., 2007).

A identificação das unidades geotécnicas no mapa geotécnico gerado são feitas através da simbologia “XYZxyz”, na qual as letras maiúsculas representam a classificação pedológica e as minúsculas a classificação (Figura 8)(DIAS, 1995).

Figura 8 – Simbologia das unidades geotécnicas segundo Dias (1995).



Fonte: (HIGASHI, 2002).

Higashi (2006) ressalta que a classificação geotécnica não deve ser confundida com a classificação pedológica, neste caso possível por conta da simbologia semelhante. Enquanto as unidades pedológicas têm por razão caracterizar os solos para propósitos principalmente agrícolas, as unidades geotécnicas abordam o comportamento para fins de utilização do solo para obras e projetos de engenharia, com o objetivo de obter parâmetros para avaliar os atributos hidráulicos e mecânico dos solos.

A metodologia tem sido utilizada e tendo sua técnica comprovada em teses e dissertações as quais podem se citar Santos (1997), Lima Jr. (2002), Higashi (2002, 2006), Mafra Jr. (2007) e Xavier (2010). Por esse motivo será a metodologia base neste trabalho.

## 2.5. TALUDES

Um talude é uma superfície de solo ou rocha exposta, que forma um ângulo com a superfície horizontal, podendo ser classificado como natural ou artificial (DAS, 2011). Um talude artificial pode ser resultante de cortes de encostas, escavações ou de aterros, normalmente possuindo superfície plana e com solo e/ou rocha de características conhecidas. Um talude natural, encostas, é resultante do processo de intemperismo e transporte de sedimentos, de superfície curvilínea côncava ou convexa, formado por solos e rochas com comportamentos distintos.

### 2.5.1. Resistência ao cisalhamento

A resistência ao cisalhamento é o parâmetro do solo responsável por suportar as cargas e manter sua estabilidade, desta maneira quando a massa de solo se rompe este parâmetro é excedido (CAPUTO, 1988). Para diversos problemas de mecânica dos solos, inclusive para a estabilidade de taludes, pode-se aplicar a equação do Critério de ruptura de Mohr-Coloumb (DAS, 2011):

$$\tau = c + \sigma \operatorname{tg} \emptyset \quad (1)$$

onde:

$\tau$  = resistência ao cisalhamento;

$c$  = coesão;

$\sigma$  = tensão normal ao plano de ruptura;

$\emptyset$  = ângulo de atrito interno.

A coesão do solo pode ser dividida entre coesão “aparente” e coesão “verdadeira”. No caso da coesão “aparente” esta é gerada pelas tensões capilares da água entre as partículas, enquanto na coesão “verdadeira” é gerada pela atração eletroquímica das partículas de argila. O atrito interno é causado pelo contato físico entre as partículas e o seus entrosamentos, devido a infinidade de contatos pontuais dentro da massa de solo (CAPUTO, 1988).

Em um solo saturado, onde os vazios entre os grãos estão totalmente preenchidos por água, a tensão normal total é a soma entre a tensão efetiva ( $\sigma'$ ), suportada pelas partículas sólidas do solo, e a poropressão ou tensão neutra ( $\mu$ ), suportada pela água (DAS, 2011):

$$\sigma = \sigma' + \mu \quad (2)$$

Reescrevendo o critério de Mohr-Coloumb em função da tensão efetiva (CAPUTO, 1988):

$$\tau = c' + (\sigma - \mu) \operatorname{tg} \emptyset' \quad (3)$$

onde:

$c'$  = coesão com base na tensão efetiva;

$\emptyset'$  = ângulo de atrito interno com base na tensão efetiva.

Para se determinar os parâmetros de resistência ao cisalhamento ( $c', \phi', c, \phi$ ), há vários métodos de ensaios disponíveis como, ensaio de cisalhamento direto, ensaio triaxial e ensaio de cisalhamento de palheta (DAS, 2011).

## 2.6. ESTABILIDADE DE TALUDES

Se a superfície do talude não é horizontal, então há uma componente da gravidade que tende a movimentar o solo para baixo e se essa for grande o suficiente pode ocorrer a ruptura do talude (DAS, 2011). Desta maneira é necessário estabelecer sua estabilidade, a fim de garantir a segurança de pessoas e patrimônios. Dentro da análise determinística da estabilidade de taludes há dois grupos: os métodos baseados em deslocamentos, cujo principal é o de elementos finitos, e os métodos baseados no equilíbrio limite (TONUS, 2009).

No Método de Elementos Finitos pretende-se determinar o campo de deslocamento e tensões do talude, a partir do conhecimento das características e propriedades do solo e relevo, sobre determinadas solicitações e condições de contorno (DELGADO, 1987 apud SILVA, 2012). Resumidamente, o método assume as propriedades do material e do meio, bem como as suas condicionantes, sem realizar muitas simplificações (SILVA, 2012).

Nos Métodos de Equilíbrio Limite parte-se da hipótese de uma massa de solo estar em equilíbrio, assumindo esta como corpo rígido-plástico, mas na iminência de colapsar. Analisando-se as forças atuantes por meio de equações de equilíbrio, determina-se a tensão de cisalhamento induzida na superfície de ruptura ( $\tau_d$ ) e se compara a resistência de cisalhamento do solo ( $\tau$ ) (MASSAD, 2010). Assim, obtém-se um coeficiente ou fator de segurança (FS) expresso por:

$$FS = \frac{\tau}{\tau_d} \quad (4)$$

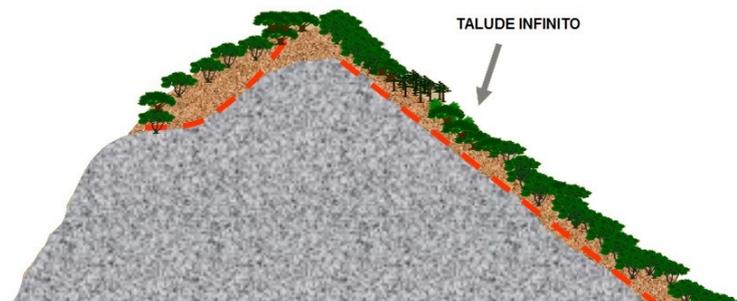
A partir da equação (acima) verifica-se que quando  $FS < 1,0$  o talude se rompe, as forças solicitantes são maiores que as resistentes,  $FS = 1,0$  está na eminência da ruptura e  $FS > 1,0$ , está seguro. No Brasil, para garantir a segurança dos taludes a NBR 11682:2009 define que o fator de segurança é estabelecido em função do grau de risco, alto, médio ou baixo, de perdas humanas, danos materiais e ambientais - sendo o valor mínimo admitido variando no intervalo de 1,2 a 1,5.

Entre os métodos expostos, será adotado o de equilíbrio limite – por se tratar de um método mais simples. Dentro deste existem vários modelos de verificação da segurança dos taludes que variam de acordo com as hipóteses simplificadoras adotadas para cada um deles. Resumidamente apresentar-se-ão os métodos de taludes infinitos e dentre os de taludes finitos, o método de Fellenius e Bishop Simplificado.

### 2.6.1. Taludes infinitos

Segundo Massad (2010), um talude caracterizado como infinito é uma encosta natural que possui grande extensão, centenas de metros, e um solo com espessura de poucos metros (Figura 9).

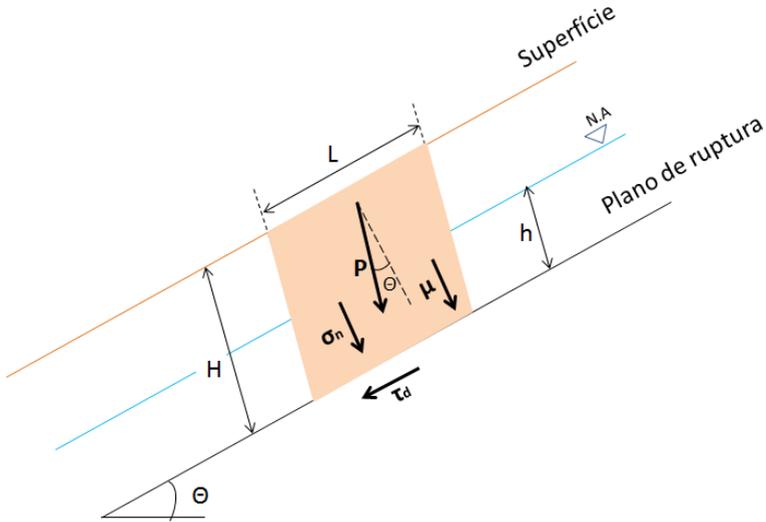
Figura 9 – Talude Infinito no lado direito da encosta.



Fonte: Autor.

No caso da estabilidade de taludes infinitos, a análise da ruptura assume que a superfície de ruptura é um plano paralelo ao solo, desprezando os efeitos de borda e atritos laterais, já que as dimensões principais da encosta são muito superiores a altura do rompimento (MICHEL; KOBAYAMA; GOERL, 2014). A Figura 10 permite compreender a dedução das equações até se chegar ao fator de segurança.

Figura 10 – Forças atuantes em uma lamela genérica de talude infinito.



Fonte: Autor.

A partir da análise da figura acima, decompondo as forças, tem-se:

$$\sigma_n = \frac{P \cos \theta}{L \times 1} \quad (5)$$

$$\tau_d = \frac{P \operatorname{sen} \theta}{L \times 1} \quad (6)$$

$$\mu = \frac{P_w \cos \theta}{L \times 1} \quad (7)$$

Onde:

- $\tau_d$  = tensão de cisalhamento induzida;
- $\sigma_n$  = tensão normal ao plano de ruptura;
- $\mu$  = poropressão ou tensão neutra;
- $L$  = comprimento do bloco;
- $\theta$  = inclinação da encosta ou talude;
- $P$  = peso do bloco de solo;
- $P_w$  = peso exercido pela coluna de água.

Decompondo as dimensões do bloco de solo da Figura 10, os pesos são expressos por:

$$P = \gamma \times g \times H \cos \theta \times L \quad (8)$$

$$P_w = \gamma_w \times g \times h \cos \theta \times L \quad (9)$$

Sendo  $\gamma$  a massa específica do solo,  $\gamma_w$  a massa específica da água,  $H$  a espessura do solo,  $h$  a altura da coluna de água e  $g$  a aceleração da gravidade. Substituindo (8) e (9) em (5), (6) e (7) obtêm-se:

$$\sigma_n = \sigma = \gamma \times g \times H \cos^2 \theta \quad (10)$$

$$\tau_d = \gamma \times g \times H \cos \theta \sin \theta \quad (11)$$

$$\mu = \gamma_w \times g \times h \cos^2 \theta \quad (12)$$

Para obter o fator de segurança em termo de tensões efetivas, equação (13), substitui-se as equações (10), (11) e (12) em (3) e posteriormente em (4).

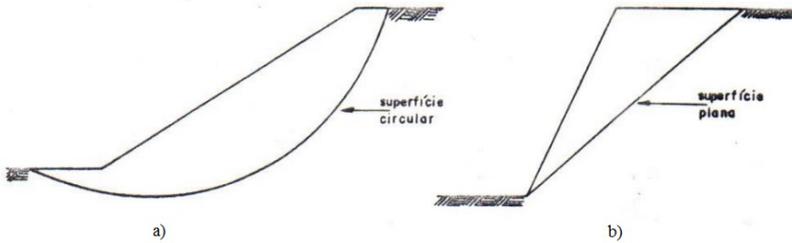
$$FS = \frac{c + (\gamma H \cos^2 \theta - \gamma_w h \cos^2 \theta) \operatorname{tg} \phi}{\gamma \times g \times H \cos \theta \sin \theta} \quad (13)$$

## 2.6.2. Taludes finitos

Um talude pode ser considerado finito quando a espessura do solo até a superfície de ruptura se aproxima da altura do talude. Ao analisar a estabilidade de um talude finito deve-se inferir qual será a forma da superfície potencial de ruptura. Quanta a forma, estas podem ser planas ou curvas (Figura 11) (DAS, 2011).

Segundo Das (2011), a aproximação da superfície de ruptura plana gera bons resultados para talude quase verticais. A partir de 1920, estudos desenvolvidos por suecos recomendaram que a superfície de ruptura fosse aproximada de um arco de círculo – a qual é convencionalmente utilizada até hoje.

Figura 11 – Superfícies de ruptura de taludes, a) superfície circular e b) plana.



Fonte: Autor.

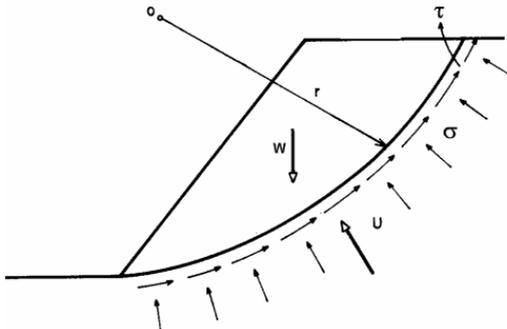
Independente da forma, não se sabe a posição da superfície de ruptura, então deve arbitrar várias delas até se definir o menor fator de segurança associado a essas (MASSAD, 2010).

#### 2.6.2.1. Superfícies curvas

Para a análise de taludes finitos com este tipo de superfície de ruptura têm-se, em geral, duas classes de procedimentos: procedimento de massa e método de fatias.

No procedimento de massa (Figura 12) assume-se o solo acima da superfície de ruptura como uma massa única. Este tipo de procedimento é vantajoso quando se tem um talude com solo homogêneo – o que dificilmente encontra-se em encostas naturais.

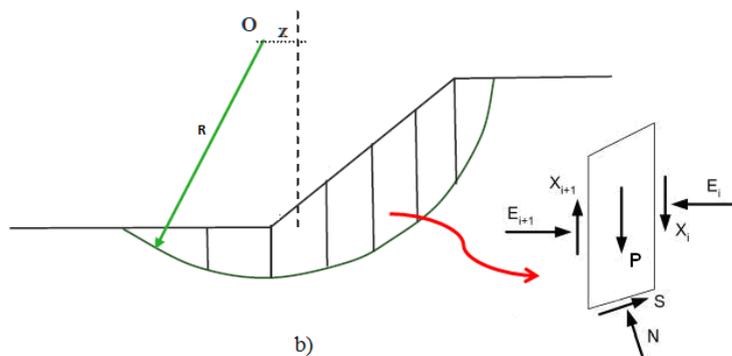
Figura 12 - Procedimento de massa.



Fonte: Autor.

Já no procedimento dos métodos de fatias (Figura 13), o solo sobre a superfície de ruptura é dividido em diversas fatias verticais paralelas e a estabilidade de cada uma é analisada separadamente. O método permite considerar a heterogeneidade do solo, poropressão e a variação da tensão normal ao longo da superfície de ruptura arbitrada (DAS, 2011).

Figura 13 – Método das fatias.



Fonte: Autor.

A solução para análises de taludes finitos pelo método das fatias é hiperestática, pois se tem mais incógnitas que equações de equilíbrio disponíveis. Desta maneira, adotam-se hipóteses simplificadoras e por existirem diversas, conseqüentemente existem diferentes métodos em uso. Para os métodos de Fellenius e Bishop Simplificados que serão apresentados a seguir, que utilizam-se do procedimento das fatias, estes se diferenciam basicamente pela direção da resultante das forças laterais e verticais que atuam na lamela (MASSAD, 2010).

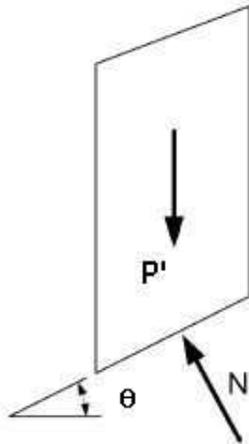
Segundo Massad (2010) devem-se admitir para estes dois métodos que a linha de ruptura seja um arco de circunferência e dividir a massa de solo em fatias. As fatias não precisam ter a mesma espessura e assumem-se as suas bases como planas, assim pode-se dividi-las de forma que a base de cada uma esteja em um tipo de solo (CHOWDHURY, 1978 apud TONUS, 2009). Para estabelecer o arco de circunferência crítico ao qual está associado o fator de segurança (FS) mínimo, define-se uma malha de círculos impondo determinadas condições, por exemplo, passando por determinado ponto do talude, determina-se o FS para cada um até se obter o valor mínimo (MASSAD,

2010). Atualmente este procedimento é facilitado pelo uso computacional.

a) Método de Fellenius

O Método de Fellenius admite a superfície de ruptura circular e considera apenas uma das equações de equilíbrio, o equilíbrio de momentos em relação ao centro do arco da linha de ruptura (TONUS, 2009). De acordo com Massad (2010), fazendo-se o equilíbrio das forças na direção normal a base da fatia (Figura 14) o fator de segurança é expresso por:

Figura 14 – Forças atuantes no método de Fellenius.



Fonte: Tonus (2009).

$$FS = \frac{\sum[c' \times l + (P \cos \theta - \mu \times \Delta x \times \text{sen } \theta) \times \text{tg } \phi']}{\sum(P \text{ sen } \theta)} \quad (14)$$

Onde:

$c'$  = coesão do solo no centro da fatia em termo de tensão efetiva;

$\phi'$  = ângulo de atrito interno do solo no centro da fatia em termo de tensão efetiva;

$\mu$  = poropressão ou tensão neutra no centro da fatia;

$l$  = comprimento da base da fatia;

$\theta$  = inclinação da base da fatia;

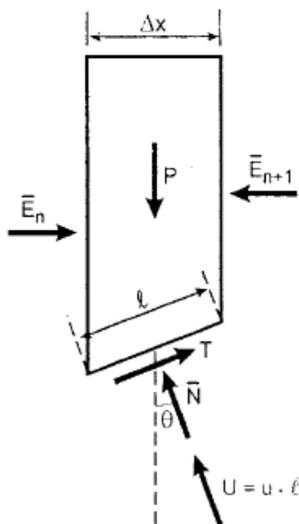
$P$  = peso da fatia;

Dentre as limitações do método estão: a negligência das forças laterais da fatia, resultantes da decomposição das poropressões, e não analisar o equilíbrio das forças horizontais e verticais. O método de Fellenius ainda é utilizado pela sua simplicidade, embora seus resultados sejam conservadores que métodos mais rigorosos, como Bishop Simplificado – o que pode inviabilizar economicamente alguns projetos (TONUS, 2009; MASSAD, 2010)

#### b) Método de Bishop Simplificado

Diferentemente do método de Fellenius, o método de Bishop Simplificado considera o equilíbrio das forças na direção vertical (Figura 15). Assim além de verificar a condição de equilíbrios de momentos em relação ao centro do arco de circunferência, verifica também o equilíbrio das forças verticais (TONUS, 2009).

Figura 15 – Forças atuantes em uma fatia genérica no método de Bishop Simplificado.



Fonte: Massad (2010).

Segundo Massad (2010) o fator de segurança resulta em:

$$FS = \frac{\sum \left[ c' \times l + \frac{P - (\mu \times \Delta x) - (c' \times \Delta x \times \text{tg } \theta + FS)}{\cos \theta + (\text{tg } \theta' \times \text{sen } \theta + FS)} \text{tg } \theta' \right]}{\sum (P \text{ sen } \theta)} \quad (15)$$

Onde:

$c'$  = coesão do solo no centro da fatia em termo de tensão efetiva;

$\theta'$  = ângulo de atrito interno do solo no centro da fatia em termo de tensão efetiva;

$\mu$  = poropressão ou tensão neutra no centro da fatia;

$l$  = comprimento da base da fatia;

$\theta$  = inclinação da base da fatia;

$P$  = peso da fatia;

$\Delta x$  = espessura da fatia.

Analisando a equação (15) verifica-se que o FS aparece nos dois lados da igualdade, tornando o cálculo para obter o resultado iterativo. Para resolver pode-se adotar um valor  $FS_1$  e verificar com o resultado obtido,  $FS_2$ , se a precisão dos valores não for atendida, repete-se o processo adotando  $FS_2$  e compara-se com o seu resultado, assim por diante. O processo pode ser acelerado se utilizar o método de cálculo numérico de Newton-Raphson (MASSAD, 2010).

O método de Bishop não satisfaz o equilíbrio de forças horizontais e também pode apresentar problemas numéricos, por exemplo, na região do pé de talude quando o ângulo da base da fatia é negativo.

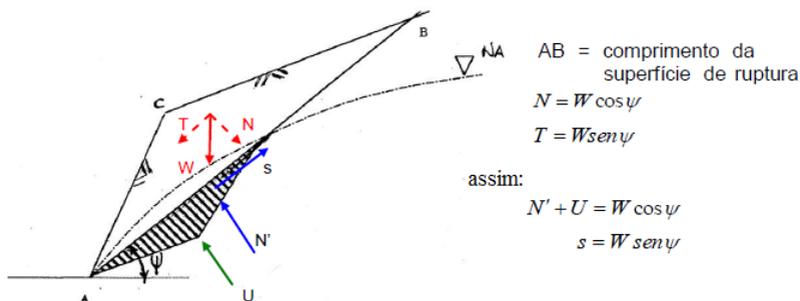
### 2.6.2.2. Superfícies planas

Embora normalmente as rupturas de taludes aconteçam com superfícies circulares, há também as que ocorrem em superfícies planas. Este tipo de linha de ruptura pode acontecer quando há uma transição clara entre dois materiais diferentes, por exemplo, no contato solo-rocha de um talude de solo pouco profundo. Um dos métodos existente para o cálculo deste tipo de superfície de ruptura é o de Culmann.

#### a) Método de Culmann

O método assume a hipótese de que a superfície de ruptura do talude ocorre em um plano que intercepta o pé do talude e a massa de solo (cunha) sobre esta é única, ou seja, não há seccionamento em fatias (Figura 16) (MASSAD, 2010).

Figura 16 – Esforços atuantes na cunha de solo no método de Culmann.



Fonte: adaptado de Gerscovich (2009).

O rompimento do talude acontece quando a tensão cisalhante induzida média é maior que a resistência ao cisalhamento do solo. O fato de segurança é dado por:

$$FS = \frac{c' \times \overline{AB} + (W \times \cos \psi - U) \operatorname{tg} \phi'}{W \times \cos \psi} \quad (16)$$

Onde:

$c'$  = coesão do centro da cunha em termo de tensão efetiva;

$\phi'$  = ângulo de atrito interno do solo no centro da cunha em termo de tensão efetiva;

$U$  = força resultante da poropressão no centro da cunha;

$AB$  = comprimento da linha de ruptura;

$\psi$  = inclinação da linha de ruptura;

$W$  = peso da cunha.

Assim como para os métodos anteriores deve-se os calcular até se obter o FS mínimo na superfície de ruptura crítica. O método de Culmann apresenta bons resultados para quando o solo se encontra seco e a inclinação do talude for alta, próxima de  $90^\circ$  (MASSAD, 2010).

## 2.7. MOVIMENTOS DE MASSA

Movimentos de massa podem ser compreendidos como movimentos coletivos de materiais sólidos, por exemplo, solos, rochas e vegetação, encosta abaixo influenciados pela ação da gravidade (SELBY, 1993 apud KOBAYAMA et al., 2006).

Existe na natureza a tendência dos solos das encostas descenderem até atingir um nível base, ou seja, pode-se se dizer que em condições normais o fator de segurança dessas encostas seja próximo de 1 - na eminência de entrar em movimento (MASSAD, 2010). Assim chuvas atípicas fornecem condições para a diminuição da capacidade resistiva do solo, tornando a precipitação como um dos principais agentes deflagradores de movimento de encostas em ambientes tropicais úmidos (GUIDICINI; IWASA, 1976 apud KOBAYAMA et al, 2006). Dentre os fatores de influencia antrópica para deflagração de escorregamentos Massad (2010) destaca: alteração da geometria do talude, desmatamento e sobrecargas no topo das encostas.

Existem diversas formas de classificar os movimentos de massa, como quanto a velocidade e direção do movimento, profundidade, tipo de material, geometria, entre outros (FERNANDES, 2000). Dentre as diversas classificações, se apresentará a de Augusto Filho (1992 apud BRASIL, 2006) que divide os movimentos em quatro grupos principais: rastejos, escorregamentos, quedas e corridas (Quadro 6).

Quadro 6 – Principais movimentos de massas associados a encostas.

PROCESSOS	DINÂMICA/GEOMETRIA/MATERIAL
<b>Rastejos</b> ( <i>creep</i> )	Vários planos de deslocamento (internos); Velocidades muito baixas (cm/ano) a baixas e decrescentes com a profundidade; Movimentos constantes, sazonais ou intermitentes; Solo, depósitos, rocha alterada/fraturada e; Geometria indefinida.
<b>Escorregamentos</b> ( <i>slides</i> )	Poucos planos de deslocamento (externos); Velocidades médias (m/h) a altas (m/s); Pequenos a grandes volumes de material; Geometria e materiais variáveis: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Planares – solos pouco espessos, solos e rochas com 1 plano de fraqueza;</li> <li>• Circulares – solos espessos homogêneos e rochas muito fraturadas;</li> <li>• Em cunha – solos e rochas com dois planos de fraqueza.</li> </ul>
<b>Quedas</b> ( <i>falls</i> )	Sem planos de deslocamento; Movimentos tipo queda livre ou em plano inclinado; Velocidades muito altas (vários m/s); Material rochoso; Pequenos a médios volumes; Geometria variável: lascas, placas, blocos, etc; Rolamento de matacão e; Tombamento.
<b>Corridas</b> ( <i>flows</i> )	Muitas superfícies de deslocamento; Movimento semelhante ao de um líquido viscoso; Desenvolvimento ao longo das drenagens; Velocidades médias a altas; Mobilização de solo, rocha, detritos e água; Grandes volumes de material e; Extenso raio de alcance, mesmo em áreas planas.

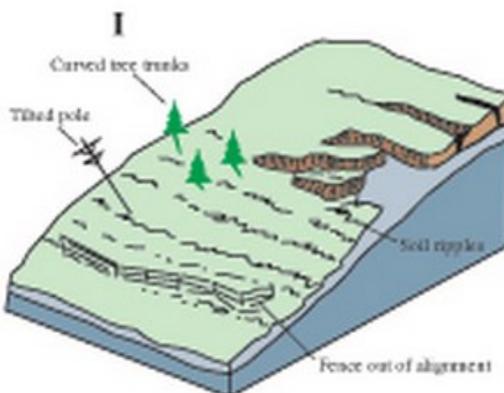
Fonte: Augusto Filho (1992 apud LISTO, 2011).

### 2.7.1. Rastejo

Rastejos são movimentos lentos, na ordem de milímetros a centímetros por ano, que envolvem grande quantidade de materiais sem uma superfície de ruptura definida, podendo atuar no solo superficial e/ou até as rochas em profundidade maiores (BRASIL, 2006) (Figura 17).

Geralmente não são de muita importância para a engenharia, exceto quando o empuxo de terra pode afetar estruturas situadas na massa em movimento (MASSAD, 2010). Entre as evidências de ocorrência de rastejos estão árvores e postes inclinados, trincas no solo que evoluem vagarosamente, degraus de abatimentos nas encostas (BRASIL, 2006).

Figura 17 – Rastejo (creep)



Fonte: USGS (2014).

### 2.7.2. Escorregamentos

Os escorregamentos ou deslizamentos, como também são chamados, são movimentos de massas com superfície de ruptura bem definida e volume instabilizado que pode ser facilmente inferido. Possuem velocidades variando de média, metros por hora, a alta, metros por segundos, além de curta duração e terem elevado poder destrutivo. (BRASIL, 2006; KOBIYAMA et al., 2006).

Segundo Augusto Filho (1992 apud FERNANDES, 2000) o mecanismo de ruptura dos deslizamentos acontecem pela queda da resistência e/ou aumento das tensões atuantes, em curto período de

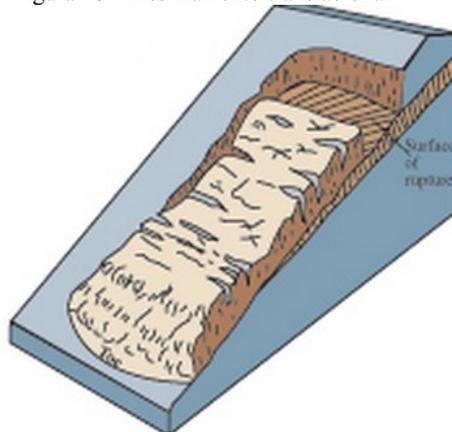
tempo, levando o talude ou encostas a rupturas por tensões de cisalhamento. Diferentes deslizamentos podem ser classificados quanto a geometria e o material instabilizado. Em função da geometria da superfície de ruptura os escorregamentos podem ser classificados em translacionais e rotacionais, sendo que a geometria é função da existência ou não de fraqueza nos materiais movimentados (MASSAD, 2010).

#### a) Translacionais

Deslizamentos translacionais caracterizam-se por possuírem uma superfície de ruptura relativamente plana, de pouca espessura e forma retangular estreita, devido a largura inferior ao comprimento (Figura 18). No Brasil, são fenômenos frequentes na dinâmica das encostas serranas, principalmente em solos poucos desenvolvidos com altas declividades (BRASIL, 2006).

Este tipo de escorregamento pode movimentar tanto rocha quanto solo e está condicionado à planos de fraqueza nos materiais, como contato de solos com diferentes permeabilidade, fraturas, foliações, xistosidades em rochas (FERNANDES, 2000). Quando existem dois planos de fraqueza desfavoráveis a estabilidade da encosta e estes condiciona o movimento de massa ao longo do eixo de intersecção, chamam-se estes deslizamentos em cunha (LISTO, 2011).

Figura 18 – Deslizamento translacional



Fonte: USGS (2014).

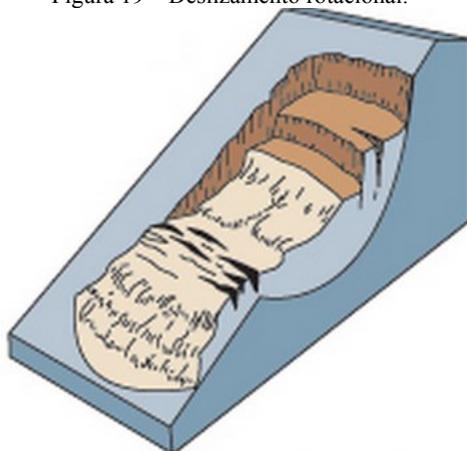
## b) Rotacionais

Deslizamentos rotacionais são caracterizados por possuírem a superfície de ruptura curva, comumente combinadas e sucessivas (Figura 19) (BRASIL, 2006). Segundo Fernandes e Amaral (1996 apud LISTO, 2011) estão associados a ambientes de solos profundo que permitem maior infiltração e percolação de água.

Nestes tipos de escorregamentos o movimento acontece em torno do centro do arco de circunferência, sendo, em princípio, o peso da cunha a força responsável pelo colapso enquanto a resistência ao cisalhamento ao longo da superfície de ruptura a força resistiva (GUIDICINI; NIEBLE, 1983 apud FERNANDES, 2000).

Ressalta-se que deslizamentos rotacionais puros, ou seja, com superfície de escorregamento circular, ocorre em materiais homogêneos, por exemplo, barragens de terra e aterros em geral. Entretanto, os materiais naturais, por exemplo, encostas, frequentemente não são homogêneos, consequentemente as superfícies de ruptura são mais complexas que a circular (FERNANDES, 2000).

Figura 19 – Deslizamento rotacional.



Fonte: USGS (2014).

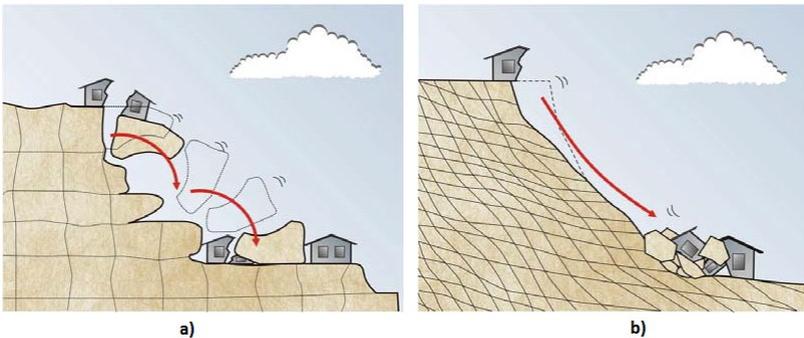
### 2.7.3. Quedas

As quedas são materiais, principalmente rochosos, que se desprendem de encostas muito íngremes ou escarpas e caem abaixo em movimento de queda livre, saltos e/ou rolamentos – sem deslocamento cisalhamento (FERNANDES, 2000). A velocidade que os blocos e/ou lascas desenvolvem são muito altas, tornando a trajetória deste fenômeno a maior preocupação relacionada ao processo (KOBİYAMA et al., 2006)

As ocorrências de quedas estão relacionadas a afloramentos rochosos em encostas íngremes, abruptas e/ou taludes de escavação em rocha. A principal causa deste fenômeno é a descontinuidade do maciço rochoso, que permitem o isolamento de um bloco ou lasca. A infiltração de água, a penetração de raízes e as amplitudes térmicas potencializam a ocorrência, assim como ações antrópicas como, vibrações decorrentes de detonações (BRASIL, 2006).

Além das quedas existem o tombamento e o rolamento (Figura 20). No tombamento as descontinuidades na rocha são verticais, se diferenciando das quedas pela rotação do bloco e ocorrem principalmente em taludes de corte. O rolamento acontece comumente em áreas de rochas graníticas, quando processos erosivos e/ou ação antrópica removem o apoio da base de matacões e este inicia o movimento por ação da gravidade (BRASIL, 2006).

Figura 20 - a) Tombamento e b) rolamento.



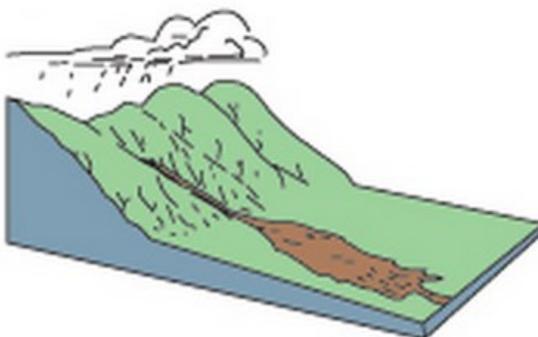
Fonte: AGS (2007e)

#### 2.7.4. Corridas

As corridas são formadas movimentos de massa complexos com alto poder de transporte, que se comportam como fluidos altamente viscosos, assim adquirem velocidades muito altas. Dependendo da viscosidade e do material recebem nomes específicos, por exemplo, fluxos de terra (earthflows) e fluxo de detritos (debrisflows) (Figura 21) (BRASIL, 2006).

Estes fenômenos estão relacionados a eventos pluviométricos excepcionais e são mais raros de acontecer. Embora não sejam comuns, possuem poder de destruição superior aos deslizamentos, destruindo tudo pelo caminho desde a encosta até na planície de deposição (KOBAYAMA et al., 2006). Geralmente as corridas iniciam-se como um deslizamento que quando condicionado em um canal de drenagem assume a forma de um fluxo (AUSTO FILHO, 1992 apud LISTO, 2011).

Figura 21 - Corrida de detritos.



Fonte: USGS (2014)

#### 2.8. MÉTODOS DE PREVISÃO DE ÁREAS SUSCETÍVEIS A DESLIZAMENTOS RASOS

Os deslizamentos de solos são processos naturais e/ou antrópicos de formação e evolução da paisagem, além de contribuírem para a manutenção de canais e oferta de sedimentos da encosta para o sistema fluvial (MICHEL; KOBAYAMA; GOERL, 2014). Com a disponibilidade de dados do local, vários métodos podem ser aplicados

para estabelecer os níveis de suscetibilidade e risco em ambiente SIG. Dentre os vários métodos indiretos que envolvem análise e modelos técnicos qualitativos e quantitativos estão (AGS, 2007b):

a) Métodos Heurísticos

Neste método a avaliação da suscetibilidade e perigo é realizada de acordo com opinião do profissional. São dois os principais métodos heurísticos: análise geomórfica e combinação de mapas qualitativos. A análise geomórfica o perigo e a suscetibilidade são determinados diretamente pelo profissional com base na experiência individual e por analogia. Já na combinação de mapas qualitativos o profissional desenvolve o estudo atribuindo valores para ponderar uma série de parâmetros avaliados, assim ao soma-los se definem as classes de perigo e vulnerabilidade. Ambos os métodos são comuns, mas variam de local para local, da experiência do profissional e da dificuldade de ponderar os parâmetros de entrada.

b) Métodos Estatísticos

Os métodos estatísticos são baseados nas relações observadas entre os fatores e a distribuição dos deslizamentos de solo passados. Assim a suscetibilidade e o perigo são determinados de forma objetiva, pela qual os parâmetros e suas inter-relações são avaliados em uma base estatística. Entre os vários métodos de análises estatísticas estão: as análises bivariadas, análise multivariada, método de regressões e método Bayesiano usando pesos e redes neurais (SOETERS and VAN WESTERN, 1996 apud AGS, 2007b). As desvantagens do método incluem a qualidade dos dados, inventários incompletos, erros de mapeamento, além de tais modelos não serem facilmente transferíveis de região a região.

c) Métodos Determinísticos

Os métodos determinísticos aplicam a teoria de estabilidade de taludes, princípios como taludes infinitos, equilíbrio limite e elementos finitos. Para desenvolver estes métodos, requerem-se os parâmetros dos solos e físicos do local. O mapa resultante detalha o fator de segurança e os limites médios, enquanto as classes de suscetibilidade e perigo podem ser definidas com intervalos. As limitações quanto a utilização destes métodos são as simplificações dos modelos geológicos e geotécnicos, as dificuldades de prever a poro pressão e sua relação com a precipitação.

## 2.9. MODELOS DE PREVISÃO DE ÁREAS SUSCETÍVEIS A DESLIZAMENTOS RASOS

Existem diversos modelos que calculam a estabilidade de encostas: CHASM, SHALSTAB, SINMAP, TRIGRS, SHETRAN e GEOtop-FS, entre outros. Dentre os modelos, o *Shallow Landsliding Stability Model* (SHALSTAB) e *Stability Index Mapping* (SINMAP) são similares, pois se utilizam de fatores hidrológicos, geomorfológico e geotécnico além dos mesmos parâmetros de entrada. Embora parecidos, o SINMAP possui uma avaliação mais probabilística, enquanto o SHALSTAB determinística (MICHEL; KOBIYAMA; GOERL, 2014).

O SINMAP analisa a estabilidade do talude em termos da probabilidade que o fator de segurança obtido através do modelo de estabilidade de encosta é maior que uma distribuição de probabilidade uniforme quantificar a incerteza nos parâmetros. Já o SHALSTAB analisa a estabilidade com base na precipitação crítica para desencadear a instabilidade (MEISINA; SCARABELLI, 2007).

Em seu trabalho desenvolvido no norte da Itália Meisina e Scarabelli (2007) compararam os resultados obtidos utilizando o SINMAP e SHALSTAB e observaram que os resultados do SHALSTAB eram mais realistas. Michel, Kobiyama e Goerl (2014) desenvolveram trabalho semelhante em Rio dos Cedros-SC e chegaram a mesma conclusão.

### 2.9.1. Shalstab

SHALSTAB é modelo determinístico criado por Montgomery e Diemitrich (1994) para avaliar as áreas suscetíveis a deslizamentos translacionais rasos, composto por um modelo de análise de taludes infinitos e um modelo hidrológico que considera fluxos subsuperficiais constantes - proposto por Beken e Kirky (1979) e O'Loughlin (1986) (FERNANDES et al., 2001; LISTO, 2011).

Os componentes do modelo consistem de parâmetros topográficos, geotécnicos e hidrológicos. Os parâmetros topográficos são a declividade e área de contribuição, obtidos a partir de Modelos Digitais de Terreno (MDT), os quais para fins deste modelo são determinantes para prever a acumulação de água e a consistência destes dados está intimamente ligada a qualidade e resolução do MDT (FERNANDES et al., 2001). Os parâmetros do solo, coesão, massa específica, ângulo de atrito e espessura, são obtidos através de ensaios de campos ou estimados se houver estudos desenvolvidos com solos do local, podendo

ser especializados e individualizados aos tipos de solos da bacia ou generalizados para toda a área a fim de serem utilizado no modelo de taludes infinitos. Os fatores hidrológicos, transmissibilidade do solo e a precipitação (recarga uniforme) são variáveis ao longo do tempo e características como, intensidade da precipitação e duração influenciam a magnitude dos deslizamentos (GUIMARÃES et al., 2002).

O modelo visa estabelecer o risco através da combinação dos fatores hidrológicos em uma proporção que define um índice de estabilidade relativa (GUIMARÃES et al., 2002). Assim, o modelo proposto por Montgomery e Diemitrich (1994) define sete classes de estabilidade, sendo os extremos da classificação a classe incondicionalmente estável e incondicionalmente instável.

#### 2.9.1.1. Taludes Infinitos

A estabilidade de taludes infinitos é determinada através da análise das forças atuantes sobre a massa de solo, considerando que o plano é paralelo a superfície do relevo e que os efeitos de atrito lateral e bordas podem ser desprezados. A resistência ao cisalhamento é o principal parâmetro analisado que determina a segurança do talude, o qual é verificado de acordo com o critério de ruptura de Mohr- Columb.

$$\tau = c + (\sigma - \mu) \operatorname{tg} \emptyset \quad (17)$$

onde:

$\tau$  = resistência ao cisalhamento;

$c$  = coesão;

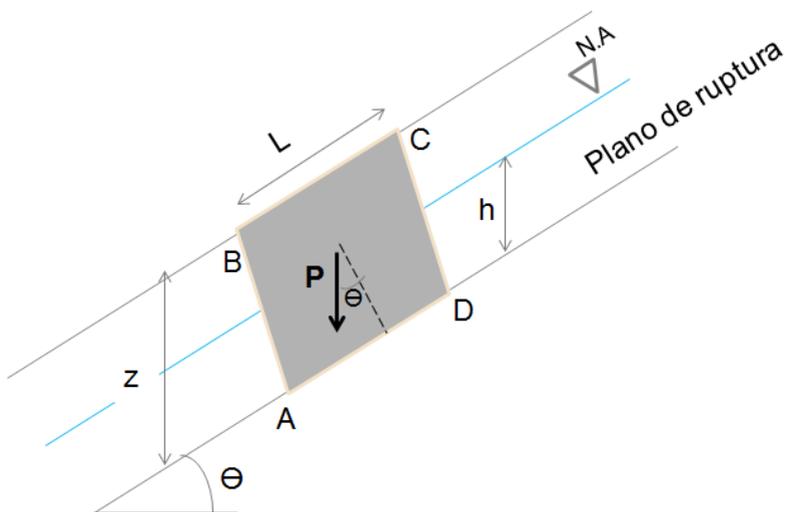
$\sigma$  = tensão normal ao plano de ruptura;

$\mu$  = poropressão;

$\emptyset$  = ângulo de atrito interno.

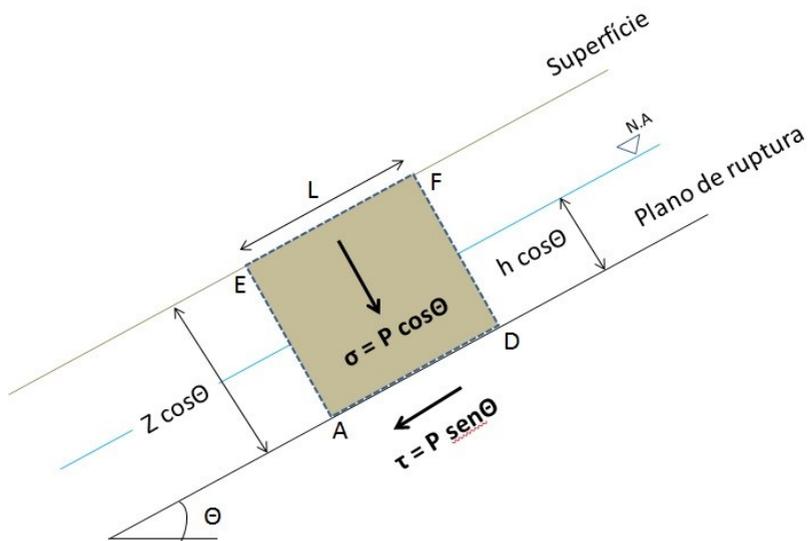
A Figura 22 e Figura 23 demonstram algumas das forças atuantes sobre um talude e ilustram a origem das formulas apresentadas a seguir.

Figura 22 - Análise de algumas das forças atuantes em um talude infinito.



Fonte: Autor

Figura 23 - Decomposição de algumas das forças atuantes no talude infinito.



Fonte: Autor

Na Figura 22 verifica-se que o peso do bloco de solo ABCD não é perpendicular a superfície, então se faz necessário decompor as dimensões e as forças para que estas sejam perpendiculares a superfície sem alterar a área do bloco – como visto no bloco AEFD da Figura 23. A equação do peso do bloco de solo, onde “L” é comprimento do bloco, “ $\gamma$ ” a massa específica do solo e “g” a aceleração da gravidade, é dada por:

$$P = \gamma \times g \times z \cos \theta \times L \quad (18)$$

A partir da equação (18) acima, a tensão normal( $\sigma$ ), a poropressão ( $\mu$ ) e a tensão de cisalhamento atuante( $\sigma$ ) são:

$$\sigma = \gamma \times g \times z \cos^2 \theta \quad (19)$$

$$\tau = \gamma \times g \times z \cos \theta \sin \theta \quad (20)$$

$$\mu = \gamma_w \times g \times h \cos^2 \theta \quad (21)$$

onde:

$z$  = espessura do solo;

$g$  = aceleração da gravidade;

$\gamma$  = massa específica do solo;

$\gamma_w$  = massa específica da água.

Substituindo as equações (19), (20) e (21) na equação (17):

$$\gamma \times g \times z \cos \theta \sin \theta = c + (\gamma g \times z \cos^2 \theta - \gamma_w g \times h \cos^2 \theta) \operatorname{tg} \emptyset \quad (22)$$

Divide-se ambos os lados da equação por “ $g \times \cos^2 \theta \times \operatorname{tg} \emptyset$ ” e simplificando tem-se:

$$\frac{\gamma \times z \sin \theta}{\cos \theta \times \operatorname{tg} \emptyset} = \frac{c}{g \times \cos^2 \theta \times \operatorname{tg} \emptyset} + (\gamma \times z - \gamma_w \times h) \quad (23)$$

Aplicando a relação trigonométrica  $\frac{\sin \theta}{\cos \theta} = \operatorname{tg} \theta$  e realizando as operações algébricas necessárias chega-se até a equação (29) que relaciona a espessura de solo saturado com a espessura total de solo.

$$\frac{\gamma \times z \times \text{tg} \theta}{\text{tg} \phi} = \frac{c}{g \times \cos^2 \theta \times \text{tg} \phi} + (\gamma \times z - \gamma_w \times h) \quad (24)$$

$$\frac{\text{tg} \theta}{\text{tg} \phi} = \frac{c}{\gamma \times z \times g \times \cos^2 \theta \times \text{tg} \phi} + \frac{(\gamma \times z - \gamma_w \times h)}{\gamma \times z} \quad (25)$$

$$\frac{\text{tg} \theta}{\text{tg} \phi} = \frac{c}{\gamma \times z \times g \times \cos^2 \theta \times \text{tg} \phi} + \left(1 - \frac{\gamma_w \times h}{\gamma \times z}\right) \quad (26)$$

$$\frac{\gamma_w \times h}{\gamma \times z} = \frac{c}{\gamma \times z \times g \times \cos^2 \theta \times \text{tg} \phi} + 1 - \frac{\text{tg} \theta}{\text{tg} \phi} \quad (27)$$

$$\frac{h}{z} = \frac{\gamma}{\gamma_w} \left( \frac{c}{\gamma \times z \times g \times \cos^2 \theta \times \text{tg} \phi} + 1 - \frac{\text{tg} \theta}{\text{tg} \phi} \right) \quad (28)$$

$$\frac{h}{z} = \frac{\gamma}{\gamma_w} \left( 1 - \frac{\text{tg} \theta}{\text{tg} \phi} \right) + \frac{c}{\gamma_w \times z \times g \times \cos^2 \theta \times \text{tg} \phi} \quad (29)$$

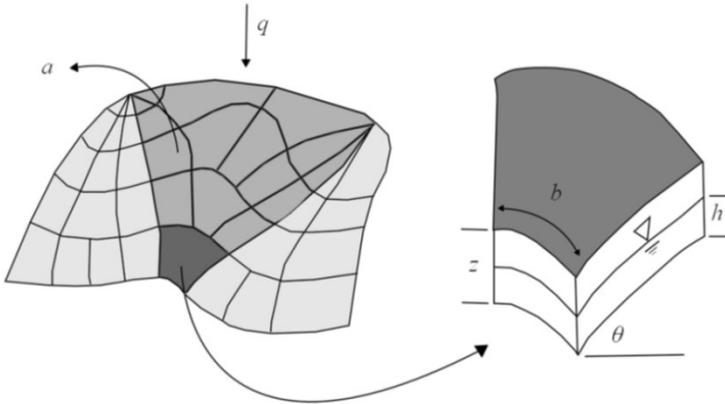
### 2.9.1.2. Modelo hidrológico de estado uniforme

O modelo hidrológico do SHALSTAB, 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 por análise da área de contribuição a montante, transmissibilidade do solo e a declividade do relevo (MONTGOMERY; DIETRICH, 1994). Segundo Michel (2013), modelos estacionários pressupõem que as relações hidrológicas que ocorrem são limitadas a um fluxo subsuperficial permanente e paralelo ao relevo. Assim assume-se que o fluxo gerado pela precipitação infiltra no solo até atingir uma camada de baixa condutividade, por onde segue caminhos determinados pela topografia - permitindo calcular o padrão espacial do equilíbrio de saturação do solo (O'LOUGHLIN, 1986).

A partir da Figura 24, podem-se formular as equações a seguir que são utilizadas no modelo hidrológico do SHALSTAB. A vazão de entrada em um elemento da encosta ( $Q_e$ ) [em m<sup>3</sup>/dia] é o produto entre a taxa da precipitação, recarga uniforme, ( $q$ ) [em m/dia] e a área da superfície do relevo ( $a$ ) [em m<sup>2</sup>]:

$$Q_e = q \times a \quad (30)$$

Figura 24 - Modelo hidrológico estacionário de recarga uniforme.



Fonte: (MICHEL, 2013)

Já vazão do fluxo de saída do elemento é o produto da velocidade do fluxo pela área de saída, na qual a velocidade pode ser escrita por meio da Lei de Darcy (CAPUTO, 1988):

$$v_p = k_p \times i \quad (31)$$

onde:

$v_p$  = velocidade de percolação no solo [m/dia];

$k_p$  = coeficiente de percolação no solo [m/dia];

$i$  = gradiente hidráulico [m/m].

Assumindo que o coeficiente de percolação é constante e sabendo que o gradiente hidráulico é a razão entre perda de carga, diferença do nível de água na entrada e saída do sistema, pelo comprimento da encosta, tem-se:

$$v_p = k_p \times \text{sen } \theta \quad (32)$$

Assim:

$$Q_s = k_p \times \text{sen } \theta \times h \times b \cos \theta \quad (33)$$

sendo:

$Q_s$  = vazão de saída do fluxo [m<sup>3</sup>/dia];

$h$  = espessura de solo saturado [m];

$b$  = comprimento do limite inferior do elemento [m].

Sendo regime uniforme, a vazão de entrada e saída são iguais e iguala-se as expressões (30) e (33):

$$q \times a = k_p \times \text{sen } \theta \times h \times b \cos \theta \quad (34)$$

A vazão máxima de saída no elemento será máxima quando o solo estiver totalmente saturado, ou seja, todo o vazão da camada de solo condutível estiver preenchido por água. Reescrevendo a equação (33):

$$Q_{sm\acute{a}x} = (k_p \times \text{sen } \theta \times z \times b \cos \theta) = b \times T \times \text{sen } \theta \quad (35)$$

onde:

$T = k_p \times z \times \cos \theta$  é a transmissibilidade do solo [m<sup>2</sup>/dia];

$z$  = espessura total do solo [m]

Michel (2013) cita que O'Loughlin (1986) assumiu a umidade como a parcela do solo em dado estado uniforme de recarga. Desta forma, se obtêm a saturação do solo ( $W$ ) [m/m] no elemento analisado por meio da razão entre a vazão de entrada (eq. 30) pela vazão máxima de saída (eq. 35).

$$W = \frac{Q_e}{Q_{sm\acute{a}x}} = \frac{q \times a}{b \times T \times \text{sen } \theta} \quad (36)$$

Substituindo as expressões (34) e (35) em (36):

$$W = \frac{q \times a}{b \times T \times \text{sen } \theta} = \frac{k_p \times \text{sen } \theta \times h \times b \cos \theta}{k_p \times \text{sen } \theta \times z \times b \cos \theta} = \frac{h}{z} \quad (37)$$

Assim:

$$\frac{h}{z} = \frac{q \times a}{b \times T \times \text{sen } \theta} \quad (38)$$

### 2.9.1.3. Classes de estabilidade

A formulação das classes de estabilidade são baseadas nos modelos do talude infinito e no modelo hidrológico proposto por O'Loughlin

(1986). Em ambos os modelos encontra-se uma relação entre a espessura do solo saturado e de todo o solo. Igualando as equações (29) e (38):

$$\frac{q \times a}{b \times T \times \text{sen } \theta} = \frac{\gamma}{\gamma_w} \left( 1 - \frac{\text{tg} \theta}{\text{tg} \phi} \right) + \frac{c}{\gamma_w \times z \times g \times \cos^2 \theta \times \text{tg} \phi} \quad (39)$$

O SHALSTAB resolve a equação acima com base em duas variáveis, a taxa de precipitação ou recarga (q) e a transmissibilidade do solo (T). Então isolando estes termos no lado esquerdo da igualdade obtêm-se:

$$\frac{q}{T} = \frac{b \text{ sen } \theta}{a} \left[ \frac{\gamma}{\gamma_w} \left( 1 - \frac{\text{tg} \theta}{\text{tg} \phi} \right) + \frac{c}{\gamma_w \times z \times g \times \cos^2 \theta \times \text{tg} \phi} \right] \quad (40)$$

São sete as classes de estabilidades (Quadro 7) definidas pelo SHALSTAB, sendo os limites as classes incondicionalmente estável e incondicionalmente instável.

Quadro 7 – Classes de estabilidade SHALSTAB

Classes de Estabilidade
A - Incondicionalmente estável e saturado
B - Incondicionalmente estável e não saturado
C - Estável e não saturado
D - Instável e não saturado
E - Instável e saturado
F - Incondicionalmente instável e saturado
G - Incondicionalmente instável e não saturado

Fonte: adaptado de Dietrich e Montgomery (1998 apud REGINATTO, 2012)

Para definir a classe A, incondicionalmente estável, considera-se que o solo esteja completamente saturado, ou seja, a razão  $h/z = 1$ . Substituindo na equação (29):

$$\text{tg} \theta \leq \text{tg} \phi + \frac{c}{\gamma_w \times z \times g \times \cos^2 \theta \times \text{tg} \phi} \quad (41)$$

Assim, para uma encosta com declividade menor que o ângulo  $\theta$  da equação (40), mesmo para chuvas intensas e/ou duradouras não haverá rompimento do talude.

Já para a classe G, incondicionalmente instável, mesmo com o solo seco (  $h/z = 0$  ) haveria movimento de massa. Substituindo esta condição na equação (29) verifica-se:

$$tg\theta \geq tg\phi + \frac{c}{\gamma_w \times z \times g \times \cos^2\theta \times tg\phi} \quad (42)$$

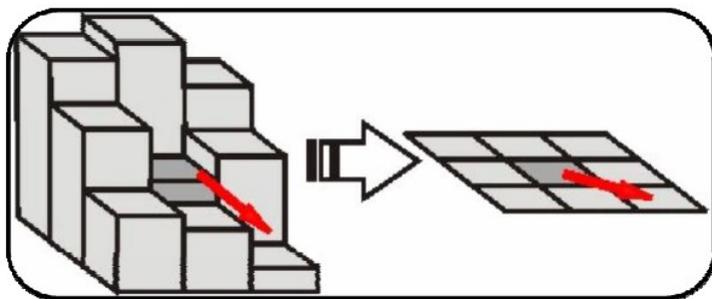
Portanto, uma encosta com declividade maior que o ângulo  $\theta$  estaria instável.

As demais classes intermediárias se obtêm, a partir da equação (40).

#### 2.9.1.4. Limitações e ajustes

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 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) e em uma das oitos direções principais – método conhecido como D-8 (Figura 25) (CARVALHO, 2007).

Figura 25 – Determinação da direção do fluxo subsuperficial a partir de um MDT.

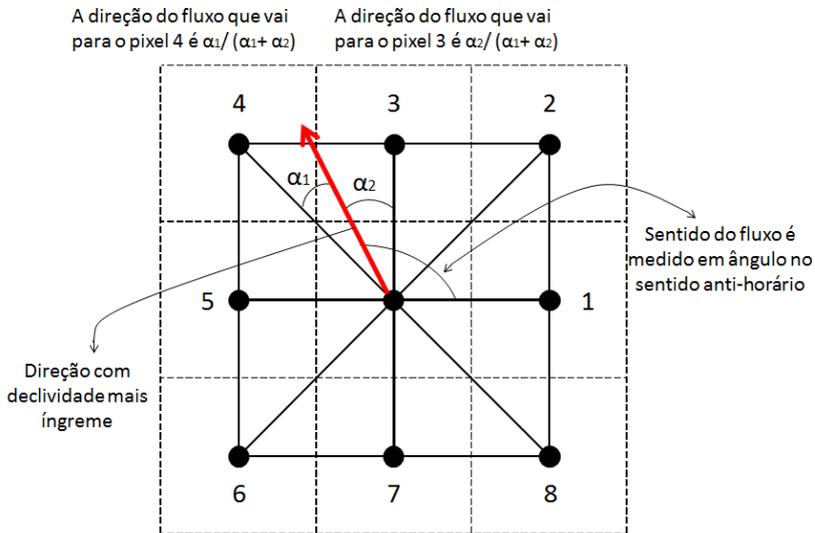


Fonte: Carvalho (2007).

Visando superar a limitação quanto aos parâmetros geotécnicos, utilizam-se as modificações propostas por Michel (2013). O autor desenvolveu um algoritmo de aplicação no software ArcGIS® no qual incluiu os parâmetros de coesão de raízes e peso da vegetação de modo a ser possível georreferenciar-os e individualizar os parâmetros do solo

em função das unidades geotécnicas encontradas (MICHEL, 2013). Quanto a limitação relacionada ao fluxo subsuperficial para contorna-la pode-se utilizar o método D-Infinito proposto por Tarboton (1997). Neste método a direção do fluxo é identificada como um ângulo sentido anti-horário, em radianos, na direção da faceta triangular com declive mais íngreme (Figura 26). A direção é determinada a partir de uma matriz de seis pixels, sendo o pixel central analisado, e as oito facetas triangulares formadas. O fluxo resultante é interpretado como sendo proporcional aos pixels que limitam a faceta triangular de declive mais íngreme (TARBOTON, 1997).

Figura 26 - Direção do fluxo definida pelo método D-Infinito proposto por Tarboton (1997).



Fonte: adaptado de Tarboton (1997).

### 3. ÁREA DE ESTUDO

#### 3.1. SÃO JOSÉ

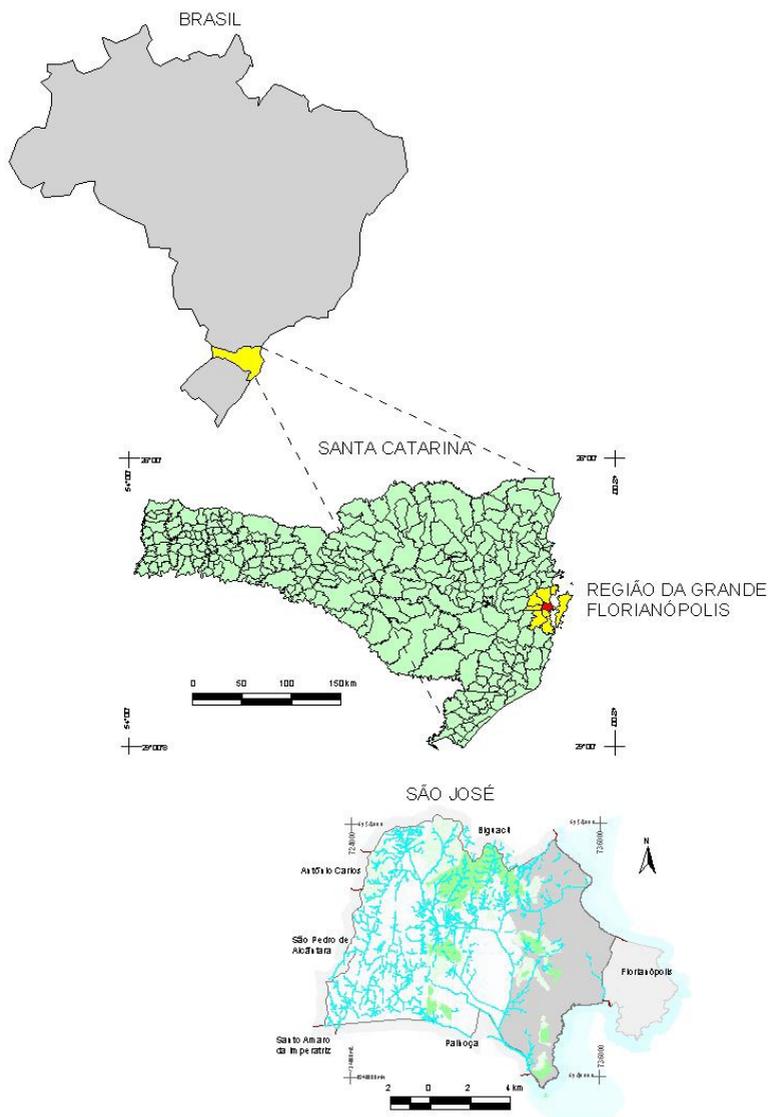
O município de São José, pertencente a região da Grande Florianópolis, localiza-se nas coordenadas geográficas latitude 27°36'55 sul e longitude 48°37'39 oeste (PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO JOSÉ, 2014). Com uma área de 153 km<sup>2</sup>, a população estimada em 2013 era de 224.779 pessoas (IBGE, 2014a). Ao norte faz divisa com o município de Biguaçu, a oeste com Santa Amaro da Imperatriz, São Pedro de Alcântara e Antônio Carlos, ao sul com Palhoça e a leste com o Oceano Atlântico e a capital catarinense, Florianópolis (SANTOS, 2004).

##### a) Histórico

O município de São José-SC, o quarto mais antigo de Santa Catarina, iniciou-se a partir da colonização açoriana no ano de 1750, o qual no ano seguinte passou ser denominado de freguesia de São José. Em 1833, elevou-se de freguesia à vila para enfim, em 1856, ser elevada à cidade por meio de uma lei provincial (PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO JOSÉ, 2014).

A construção da BR-101, rodovia que conecta o Brasil de norte a sul pelo litoral, e a BR-282, via expressa que liga Florianópolis a BR-101, foram de grande influência ao desenvolvimento do município a partir da década de 70. Dentre as diversas consequências advindas da construção da BR-101 cita-se: aumento do fluxo viário e atividades industriais no município, poluição, acidentes e a evidenciação de características de “cidade dormitório” (FARIAS, 2002 apud SANTOS, 2004). A partir da década de 90 até atualmente, verifica-se o crescimento da classe média, o aumento da verticalização e ofertas de imóveis (SANTOS, 2004).

Figura 27 - Mapa de localização do município de São José-SC.



Fonte: (SANTOS, 2004)

## b) Características Gerais

A economia do município é baseada principalmente no setor de serviços, que corresponde a 67% do Produto Interno Bruto (PIB) do município em 2011 (IBGE, 2014a). A área urbanizada do município chega a ocupar cerca de 30% do potencial do território, dentro da qual estão instaladas cerca de 3800 empresas comerciais, 950 indústrias e 4200 empresas prestadores de serviços (GT CADASTRO, 2004; SANTOS, 2004).

De acordo com Pandolfo et al. (2002), São José-SC possui como clima predominante Cfa ou Subtropical - na classificação climática de Köppen. Este clima caracteriza-se por chuvas bem distribuídas pelo ano e verões quentes com médias acima de 22°C. A precipitação anual média varia entre 1500 à 1700mm por ano. (PANDOLFO et al., 2002)

Em sua hidrografia, o município está dentro da Região Hidrográfica Litoral Centro (RAMOS, 2005). A drenagem do território é constituída essencialmente pelo Rio Maruim e seus afluentes, sendo que dentro do limite do município é possível diferenciar 30 bacias hidrográficas de segunda a terceira ordem - segundo a classificação de Strahler (GT CADASTRO, 2004). Segundo Farias (2002 apud Santos, 2004), com exceção dos rios Maruim e Forquilhas, os demais rios foram reduzidos a córregos devido ao assoreamento.

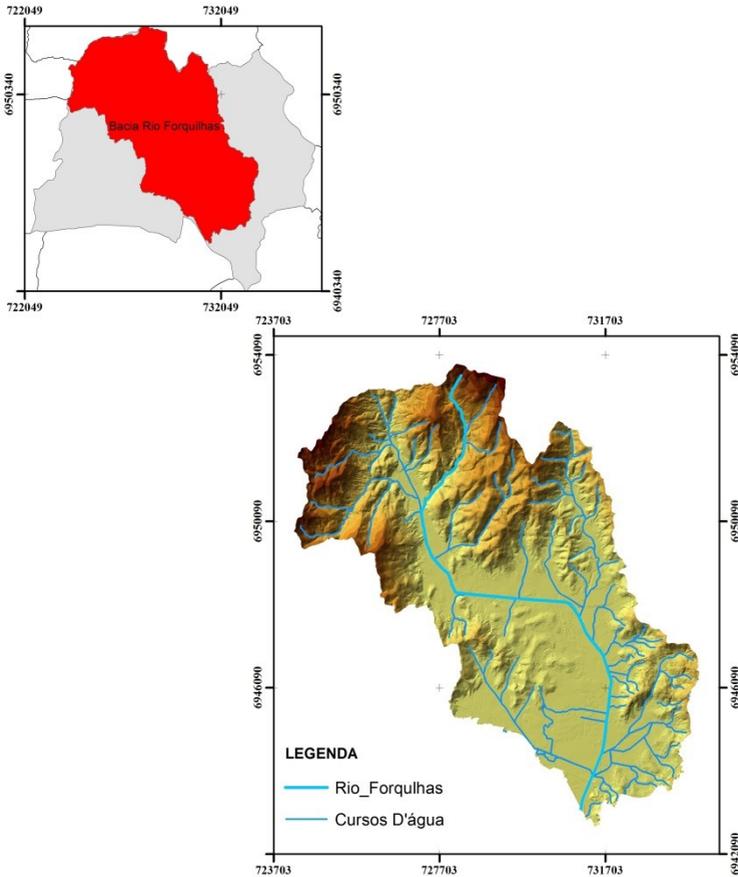
O relevo do território municipal é predominantemente constituído de planícies (FARIAS, 2002 apud SANTOS, 2004). Segundo GT Cadastro (2004), as altitudes até 50m correspondem a 50% do território, entre 50 a 300 metros, 45%, e superiores a 300m, somente 5%. A geologia é constituída por dois domínios morfo-estruturais: o Embasamento Cristalino, formado por rochas como granito, diabásio e metamórficas, e o Cobertura Sedimentar Quaternária, formado por depósitos de areias, siltes, argilas e conglomerados inconsolidados (FERREIRA, 1994 apud CARDOZO, 2009). Os solos do município são constituídos por três grupos de solos: Argissolos, Cambissolos e Gleissolos (CARDOZO, 2009).

O bioma ao qual o município está inserido é a Mata Atlântica. De acordo com GT Cadastro (2004), a cobertura vegetal mais representativa no município é a floresta ombrófila densa subgrupo submontana e subgrupo terras baixas.

### 3.2. BACIA DO RIO FORQUILHAS

A Bacia do Rio Forquilhas (Figura 28) é uma das sub-bacias pertencentes a vertente do Atlântico, cujos rios tem drenagem para o oceano (SANTA CATARINA, 2014). Embora a bacia esteja inserida na região hidrográfica Litoral Centro, que tem como principal a Bacia do Rio Cubatão do Sul, isto se deve pelo fato da lei estadual 10.949/1998 dividir as regiões hidrográficas do estado com base nas divisões geográficas – visto que o rio não é afluente do rio Cubatão Sul (RAMOS, 2005).

Figura 28 – Mapa de localização da bacia do Rio Forquilhas.

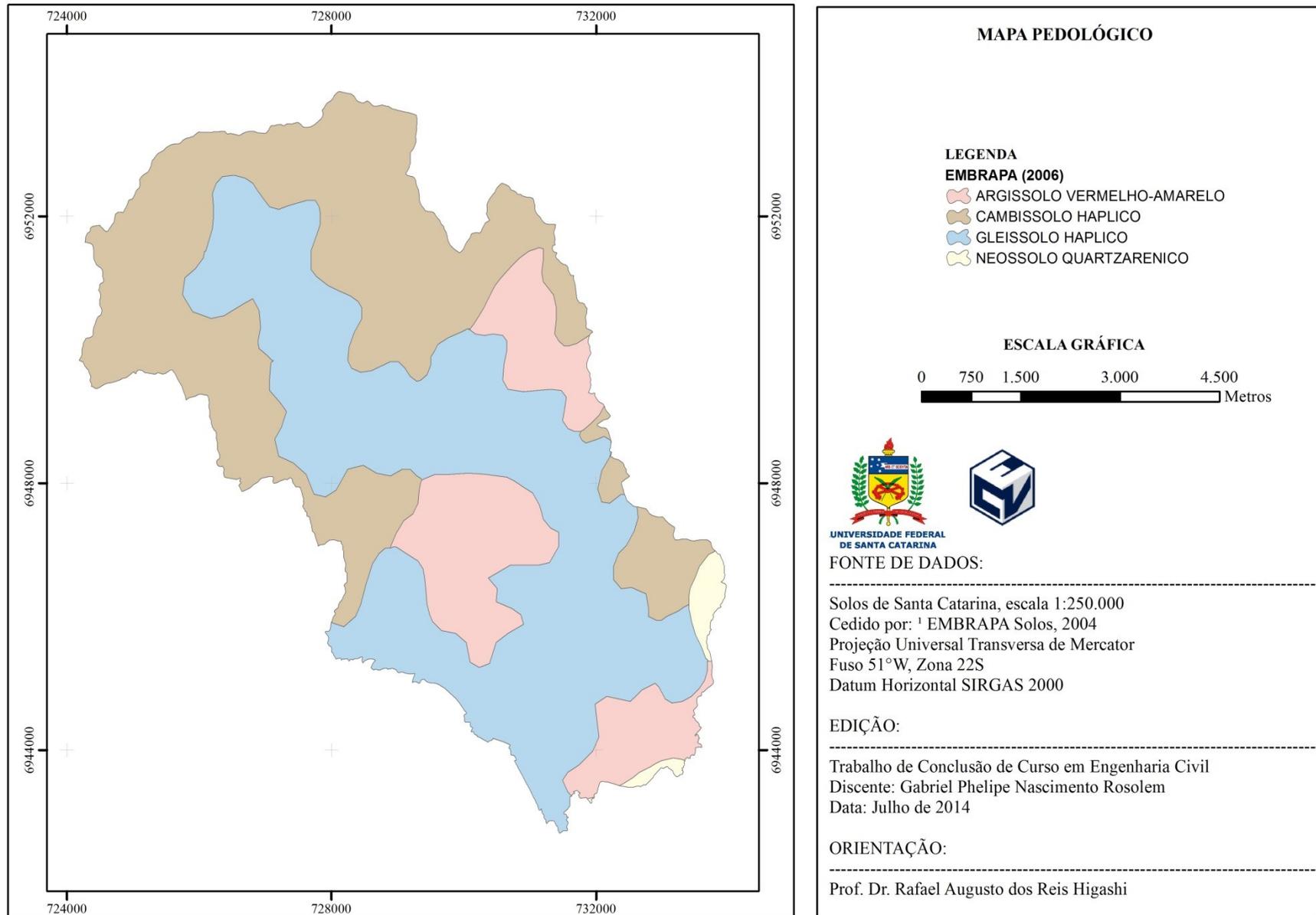


Fonte: Autor

O Rio Forquilhas é o maior afluente do Rio Maruim dentro do limite do município de São José (GT CADASTRO, 2004). Com área de 54km<sup>2</sup> e com um comprimento de cerca de 11km, a bacia do Rio Forquilhas está inserida no centro norte do município de São José, confrontando no seu extremo norte com o município de Biguaçu.

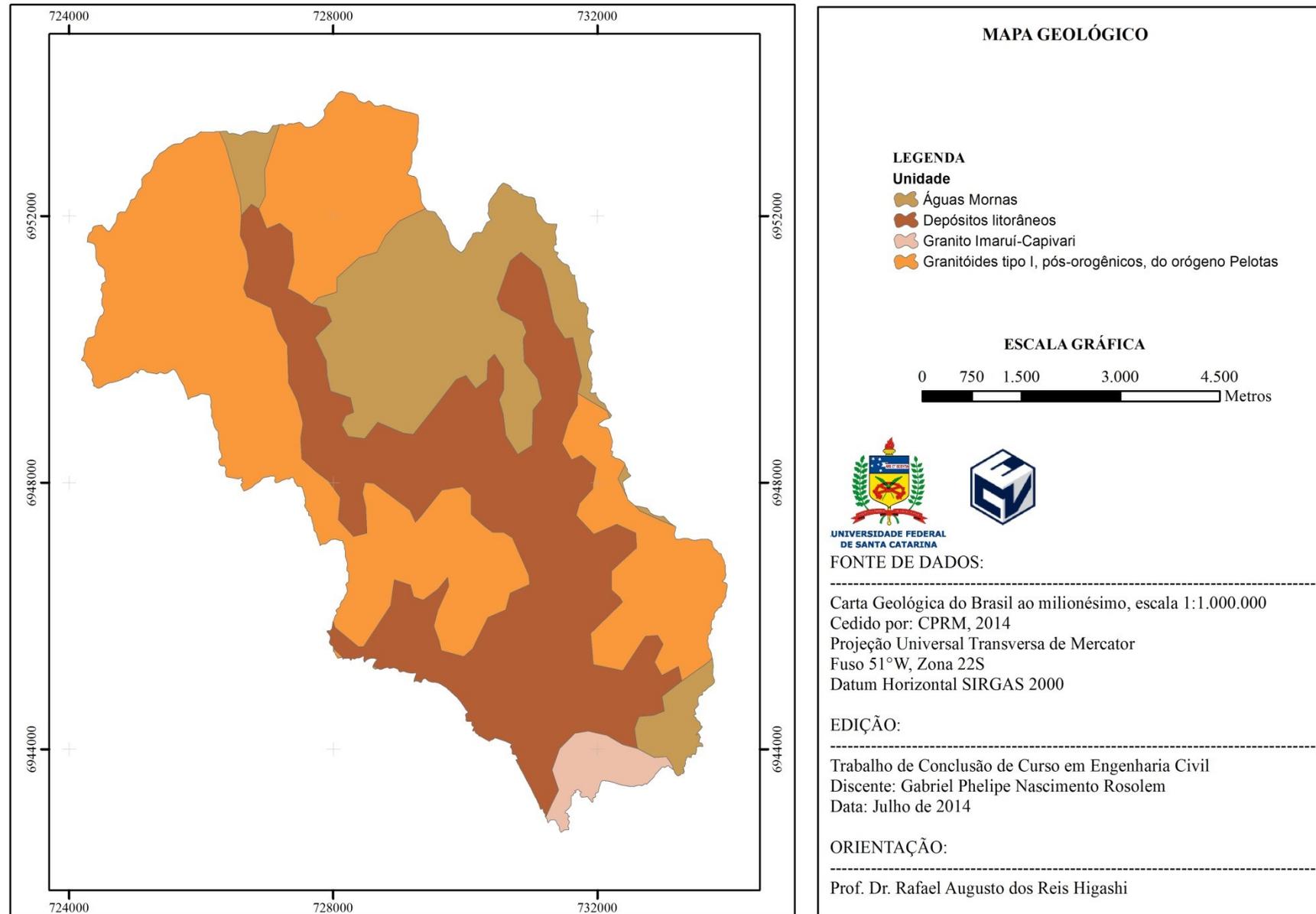
O relevo da bacia é mais alto no seu extremo norte e noroeste, entre 400 e 530m, e predominantemente baixo em seu restante - variando entre 0 a 50m. A Figura 29 e Figura 30 apresentam os mapas pedológicos e geológicos da bacia, respectivamente, em escalas utilizadas para fins de análise preliminar. Por ocupar grande parte do território de São José, as características físicas descritas ao município se adequam a bacia do rio Forquilhas.

Figura 29 - Mapa pedológico da bacia do Rio Forquilhas.



Fonte: Autor

Figura 30 - Mapa geológico da bacia do Rio Forquilhas.



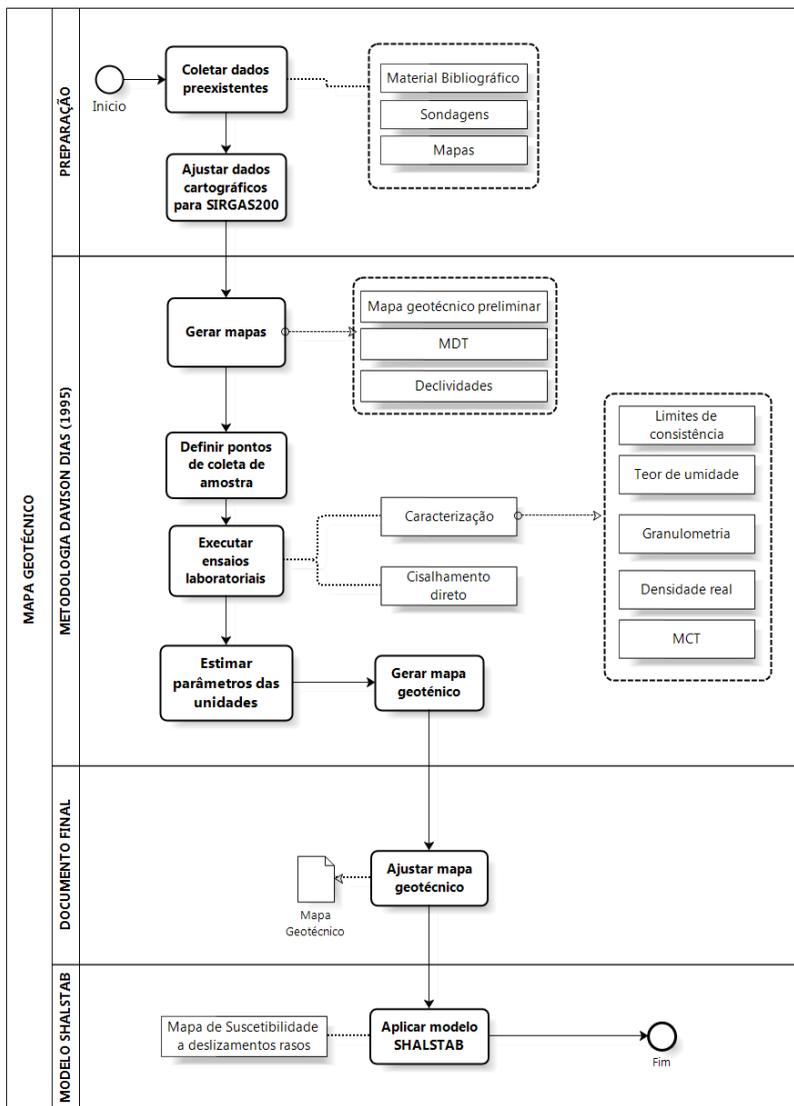
Fonte: Autor



#### 4. MÉTODOS E MATERIAIS

A Figura 31 resume os métodos aplicados neste trabalho.

Figura 31 - Fluxograma da metodologia



Fonte: Autor.

#### 4.1. DADOS PREEXISTENTES

A coleta de dados preexistente irá compor a base cartográfica e de referências bibliográficas para o restante do trabalho. Dentre os dados cartográficos adquiridos para desenvolvimento do trabalho citam-se: restituições aerofotogramétricas, mapa pedológico e mapa geológico.

Foram cedidas duas restituições fotogramétricas pela Prefeitura Municipal de São José, uma contendo somente as curvas de nível com intervalos de 1 metro de todo o município, em SAD69, e outra em SIRGAS 2000 com todos os componentes restituídos, entretanto esta não abrangia toda área de estudo. O mapa pedológico obtido foi cedido pela Prof. Dr<sup>a</sup> Glaci Trevisan Santos, enquanto o mapa geológico foi cedido pelo Departamento de Geociências da UFSC. O Quadro 8 apresenta as demais características dos dados obtidos.

Quadro 8 - Dados cartográficos obtidos para o desenvolvimento do trabalho.

Mapa/Carta	Escala	Sistema de Referência	Sistema de Coordenada	Ano	Produzido por
Curvas de nível	1:2.000	SAD69	UTM	2001	Prefeitura Municipal de São José
Limite da bacia	1:2.000	SAD69	UTM	-	Departamento de Geociências UFSC
Mapa pedológico	1:50.000	SAD69	UTM	-	Prof Dr <sup>a</sup> . Glaci Trevisan Santos
Mapa geológico	1:10.000	SAD69	UTM	2013	Departamento de Geociências UFSC

Fonte: Autor.

#### 4.2. TRANSFORMAÇÃO DO SISTEMA GEODÉSICO DE REFERÊNCIA

Em 2005, o SIRGAS2000 foi adotado como o Sistema Geodésico Brasileiro (SGB) por meio da Resolução 1/2005 do IBGE (IBGE, 2005). A Resolução 1/2005 prevê um período de adaptação de, no máximo, 10 anos, no qual é possível a utilização em concomitância do SGB oficial com o SAD69 e Córrego Alegre. Após esse período todo produto cartográfico deverá utilizar o SIRGAS2000 como referência. Buscando se adequar a resolução 1/2005 e unificar todos os dados cartográficos

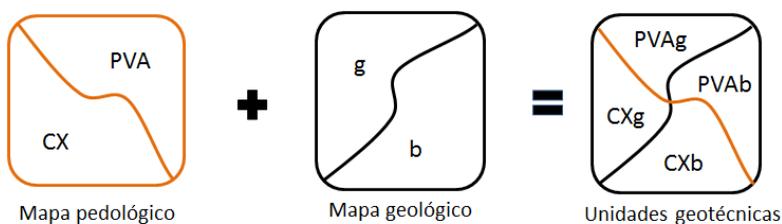
em SIRGAS2000, utilizou-se o procedimento recomendado por TECNOMAPAS (2014) o método de NTV2. Este método utiliza grids do *software* Progrid, disponibilizado gratuitamente no site IBGE, para realizar a transformação no *software* ArcGIS®. Ressalta-se que o sistema WGS1984 é equivalente ao SIRGAS2000 do ponto de vista planimétrico, não necessitando transformações.

### 4.3. MAPAS

A partir dos dados cartográficos obtidos, criam-se mapas temáticos que subsidiam a definição das áreas suscetíveis a deslizamentos rasos e a elaboração do mapa geotécnico final. Os mapas elaborados nesta etapa são criados com o uso do *software* de geoprocessamento ArcGIS 10®, da ESRI, e compostos pelo mapa geotécnico preliminar, o modelo digital de terreno (MDT) e o mapa de declividades.

Primeiramente, utilizando a metodologia de Dias (1995), sobrepõem-se as informações do mapa geológico da CPRM e pedológico da Embrapa Solos para se obter um mapa geotécnico preliminar, no qual se tem uma estimativa das unidades geotécnicas. A Figura 32 apresenta simplificada o procedimento de estimativa das unidades geotécnicas, na qual a simbologia, por exemplo, PVAg, adota as letras maiúsculas referentes a classificação pedológica e as letras minúsculas referentes a classificação geológica.

Figura 32 - Procedimento simplificado da estimativa de unidades geotécnicas

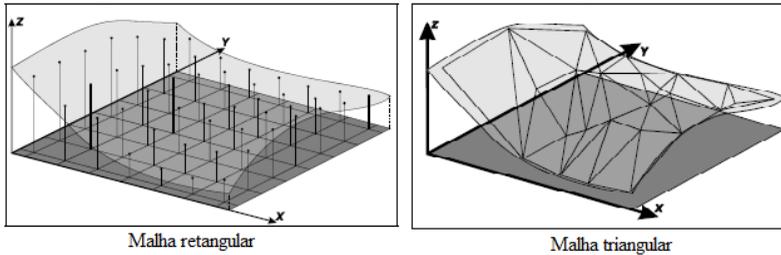


Fonte: autor.

Para gerar os Modelos Digitais de Terrenos em ambiente SIG existem dois métodos utilizados: a malha triangular e malha regular (Figura 33). A malha triangular ou TIN é uma estrutura vetorial que representa a superfície por meio de um conjunto de faces triangulares interligadas, nas quais cada vértices dos triângulos possuem coordenadas espaciais e o atributo de elevação. Já a malha regular é uma

representação matricial no qual cada pixel está associado a um valor de elevação (CÂMARA; DAVIS; MONTEIRO, 2001). Para este trabalho, utilizar-se-ão ambos.

Figura 33 - Métodos de representação do modelo digital do terreno.



Fonte: Namikawa (1995 apud CÂMARA; DAVIS; MONTEIRO, 2001)

A partir das curvas de nível com intervalos de 1m, em escala 1:2000 da restituição aerofotogramétrica, cria-se um modelo digital de terreno com malha triangular. O MDT criado por TIN representa melhor um relevo complexo, além de permitir uma representação em 3D, o que propiciará uma melhor análise do relevo para coleta de amostras. Por outro lado ao utilizar esta estrutura torna-se difícil realizar simulações e modelagens, como o caso das áreas suscetíveis a deslizamentos, as quais são mais adequadas com o uso da malha retangular.

Com as mesmas curvas de níveis com intervalos de 1m utilizadas no método TIN, elabora-se MDT em malha retangular. Tarolli e Tarboton (2006) realizam um estudo para áreas suscetíveis a deslizamentos a partir de dados altímetros de *laser scanning* e concluíram que a melhor abertura da malha (pixel) para análises era 10metros. Portanto, neste trabalho o MDT em malha retangular terá resolução de 10x10m.

Por fim gera-se o mapa de declividades, a partir do MDT, com representação matricial de 10x10m.

#### 4.4. ENSAIOS

Dias (1995) propõem que solos em uma mesma unidade pedológica/geológica possuem comportamento parecido, assim resultados de ensaios em um ponto analisado desta unidade podem ser extrapolados para todos os solos dentro da unidade analisada. Contudo, o relevo é um dos fatores de formação dos solos, de forma que se podem ter diferentes tipos de solos de acordo com a declividade e elevação.

Desta forma, os pontos de coleta de amostras de solos, destinados aos ensaios, são definidos com auxílio do MDT e mapa de declividades. Os ensaios realizados neste trabalho são divididos em caracterização, para obtenção de atributos físicos dos solos e estimativa de comportamento hidráulico, e resistência - obtenção dos parâmetros resistentes do solo.

#### 4.4.1. Caracterização

Os ensaios de caracterização realizados neste trabalho são compostos por: teor de umidade natural, granulometria, massa específica real dos grãos, índice de plasticidade e MCT. Todos estes ensaios seguiram as recomendações da NBR6457:1986, a qual prescreve o procedimento de preparação das amostras dos ensaios supracitados. Os procedimentos dos ensaios serão sucintamente apresentados abaixo, tendo um enfoque maior o método expedito das pastilhas da classificação MCT.

##### a) Teor de umidade natural

Para se determinar o teor de umidade natural dos pontos coletados, seguiu-se os procedimentos previstos pela NBR6457:1986 para o método da estufa. Esta prevê que sejam tomadas pelo menos três amostras, pesadas antes e depois de permanecerem em estufa. O teor de umidade é a média aritmética dos teores obtidos em cada uma das três amostras preparadas.

##### b) Granulometria

O ensaio de granulometria tem seu procedimento normalizado pela NBR7181:1984 e tem por finalidade averiguar as dimensões das partículas de solo (Figura 34). O ensaio pode ser dividido em peneiramento grosso, peneiramento fino e sedimentação.

Figura 34 - Escala granulométrica, em mm, adotada pela NBR6502:1995.

PEDREGULHO			AREIA			SILTE	ARGILA
Grosso	Médio	Fino	Grosso	Médio	Fino		
60	20	6	2,0	0,6	0,2	0,06	0,002

Fonte: autor

O peneiramento é composto de peneiras de abertura de malha normalizadas pela NBR5734 dispostas em sequencia e submetidas ao agitador mecânico. Posteriormente, verifica-se a massa de solo retida em cada uma das peneiras. Assim neste trabalho realizou-se o peneiramento grosso, com lavagem do material retido na peneira de abertura 2,0mm, e peneiramento fino, com lavagem do material retido na peneira de abertura 0,075mm.

A sedimentação visa determinar a fração de silte e argila de um solo. Nesta etapa relaciona-se a velocidade de decantação da fração fina do solo com o diâmetro da partícula, lei de Stokes, em uma proveta com solução de aquosa. Este procedimento foi suprimido para fins deste trabalho, pois aumentaria demasiadamente o tempo de ensaio. Desta maneira optou-se pela a execução do maior numero possível de ensaios de caracterização.

#### c) Massa especifica real dos grãos

O ensaio de massa especifica real dos grãos é descrito e normalizado pela NBR6508:1984. O ensaio consiste em determinar a massa seca de duas amostras de solo e em seguida o seus respectivos volumes pelo principio de Arquimedes. Para a aferição dos volumes, utilizam-se dois picnômetros de 500ml e uma bomba de vácuo. A massa especifica dos grãos será a média obtida nas duas amostras.

#### d) Índice de plasticidade

Arbitrariamente, o comportamento do solo, dependendo do teor de umidade, pode ser dividido em quatro estados: sólido, semi-sólido, plástico e líquido (DAS, 2011). O índice de plasticidade é obtido como a diferença entre o Limite de Liquidez (LL) e o Limite de Plasticidade (LP), equação (43), ou seja, analisa qual a massa de água, em proporção a massa de solo, a partir da plasticidade pode ser adicionada ao solo antes que este se comporte como um fluido.

$$IP = LL - LP \quad (43)$$

O ensaios de Limite de Liquidez e Limite de Plasticidade seguiram os procedimentos normalizados pela NBR6459:1984 e NBR7184:1984, respectivamente.

e) MCT – método expedito das pastilhas

O método expedito das pastilhas é um método simplificado para classificação MCT, que consiste em analisar a contração, consistência e inchamento de corpos de provas moldados em anéis de 20mm de diâmetro. Por não ser um ensaio comum na mecânica dos solos, os procedimentos e aparelhos serão descritos a seguir, como apresentado por Sant'Ana(2002).

Os equipamentos utilizados neste ensaio podem ser divididos como:

- i. Equipamentos convencionais: almofariz, proveta, peneiras de aberturas de 0,42mm e 0,075mm, balança, palaca de vidro despolido, espátula e papel filtro.
- ii. Equipamentos específicos: anéis de PVC rígido, teflon ou similares com 20mm de diâmetro interno e 5mm de altura, mini-penetrômetro com ponta plana e corpo cilíndrico de 1,3mm de diâmetro e massa total de 10g, placas de teflon com aproximadamente 1mm de espessura, lupa 10x, escala de precisão graduada em mm, placa de pedra porosa capaz de manter carga hidráulica negativa de 0,5mm, fio de nylon esticado em arco de arame.

Deve-se peneirar aproximadamente 30g de solo passante na peneira de abertura de 0,42mm de uma amostra, previamente, seca ao ar. A esse material passante, adicionar água até atingir uma pasta e espatular intensamente, aproximadamente 400 vezes, até que a consistência resulte na penetração de 1mm do mini-penetrômetro.

Após atingir a consistência da pasta, retira-se a quantidade de material suficiente para moldar uma esfera de aproximadamente 1cm de diâmetro. Este material retirado preencherá um anel de teflon previamente assentado sobre a placa de teflon. A energia aplicada para colocar e acomodar o material no interior do anel deve ser suficiente para permitir o preenchimento de modo homogêneo de todos os espaços de seu interior, inclusive na parte inferior. Depois de concluída esta operação, passa-se um fio de nylon esticado para acertar a superfície da face superior.

Preenchem-se, no mínimo, quatro anéis para cada amostra. Com o material restante, molda-se duas esferas com cerca de 2cm de diâmetro, cada. Todo o material, anéis e esferas deverão ser secos em estufas a 60°C durante um período mínimo de 6h.

Retira-se os materiais da estufa em seguida, após equilíbrio térmico, realiza-se as medidas e observações referentes a contração do diâmetro

de solo em relação ao diâmetro interno do anel – os quais resultaram em um valor médio de contração diametral em milímetros.

Concluída a etapa anterior, os anéis com seus respectivos materiais são colocados sobre papel filtro, assentado sobre pedra porosa saturada, até que a água acenda capilarmente atingindo a face superior do anel. O tempo decorrido até que a frente úmida atinja toda a superfície deve ser anotado. Os materiais repousam durante, no mínimo, 2h, período em que são anotadas alterações nas superfícies como fissuramento e inchamento.

Decorrido o tempo de repouso, posiciona-se o mini-penetrômetro no centro do anel e disposto sobre a superfície. Cuidando para que esteja vertical, permite-se a ação do peso do mini-penetrômetro e mede-se a profundidade alcançada na amostra – a Figura 2 constante na página 9 deste trabalho ilustra o procedimento. Caso seja necessária mais de uma penetração no anel, manter distanciamento conveniente entre elas e dispostas o mais afastado possível dos bordos do anel.

Das duas esferas de 2cm de diâmetro moldadas e secas em estufa, uma das delas é imersa em água e observa-se o seu comportamento. Segundo Godoy (1997) pode acontecer:

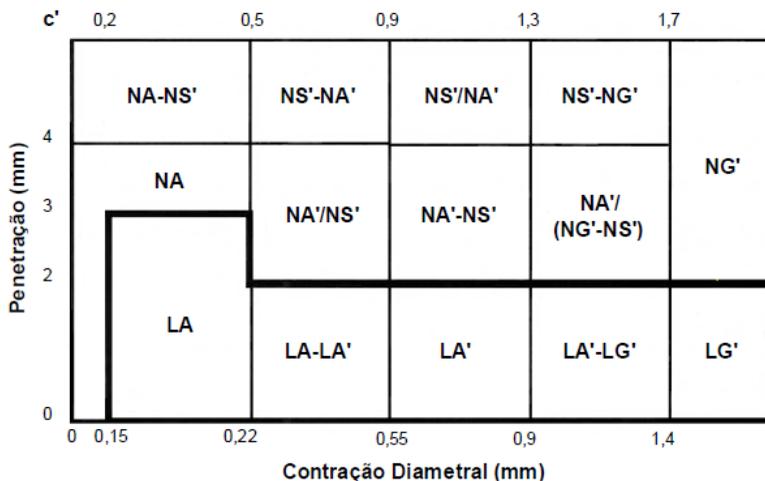
- i. A esfera se desagrega nos primeiros 10 segundos e as partículas de solo podem ser identificadas;
- ii. A esfera se desagrega em até 2 horas e as partículas de solo podem ser identificadas;
- iii. A esfera se rompe em blocos milimétricos;
- iv. A esfera de solo se trinca ou não se altera.

A outra esfera, com o auxílio do polegar, é submetida ao esmagamento, podendo (GODOY, 1997 apud SANT'ANA, 2002):

- i. Sob a pressão do dedo polegar e indicador a esfera se rompe;
- ii. Sob a pressão do polegar e uma superfície plana a esfera quebra-se;
- iii. A esfera fica intacta;

Os resultados obtidos de penetração e contração medidos nas etapas anteriores são inseridos no gráfico contido na Figura 35. Na simbologia do gráfico, o símbolo “-“ separa opções equivalentes e “/” separa opções com menor de grau de incidência.

Figura 35 - Gráfico da classificação MCT pelo Método Expedito das Pastilhas



Fonte: Nogami et al. (1996 apud SANTOS, 2006)

De acordo com Sant'Ana (2002), onde:

LG': argilas lateríticas e argilas lateríticas arenosas;

LA': areias argilosas lateríticas;

LA: areias com pouca argila laterítica;

NG': argilas, argilas siltosas e argilas arenosas não-lateríticas;

NS': siltes cauliniticos e micáceos, siltes arenosos e siltes argilosos não-lateríticos;

NA': areias siltosas e areias argilosas não-lateríticas;

NA: areias siltosas com siltes quartzosos e siltes argilosos não-lateríticos.

#### 4.4.2. Resistência

A resistência ao cisalhamento é o parâmetro do solo responsável por suportar as cargas e manter sua estabilidade. Para quantificar este parâmetro existem diversos ensaios disponíveis na literatura, como ensaio triaxial, palheta e o cisalhamento direto. Para este trabalho optou-se pela o ensaio de cisalhamento direto, por ser um ensaio simples, rápido e comum na mecânica dos solos.

O ensaio de cisalhamento direto baseia-se no critério Mohr-Coulomb, critério apresentado na seção 2.5.1, e neste trabalho foi executado seguindo a norma americana ASTM D3080. A seguir apresentar-se-á, sucintamente, os procedimentos de ensaio.

a) Preparação da amostra

Neste trabalho, a amostra de solo a ser ensaiada tem de ser indeformada a fim de manter as condições em campo, assim optou-se pela moldagem *in loco*. Os corpos de provas são moldados em molde metálicos com dimensões, neste caso, quadradas de 10,16cm por 2cm de altura. Após moldados, os corpos de prova devem ser ter a massa e o teor de umidade determinados, este com o uso das aparas da moldagem.

b) Consolidação

O corpo de prova moldado deve ser posicionado no equipamento de ensaio e inundado, visto que nem sempre se alcança a saturação completa da amostra sem uma pressão no sentido contrário de água. Para consolidar, aplicam-se cargas normais sobre o corpo de prova. A consolidação pode ser drenada ou não drenada, na qual a condição drenada permite a saída de água do corpo de prova. Aplicada a carga, aguarda-se até que a deformação no corpo de prova se estabilize para proceder com a etapa do cisalhamento.

Neste trabalho adotou-se a consolidação com condição drenada e tensão normal aplicada de 32kPa, 75kPa e 124kPa.

c) Cisalhamento

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 ultimo o adotado.

Na deformação controlada aplica-se um deslocamento cisalhante a uma taxa controlada, medido por um extensômetro horizontal, e mede-se a força de cisalhamento induzida com o uso de uma célula de carga. A variação de altura no corpo de prova é medida por um extensômetro sobre a placa superior.

#### d) Resultados

As deformações e tensões cisalhantes obtidas durante o ensaio permitem que sejam elaborados gráficos, que culminam em um gráfico de tensão de cisalhamento máxima por tensão normal.

#### 4.5. BANCO DE DADOS GEORREFERENCIADO

Após atualizar e unificar as bases cartográficas em um único sistema de referência procede-se a inserção dos parâmetros geotécnicos obtidos através dos ensaios. Estes dados serão inseridos, em ambiente SIG, nas unidades geotécnicas preliminares e juntamente com os demais dados já citados anteriormente, consistirão no banco de dados georreferenciado deste trabalho.

#### 4.6. MAPA GEOTÉCNICO

Seguindo a metodologia proposta por Dias (1995), ajusta-se o mapa geotécnico preliminar com os resultados obtidos através das observações em campo, do relevo e outras fontes, por exemplo, estudos e trabalhos realizados na área com escalas cartográficas maiores.

#### 4.7. MODELO SHALSTAB

O modelo *Shallow Landsliding Stability Model* (SHALSTAB), desenvolvido por Montgomery e Diemitrich (1994), será o modelo utilizado para avaliar as áreas suscetíveis a deslizamentos translacionais rasos. Para aplicação do modelo é necessário os parâmetros geotécnicos, topográficos e hidrológicos.

O modelo original proposto por Montgomery e Diemitrich (1994) considera um único conjunto de parâmetros geotécnicos, coesão, ângulo de atrito interno e peso específico do solo, para toda a área de estudo e o fluxo de água subsuperficial baseado em O'Loughlin (1986) - unidirecional e constante. Para superar a limitação geotécnica, neste trabalho, utilizou-se o algoritmo proposto por Michel (2013). Este algoritmo, além de poder ser executado no *software* ArcGIS<sup>®</sup>, permite especializar os parâmetros geotécnicos e incluir a coesão de raízes e peso de vegetação no solo – para fins deste estudo os parâmetros de vegetação serão ignorados. Já para limitação hidrológica, Tarboton (1997) desenvolveu o método D-Infinito, que analisa o fluxo de água

subsuperficiais em infinitas direções e pode ser utilizado em ambiente SIG através do *software* Taudem<sup>®</sup>.

Em suma, a determinação das áreas suscetíveis a deslizamentos translacionais rasos dar-se-á pela utilização do algoritmo proposto por Michel (2013) e pelos dois métodos de determinação dos fluxos subsuperficiais, o método original baseado em O'Loughlin (1986) e o método de Tarboton (1997), a fim de se analisar os resultados obtidos por cada método.

## 5. RESULTADOS

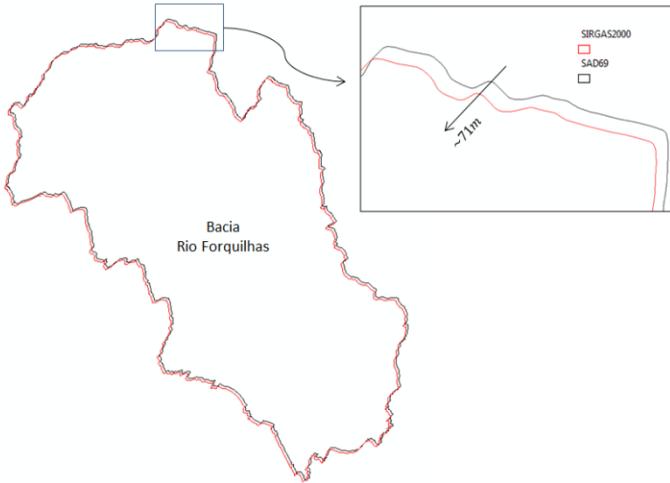
Os resultados obtidos neste trabalho tem por objetivo executar o mapeamento de áreas suscetíveis a deslizamentos translacionais rasos na bacia do rio Forquilhas pelo modelo SHALSTAB. Todos os produtos cartográficos e banco de dados georreferenciado foram produzidos com o uso do *software* ArcGIS®, da ESRI. Assim, apresentam-se os resultados com a seguinte estrutura:

- i. Transformação da base cartográfica: são apresentados os dados cartográficos em SIRGAS2000 atendendo a resolução 1/2005 do IBGE;
- ii. Parâmetros topográficos: são apresentados os atributos topográficos da bacia, curvas de nível, o modelo digital de terreno e declividade, que subsidiaram as demais análises espaciais deste trabalho;
- iii. Ensaios: são apresentados os resultados dos ensaios de limite de liquidez, limite de plasticidade, granulometria, método expedito das pastilhas – MCT, massa específica real dos grãos, cisalhamento direto e a obtenção indireta dos índices físicos dos solos da bacia;
- iv. Mapa Geotécnico: é apresentado o mapa geotécnico obtido a partir da metodologia de Dias (1995), suas unidades geotécnicas e parâmetros geotécnicos estimados a partir dos ensaios;
- v. Áreas suscetíveis a deslizamentos rasos: são apresentados os mapas de áreas suscetíveis a deslizamentos rasos obtidos através do SHALSTAB e comparado os resultados obtidos pelo fluxo subsuperficial unidirecional e o fluxo subsuperficial de direção infinita.

### 5.1. TRANSFORMAÇÃO DA BASE CARTOGRÁFICA

A transformação da base cartográfica seguiu o método NTV2 em ambiente SIG sugerido por TECNOMAPAS (2014), que utiliza os *grids* do software ProGRID do IBGE. A Figura 36 ilustra o resultado do procedimento para o limite da bacia do rio Forquilhas, destacando o deslocamento angular gerado pela transformação entre SAD69 e SIRGAS2000.

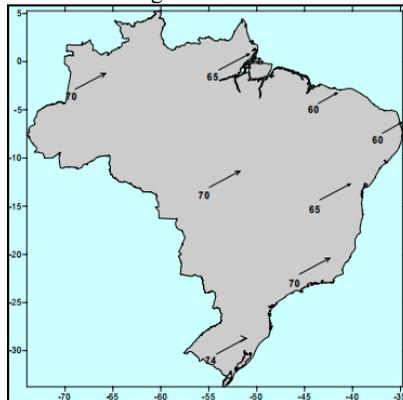
Figura 36 – Transformação de SAD69, em preto, para SIRGAS2000, em vermelho.



Fonte: Autor

Analisando a transformação, verificou-se que o deslocamento angular entre os sistemas de referências era de aproximadamente 71m no sentido nordeste. Ao comparar este vetor aos vetores médios de deslocamentos no país realizado pelo IBGE (Figura 37), averiguou-se que o resultado alcançado neste procedimento é satisfatório, visto que o deslocamento está dentro do intervalo de 60 a 74m e no mesmo sentido verificado por IBGE (2000).

Figura 37 – Vetores de deslocamentos horizontais entre SAD69 e um sistema geocêntrico.



Fonte: IBGE (2000).

## 5.2. PARÂMETROS TOPOGRÁFICOS

Os parâmetros topográficos são de suma importância para se determinar as áreas com suscetibilidade a deslizamentos, em especial, ao utilizar o modelo SHALSTAB. Para mensurar e aplicar estes parâmetros utilizou-se as curvas de nível da restituição aerofotogramétrica produzida pela empresa Aeroimagem S/A, escala 1:2.000, ano 2001 e cedida pela Prefeitura Municipal de São José. As curvas de nível com intervalos de 1 metro e em escala 1:2. foram cedidas em SAD69 e transformadas em SIRGAS2000 para posteriormente gerar o Modelo Digital de Terreno (MDT), Mapa Hipsométrico e o Mapa de Declividades.

O MDT gerado em malha triangular (TIN) permitiu uma melhor interpretação visual do relevo, assim foi utilizado para compreender melhor a dinâmica de formação dos solos e hídrica da bacia e auxiliar na delimitação das unidades geotécnicas. Já o Mapa Hipsométrico, em malha retangular (raster), foi elaborado com resolução quadrática de 10x10m, conforme proposto por Tarolli e Tarboton (2006), e utilizado para os cálculos de fluxos subsuperficiais.

O mapa de declividades pode ser produzido tanto malha triangular quanto em malha retangular. Quanto as malhas, suas funções são as mesmas descritas para as de estruturas análogas no modelo digital de terreno e mapa hipsométrico, exceto que o mapa de declividades raster também é utilizado para análise da estabilidade de encostas pelo modelo SHALSTAB.

A Figura 38, Figura 39, Figura 40, Figura 41 e Figura 42 apresentam as curvas de nível com intervalos de 1 metro, MDT em malha triangular, Mapa Hipsométrico em malha retangular, mapa de declividades em malha triangular e mapa de declividades em malha retangular, respectivamente.

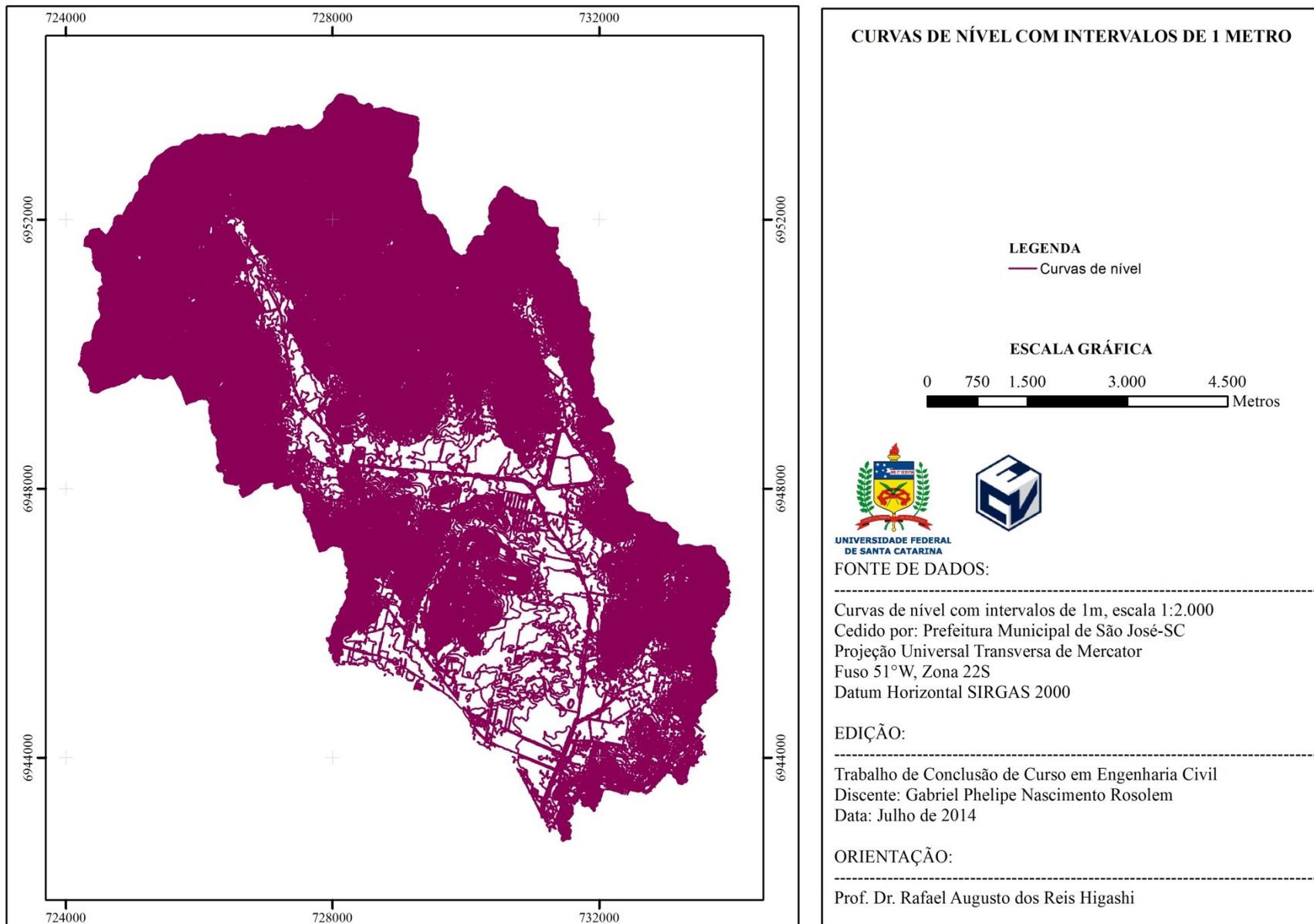
Para a representação das altitudes, as cores claras representam valores baixos e conforme os valores aumentam a tonalidade das cores se tornam mais escuras. Já para a declividade, os intervalos apresentados seguem a classificação de relevo de Embrapa (2006), conforme Quadro 9, e suas cores correspondem a utilizadas pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) em seus mapas de declividade.

Quadro 9- Classes de relevo segundo Embrapa (2006).

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

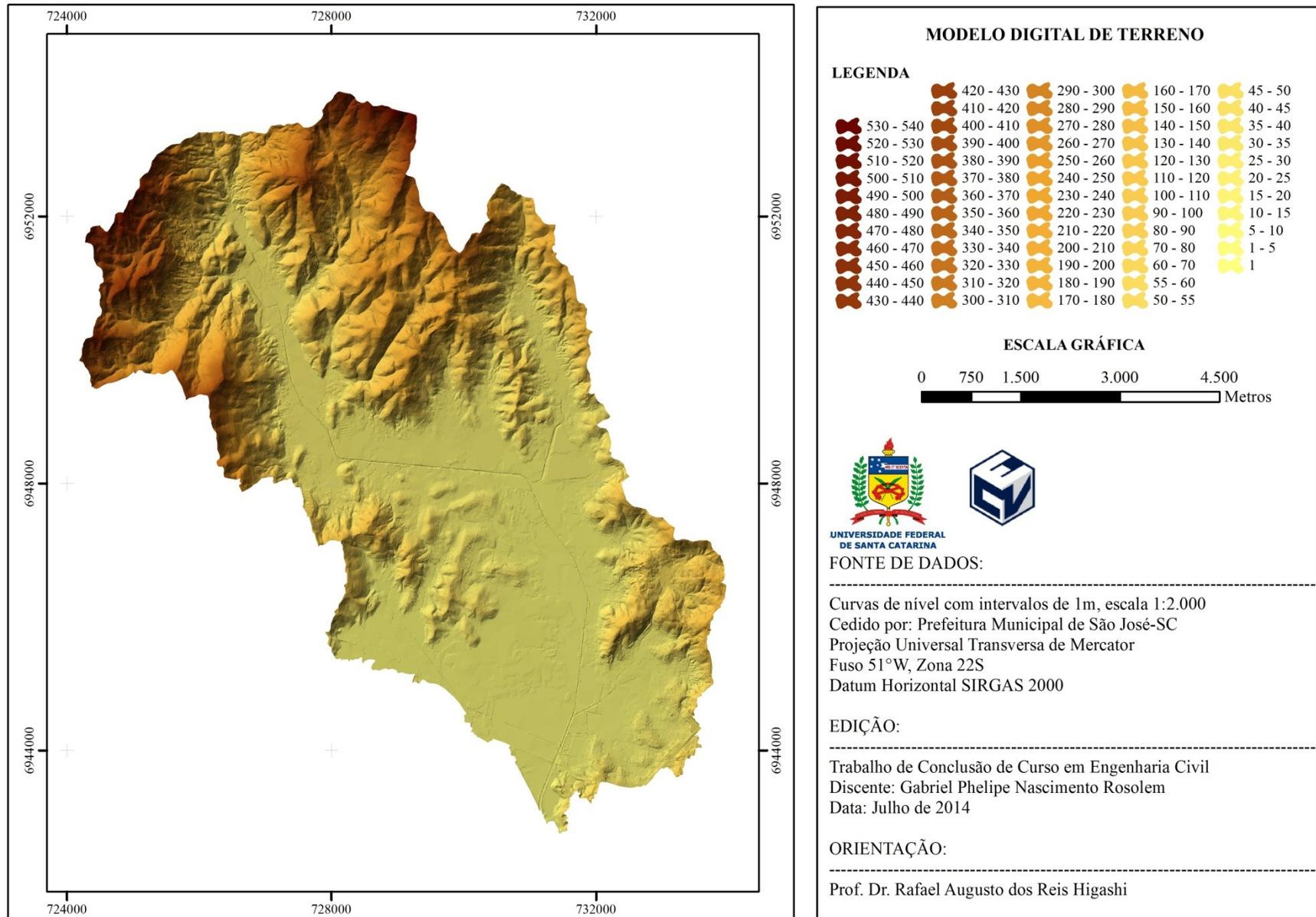
Fonte: Autor

Figura 38 - Curvas de nível em escala 1:2000 da bacia do rio Forquilhas.



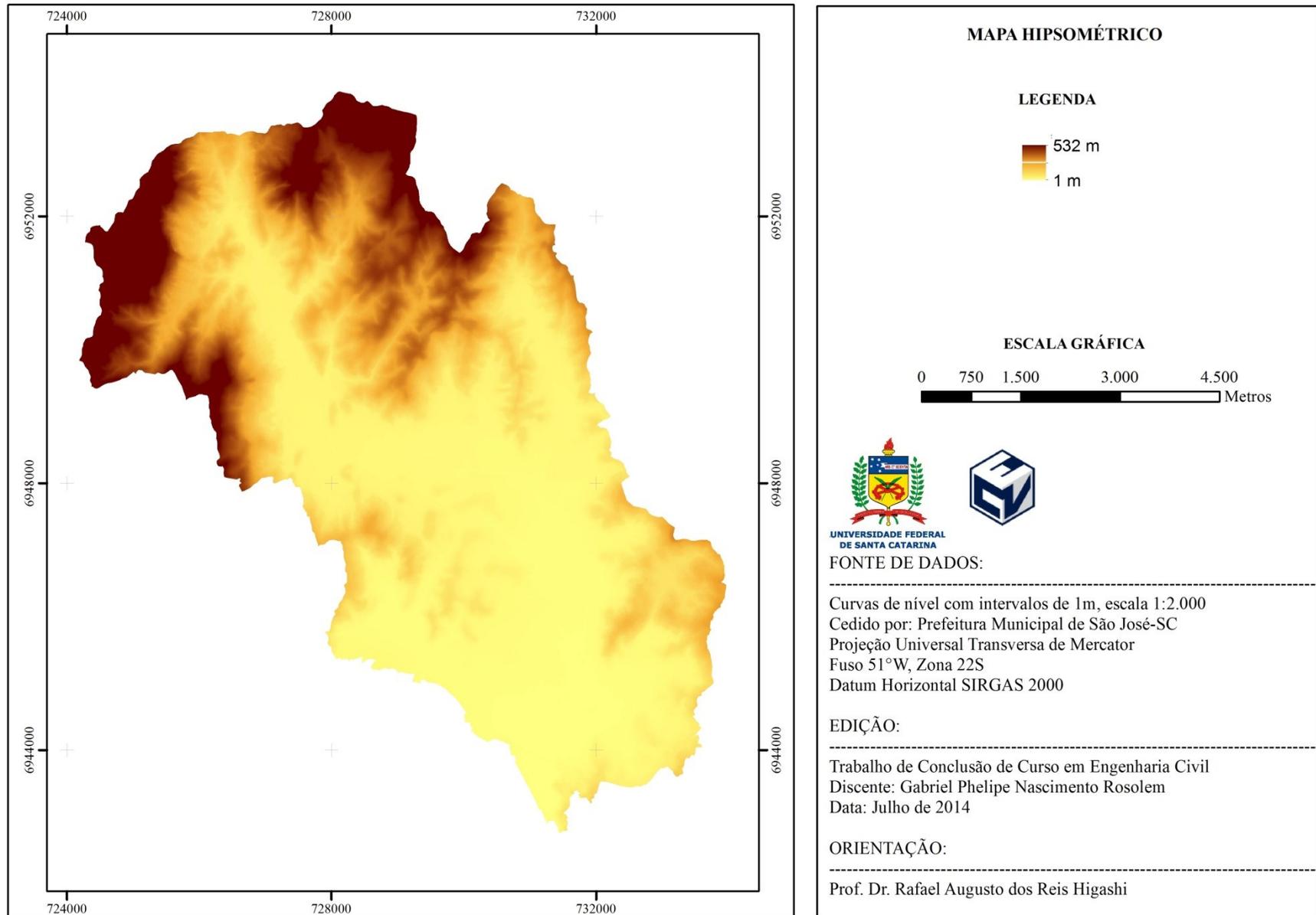
Fonte: Autor

Figura 39 - Modelo Digital de Terreno em malha triangular.



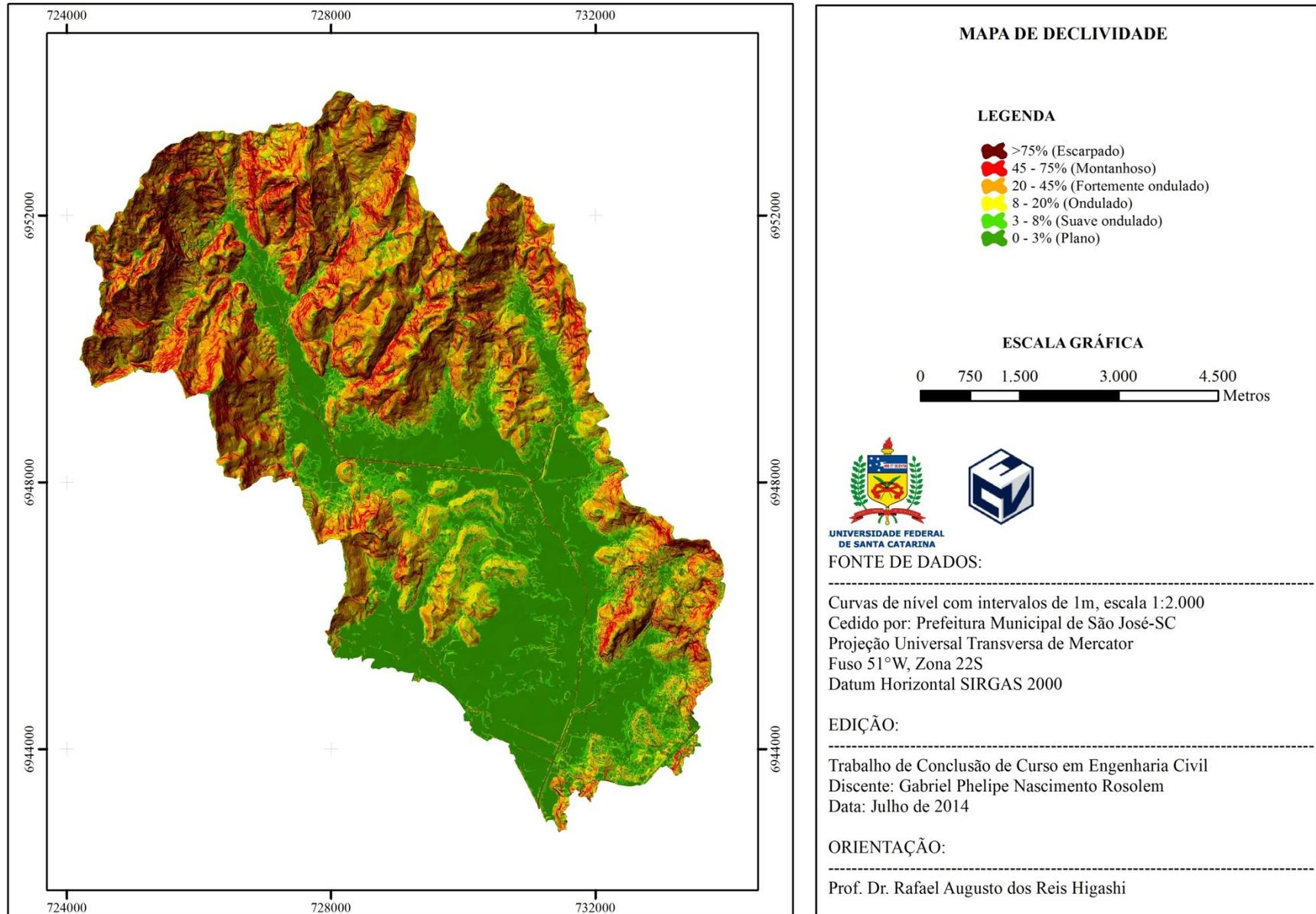
Fonte: Autor

Figura 40 – Mapa Hipsométrico em malha retangular de resolução 10x10m.



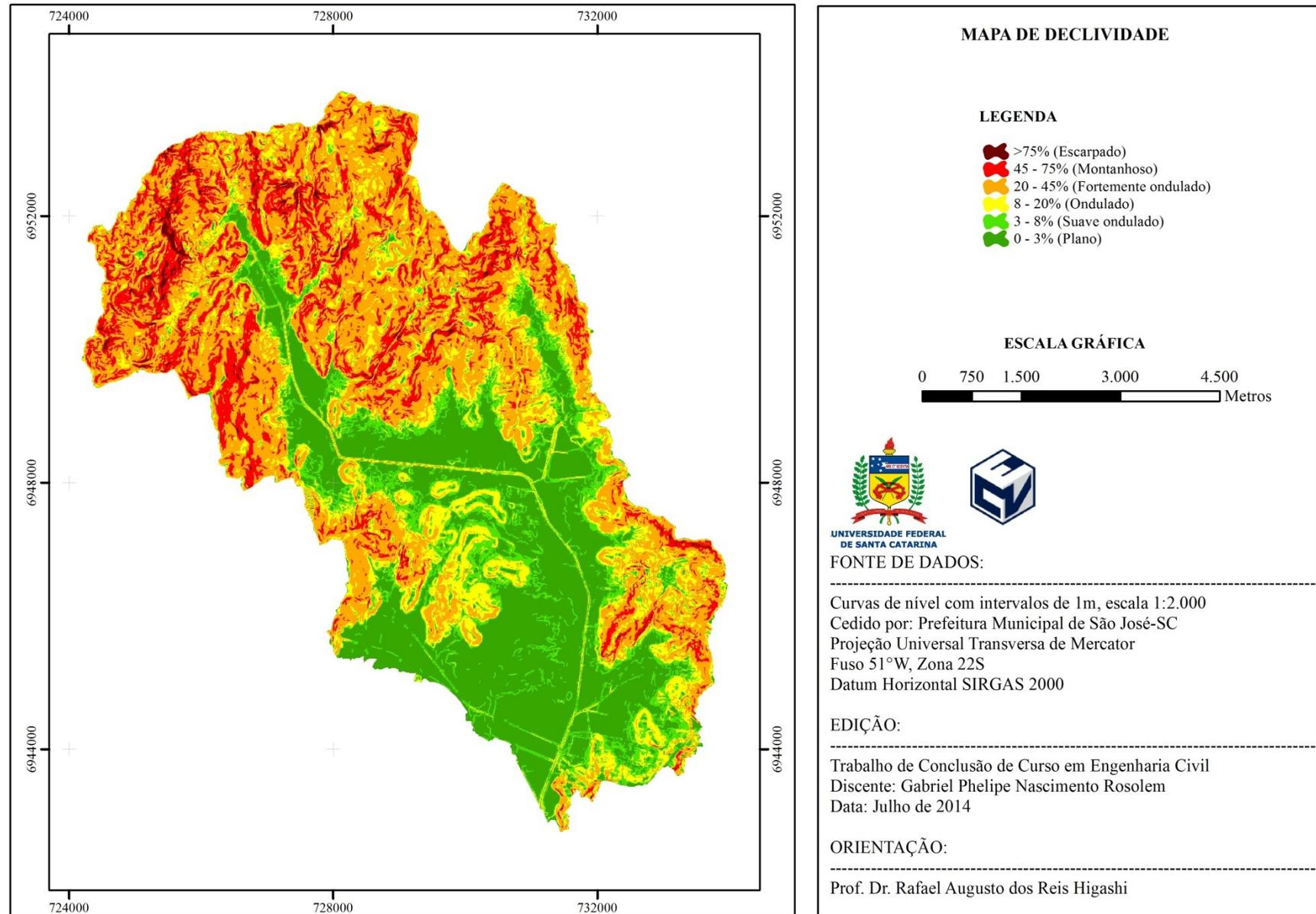
Fonte: Autor

Figura 41 - Mapa de declividades em malha triangular.



Fonte: Autor

Figura 42 - Mapa de declividades em malha retangular de resolução 10x10m.



Fonte: Autor.

### 5.3. ENSAIOS

#### 5.3.1. Pontos de coleta de amostras

A partir do mapa geotécnico preliminar e do modelo digital de terreno, definiu-se 9 pontos de coleta de amostras. Estes pontos foram escolhidos de forma a se obter os parâmetros geotécnicos das bacias e serem de fácil acesso, ou seja, preferencialmente em locais públicos.

Nestes pontos, moldaram-se 4 corpos de provas quadráticos com moldes metálicos para os ensaios de cisalhamento direto, os quais foram envoltos em filme plástico a fim de manter a umidade de campo, armazenados em caixas e imobilizados com serragem para evitar choques no transporte. Além dos corpos de provas para ensaio de cisalhamento direto, coletaram-se cerca de 1,5kg de amostras de solos para os ensaios de caracterização, armazenadas em sacos plástico, lacrados e transportados em caixas, tomando os devidos cuidados para manter a umidade de campo também. Para ambos os tipos de amostras procurou-se sempre retirá-las do horizonte C ou camada C. Todos os ensaios foram realizados no laboratório de Mecânica dos Solos da UFSC. As coordenadas dos pontos foram obtidas no sistema geodésico SIRGAS2000 e em coordenadas UTM (Quadro 10).

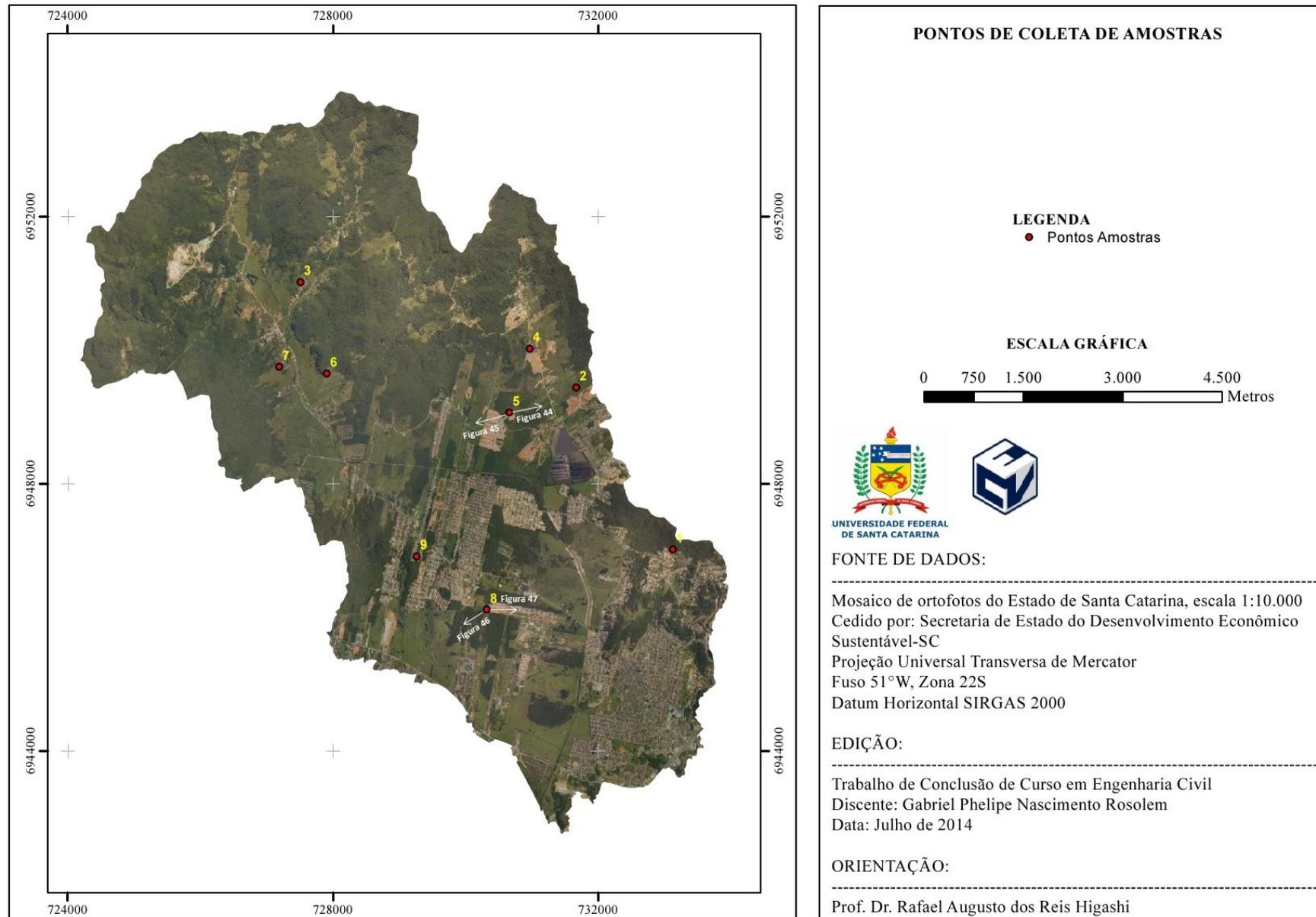
Quadro 10 - Coordenadas UTM dos pontos de coleta de amostras.

<b>Amostra</b>	<b>Leste</b>	<b>Norte</b>
<b>Ponto 1</b>	733.124,409	6.947.013,352
<b>Ponto 2</b>	731.665,137	6.949.437,347
<b>Ponto 3</b>	727.509,365	6.951.013,614
<b>Ponto 4</b>	730.967,896	6.950.015,838
<b>Ponto 5</b>	730.661,638	6.949.066,361
<b>Ponto 6</b>	727.906,113	6.949.647,367
<b>Ponto 7</b>	727.187,862	6.949.747,373
<b>Ponto 8</b>	730.318,861	6.946.111,845
<b>Ponto 9</b>	729.282,105	6.946.905,606

Fonte: Autor

A Figura 43 ilustra os pontos de coleta de amostras na bacia do rio Forquilhas e ilustra a direção da tomadas de fotos da Figura 44, Figura 45, Figura 46 e Figura 47, que exemplificam alguns dos locais de coleta.

Figura 43 - Pontos de coletas de amostras na bacia do rio Forquilhas.



Fonte: Autor

Figura 44 - Coleta de amostra em talude escalonado no Ponto 5.



Fonte: Autor

Figura 45 - Vista frontal do Ponto 5.



Fonte: Autor

Figura 46 – Talude de corte no Ponto 8.



Fonte: Autor

Figura 47 - Vista a partir do Ponto 8.



Fonte: Autor

### 5.3.2. Caracterização

Os solos coletados nos pontos mostrados na subseção anterior foram submetidos ao ensaio de granulometria, teor de umidade natural, massa específica real dos grãos, limite de liquidez, limite de plasticidade e o método expedito das pastilhas da classificação MCT. O Quadro 11 e Quadro 12 resumem os resultados obtidos nos ensaios e o Quadro 13 os índices físicos obtidos a partir deles.

Quadro 11 - Resultados dos ensaios de caracterização dos solos da bacia do Rio Forquilhas.

Amostra	Umidade nat. (%)	$\delta$ (g/cm <sup>3</sup> )	LL (%)	LP(%)	MCT
Ponto 1	18,64	2,65	41	27	LA'-LG'
Ponto 2	32,10	2,76	49	40	NS'/NA'
Ponto 3	29,71	2,62	41	25	LG'
Ponto 4	24,72	2,77	51	40	NS'-NG'
Ponto 5	14,00	2,63	33	27	NS'-NA'
Ponto 6	20,50	2,62	27	26	NS'-NA'
Ponto 7	26,00	2,68	NP	NP	NS'-NG'
Ponto 8	27,00	2,68	57	37	NS'-NG'
Ponto 9	36,00	2,68	41	28	NS'/NA'

\*umidade natural, massa específica real ( $\delta$ ), limite de líquidos (LL), limite de Plasticidade (LP) e Método Expedito das Pastilhas (MCT).

Fonte: Autor

Quadro 12 – Porcentagem em cada faixa granulométrica nos solos amostrados da bacia do Rio Forquilhas.

Amostra	Argila +Silte	Areia Fina	Areia Média	Areia Grossa	Pedr. Fino	Pedr. Médio	Pedr. Grosso
Ponto 1	20,29	16,40	18,54	40,80	3,97	0,03	0,00
Ponto 2	38,81	26,90	17,67	16,64	0,00	0,00	0,00
Ponto 3	20,22	16,10	18,20	40,05	5,43	0,04	0,00
Ponto 4	45,42	12,70	11,22	27,16	3,42	0,09	0,00
Ponto 5	30,74	15,00	16,96	32,27	3,86	0,72	0,49
Ponto 6	24,33	14,30	12,91	40,69	7,74	0,06	0,00
Ponto 7	12,47	17,20	19,52	42,96	7,76	0,06	0,00
Ponto 8	36,11	13,80	15,64	34,44	0,00	0,00	0,00
Ponto 9	40,24	14,80	12,05	27,76	5,15	0,00	0,00

Fonte: Autor

Quadro 13 – Resultado dos índices físicos dos solos da bacia do Rio Forquilhas.

<b>Amostra</b>	<b>A(%)</b>	<b>S (%)</b>	<b>n (%)</b>	<b>e</b>	<b>IP(%)</b>
<b>Ponto 1</b>	52,56	47,44	51,01	1,04	14
<b>Ponto 2</b>	40,86	59,14	59,97	1,50	9
<b>Ponto 3</b>	28,54	71,46	52,14	1,09	16
<b>Ponto 4</b>	18,28	81,72	45,59	0,84	11
<b>Ponto 5</b>	54,58	45,42	44,77	0,81	6
<b>Ponto 6</b>	40,20	59,80	47,32	0,90	1
<b>Ponto 7</b>	25,65	74,35	48,38	0,94	NP*
<b>Ponto 8</b>	31,11	68,89	51,23	1,05	19
<b>Ponto 9</b>	22,07	77,93	55,32	1,24	13

\*NP – não plástico

Fonte: Autor

### 5.3.2.1. Análise dos resultados

#### a) Massa Específica real dos grãos

Analisando-se os resultados de massa específica real dos grãos observa-se que estes estão dentro do intervalo de  $2,67\text{g/cm}^3$  a  $2,77\text{g/cm}^3$ , condizentes com os resultados apresentados por Higashi, Dias e Maccarini (2012) (Quadro 14) para Cambissolos e Argissolos Vermelho-Amarelo com substrato granito do sul do Brasil.

Quadro 14 - Principais características geotécnicas de cambissolos e argissolos vermelho-amarelo na região sul do Brasil.

Property		Cambissols	Red-Yellow Podzolic
Medium grain size distribution (%) <sup>(1)</sup>	Sand	48.51	36.43
	Silt	42.39	23.21
	Clay	9.10	40.36
Origin rock		Granite	Granite
Horizon sampling		C	B/C and C
Average specific gravity		2.67	2.77
Water content (%)		14.23-15.31	19.24-25.18
Optimum moisture content <sup>(2)</sup> (%)		10.5-32.7	13.7-35.4
Maximum dry density (kN/m <sup>3</sup> )		12.2-18.6	13.1-19.8
Natural cohesion (kPa)		8.1-104.1	22.3-74.1
Submerged cohesion (kPa)		36.5-0	17.5-6.4
Natural friction angle (degrees)		31.9-46.1	28.7-37.3
Submerged friction angle (degrees)		23.2-41.3	20.1-35.6
Average CBR <sup>(2)</sup> (%)		18	16

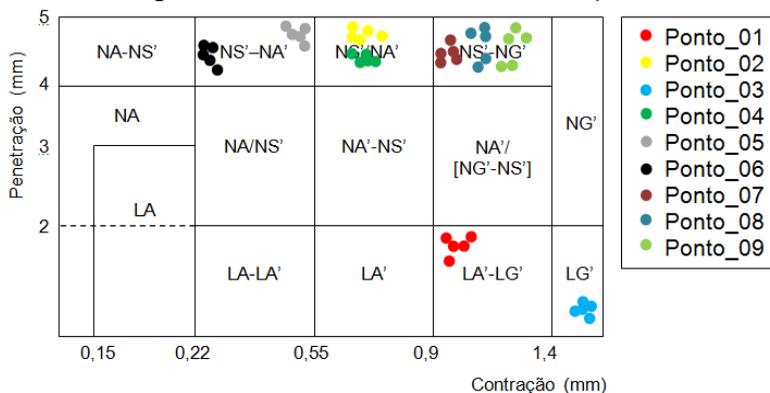
Notes: (1) With deflocculating agent; (2) Normal proctor energy.

Fonte: adaptado de Higashi, Dias e Maccarini (2012).

## b) Classificação MCT

A Figura 48 ilustra o enquadramento dos solos da bacia do rio Forquilhas na classificação MCT enquanto a Figura 49 ilustra a amostra de ponto coletado.

Figura 48 - Resultados dos ensaios da classificação MCT.



Fonte: Autor

Figura 49 - Corpos de provas do Ponto 6 submetidos a ascensão capilar de água.



Fonte: Autor

Os resultados da classificação MCT foram obtidos a partir do método expedito das pastilhas e permitem estimar o comportamento dos solos da bacia. Desta maneira, verifica-se que os solos são predominantemente de comportamento não lateríticos, sendo mais recorrentes os solos siltosos não lateríticos (NS').

Dentro da classificação MCT, a classe de solos de comportamento não laterítico possui uma heterogeneidade muito grande. Os solos pertencentes a esta classe tem ocorrência e comportamento extremamente variados, desde argilas e siltes até areias e pedregulhos com matacões, de composição mineralógica simples a muito complexa, etc (NOGAMI e VILLIBOR, 1995). Esta classificação coincide com as características pedológicas dos Cambissolos, solo predominante na área de estudo e com horizonte B incipiente que, segundo Oliveira (2008), horizontes deste tipo apresentam uma diversidade muito grande de atributos - impossibilitando um padrão geral de comportamento.

Segundo Villibor, Nogami e Fabri (1986) e Nogami e Villibor (1995) as características do grupos da classificação MCT encontrados na bacia, sucintamente, são:

i. Grupo NS'

São solos que contêm siltes pouco coesivos e pouco plásticos, de permeabilidade e infiltrabilidade médias. Caracterizam-se principalmente por apresentarem baixa capacidade de suporte quando imersos em água, elevada expansibilidade e baixo módulo de resiliência. Em encostas geralmente apresentam baixa massa específica aparente seca, baixa capacidade de suporte e grau elevado de erodibilidade.

ii. Grupo NA'

São solos com areias argilosas ou siltosas de comportamento não laterítico. Em geral, os tipos mais representativos, geneticamente, são solos saprolíticos originados de rochas ricas em quartzo como granito e gnaisses. Possuem expansibilidade média a elevada, infiltrabilidade e permeabilidade baixa.

iii. Grupo LA'

Os solos constituintes deste grupo são tipicamente areias argilosas lateríticas, pouco plásticas e geralmente pertencentes a classe pedológica dos Latossolos e Argissolos. Possuem infiltrabilidade e permeabilidade baixas, com formação de trincas quando contraem por secagem. Em condições naturais possuem baixa capacidade de suporte e podem ser colapsíveis por imersão em água.

iv. Grupo LG'

Os solos constituintes deste grupo são frequentemente argilas e argilas arenosas, muito plásticas e muito coesivas e pertencentes a classe pedológica dos Latossolos, Argissolos e Nitossolos. São muito contrácteis por secagem e possuem baixa expansibilidade. Em estado natural apresentam elevada permeabilidade e boa resistência a erodibilidade pluvial.

v. Grupo NG'

São argilas ou argilas siltosas típicas de solos saprolíticos argilosos derivados de rochas sedimentares, como folhelhos e argilitos, ou rochas cristalinas ricas em minerais altamente intemperizáveis. São muito coesivos e plásticos, baixa permeabilidade e infiltrabilidade média, além de altamente expansivos. Classificam-se neste grupo os solos superficiais pertencentes a classe pedológica dos Vertissolos.

Ressalta-se que estes comportamentos são estimados com base somente no método das pastilhas, que para resultados mais confiáveis deve-se realizar a metodologia completa da classificação MCT.

Ao comparar os resultados obtidos na bacia para este ensaio com alguns solos de Santa Catarina (Quadro 15), verifica-se que estes estão dentro do esperado.

Quadro 15 - Resultados de alguns ensaios de MCT no estado de Santa Catarina.

Localidade	Prof. de coleta (m)	Tipo de solo	Classific. MCT
Tubarão <sup>1</sup>	3	Horiz. C de granito argiloso	NS'NA'
	5,5	Horiz. C de granito arenoso	NG'
	0,5	Horiz. C de granito coluv. areno-siltoso	NS'-NA'
	2	Horiz. B de granito argilo-siltoso	NG'
	2	Horiz. C de granito arenoso	NA-NS'
	2,5	Horiz. C de granito arenoso	NG'
	2	Horiz. C de granito silto-arenoso	NA-NS'
	2	Horiz. C de granito argiloso	NG'
	3,5	Horiz. C de granito arenoso	NA-NS'
Laguna <sup>2</sup>	0,5	Horiz. B de granito argiloso	LG'
	2	Horiz. C de granito arenoso	NA-NS'
	1,5	Horiz. C de granito argiloso	NG'
	1	Horiz. C de granito argiloso	NG'
	1,5	Horiz. C de granito silto-arenoso	NS-NG'
Capivari de Baixo <sup>3</sup>	1	Horiz. C de granito silto-arenoso	NS'-NA'
	1	Horiz. C de granito silto-arenoso	NS'/NA'
	1,5	Horiz. C de granito argiloso	NS'-NG'
Florianópolis <sup>4</sup>	0,5	Areia Quartzosa Podzolizada	NS'-NA'
	2	Horiz. C de granito argilo-arenoso	LG'
São Francisco do Sul <sup>5</sup>	2	Horiz. C de granulito	NS'-NA'
	1	Horiz. C de granulito	NS'-NA'
Ipumirim <sup>6</sup>	1,5	Horiz. B de basalto	LG'

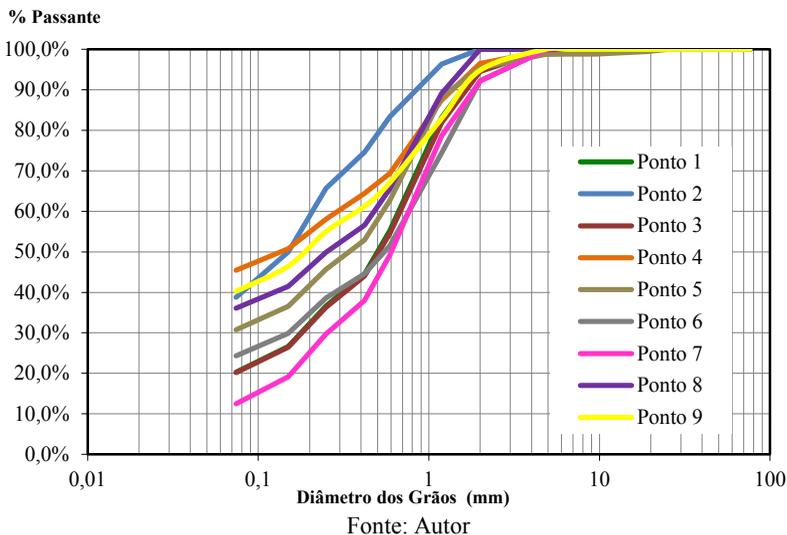
**NOTA:** 1- Higashi (2006), 2 – Heidemann et al. (2007), 3 - Higashi et. al (2004), 4 - Higashi et. al (2003), 5 - Higashi e Figueiredo (2003), 6 – Higashi e Spricigo (2003).

Fonte: Rosniciek e Imai (2013)

### c) Granulometria

Na Figura 50, observam-se os resultados obtidos para o ensaio de granulometria por peneiramento.

Figura 50 - Curvas granulométricas dos solos da bacia do Rio Forquilhas.



Interpretando os resultados das curvas e das porcentagens de cada faixa granulométrica observa-se que os solos dos pontos 2, 4, 8 e 9 são silto-argilosos ou argilo-siltosos e os pontos 1, 3, 5, 6 e 7 são solos arenosos.

### d) Índice de plasticidade (IP)

O índice de plasticidade é obtido a partir dos resultados de LL e LP, os quais são realizados com a fração fina dos solos. Verificou-se que os solos são predominantemente de plasticidade mediana.

### e) Umidade natural

Observou-se que os pontos com maiores umidades são os solos silto-argilosos ou argilo-siltosos, devido a maior capacidade de retenção de da fração argila.

### 5.3.3. Resistência

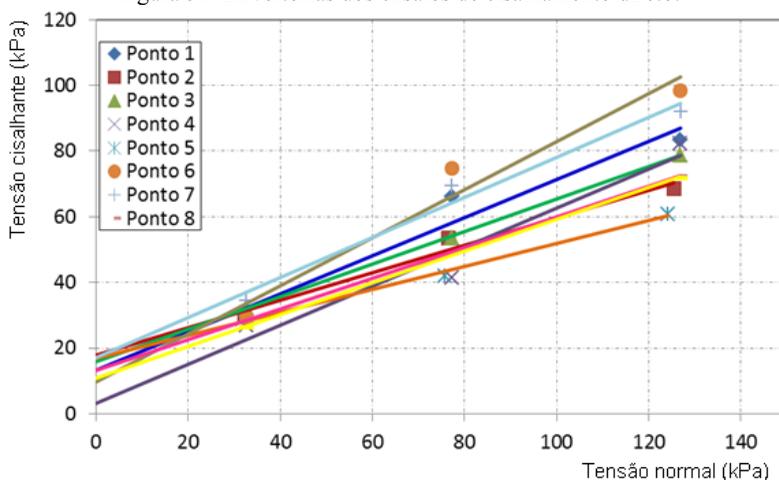
O Quadro 16 resume os resultados do ensaio de cisalhamento direto consolidado-drenado, coesão ( $c$ ) e ângulo de atrito interno ( $\phi$ ), e os índices físicos,  $\gamma$  natural e saturado, obtidos através do solo indeformado contido no molde do ensaio. As envoltórias dos ensaios são visualizadas na Figura 51.

Quadro 16 - Resultado dos ensaios de cisalhamento direto e índices físicos relacionados aos corpos de provas com solo indeformado.

Amostra	$\gamma$ nat (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma$ sat (kN/m <sup>3</sup> )	$c$ (kN/m <sup>2</sup> )	$\phi$ (graus)
Ponto 1	15,11	17,74	13,4	30,2
Ponto 2	14,32	16,72	18,9	19,4
Ponto 3	15,99	17,42	15,9	26,3
Ponto 4	15,79	19,26	3,2	30,8
Ponto 5	16,19	18,64	14,6	19,3
Ponto 6	16,28	18,18	9,9	36,2
Ponto 7	17,07	18,32	17,1	31,4
Ponto 8	16,28	17,85	13,2	25,0
Ponto 9	15,99	17,17	10,9	25,8

Fonte: Autor

Figura 51- Envoltórias dos ensaios de cisalhamento direto.



Fonte: Autor

## 5.3.3.1. Análise dos resultados

Analisando os resultados obtidos com alguns valores obtidos para solos de substratos granito ensaiados em Santa Catarina (Quadro 17), nota-se que a coesão inundada está dentro do intervalo observado. Entretanto, os valores de ângulo de atrito interno são considerados baixos.

Observa-se a partir da comparação dos resultados de ângulo de atrito interno com os de granulometria que os solos com maior fração de areia grossa e pedregulho fino são os que possuem os maiores ângulos de atrito interno.

Quadro 17 - Alguns valores de coesão e ângulo de atrito dos solos de Santa Catarina para Cambissolos e Argissolos Vermelho-Amarelo.

Localidade	Tipo de solo	Coesão Natural (kPa)	Coesão Inundada (kPa)	Ângulo atrito natural (o)	Ângulo atrito inundado (o)
Tubarão1	Horiz. C de granito silto-argiloso	15,3	11,0	36,2	31,4
	Horiz. C de gran. coluv. areno-siltoso	33,4	3,6	44,5	32,1
	Horiz. B/C de granito agilo-siltoso	104,1	13,4	46,1	35,1
	Horiz. C de granito arenoso	36,2	13,0	36,6	38,7
	Horiz. C de granito areno-argiloso	55,2	0 (zero)	32,6	41,3
	Horiz. C de granito silto-arenoso	8,6	1,4	31,9	31,5
	Horiz. B/C de granito silto-argiloso	37,3	11,8	24,3	23,2
	Horiz. C de granito silto-argiloso	17,2	11,0	42,9	31,6
Florianópolis2	Horiz. C de granito arenoso	39,9	7,3	38,9	33,7
	Granito / hor. C - Ilha-PVg1	17,9	0,0	36,0	35,0
	Granito / hor. C - Ilha-PVg1	25,6	-	37,0	-
	Granito / hor. B/C - Itacorubi-PVg2	33,1	20,4	30,0	28,0
	Granito / hor. B - Canasvieiras-Cde	-	9,1	-	34,0
Florianópolis3	Granito / hor. C - Canasvieiras-Cde	-	4,0	-	30,0
	Granito / hor. C - Cacupé	28,9	5,2	35,9	35,9
	Granito / hor. C - Jardim Guarani	42,3	16,8	36,7	32,4
Santo Amaro da Imperatriz4	Gran plano arg - Jardim Guarani	8,1	2,1	37,7	26,6
	Amostra 14 Granito / hor. C	21,6	15,9	41,5	30,9
	Amostra 24 Granito / hor. C	22,7	4,2	41,3	30,4
	Amostra 34 Granito / hor. C	46,9	6,0	30,9	35,4
Florianópolis5	Granito/hor. C - Araquães	25,0	3,0	33,2	32,0
	Granito/hor. C - Córrego Grande	24,0	2,0	54,6	37,3
	Granito/hor. C - S. Lagoa	20,0	14,0	37,0	34,4
	Granito/hor. C - Serrinha	58,0	12,0	34,7	34,4
	Granito/hor. C - SC - 401	22,0	0,0	39,2	40,1
	Granito/hor. C - Praia Mole	11,0	7,0	48,0	43,3
	Granito/hor. C - João Paulo	18,0	4,0	38,6	37,3
	Granito/hor. C - Cacupé	18,0	6,0	37,1	35,2

NOTA: <sup>1</sup>Higashi (2006)/ <sup>2</sup>Santos (1997)/ <sup>3</sup>Raimundo et al. (2002)/ <sup>4</sup>Meirelles e Davison Dias (2004)/ <sup>5</sup>Bevilacqua (2004)

Fonte: adaptado de Rosniciek e Imai (2013).

#### 5.4. MAPA GEOTÉCNICO

O mapa geotécnico realizado seguiu a metodologia de Dias (1995). Primeiramente realizou-se um mapa geotécnico preliminar, que foi ajustado com base nas saídas de campo e análise de trabalhos realizados na área de estudo em maior escala.

A bacia é formada por solos residuais e solos colúviare e/ou aluvionares. Os solos residuais estão localizados nos trechos superiores de encostas e em sua maioria são originados a partir de granitos, gnaisses e suas variações. Já os solos aluvionares são encontrados na região de planície e os solos colúviare estão normalmente localizados nos trechos inferiores das encostas.

As unidades geotécnicas identificadas foram: Cambissolo de substrato granito(Cg), Cambissolo de substrato gnaiss e migmatitos(Cgn), Cambissolos de substrato depósitos de encostas (Cde), Argissolo Vermelho- Amarelo de substrato gnaisses e migmatitos (PVAgn) e Depósitos aluvionares de substrato sedimentos quaternários (ASq).

O Quadro 18 abaixo quantifica a área de cada unidade geotécnica e estas podem ser visualizadas no mapa geotécnico da Figura 52.

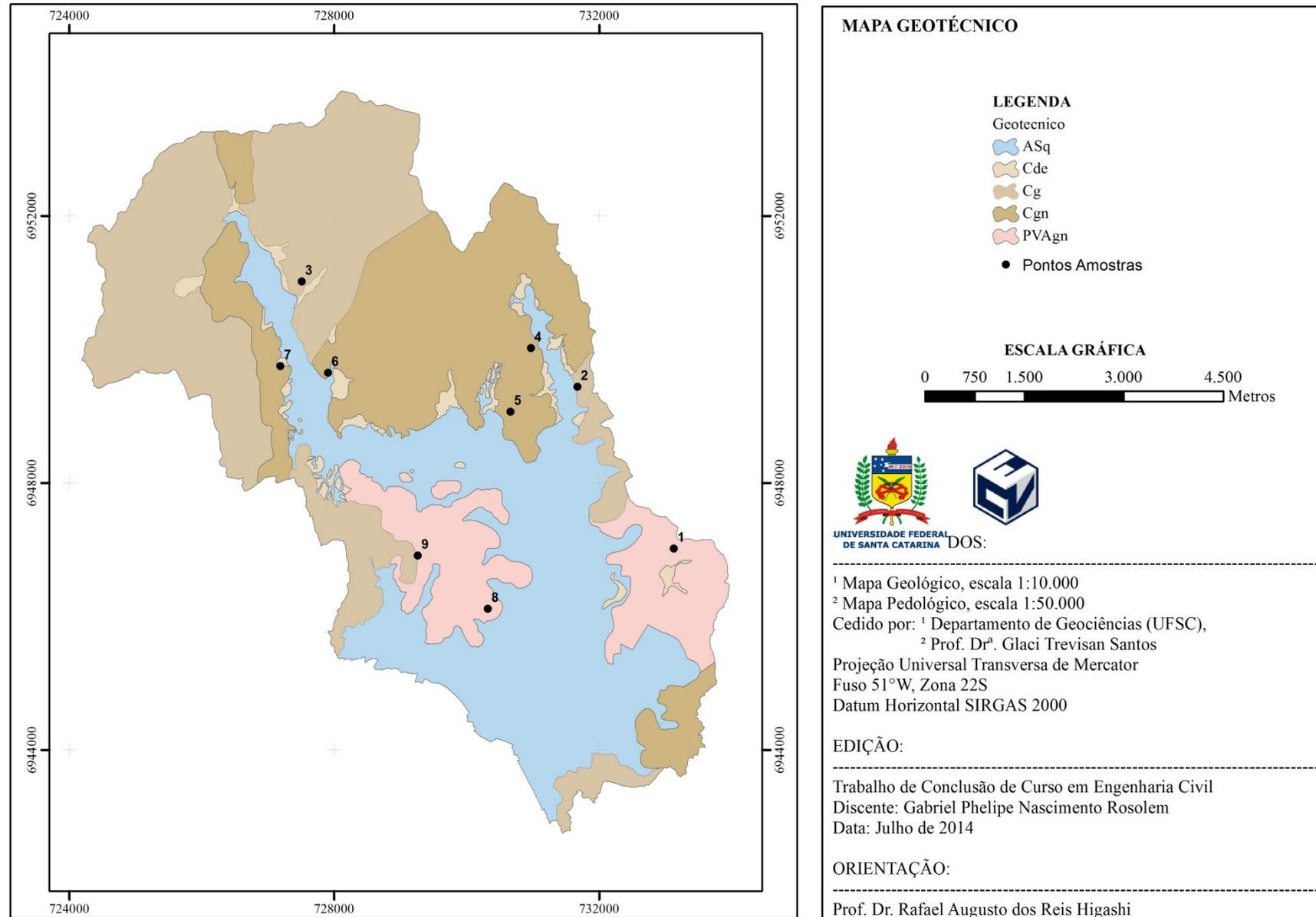
Quadro 18 - Simbologia e área das unidades geotécnicas da bacia do Rio Forquilhas.

<b>Simbologia</b>	<b>Denominação</b>	<b>Área (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Área (%)</b>
ASq	Depósitos Aluvionares substrato sedimentos quaternários	17,12	31,6
Cg	Cambissolo de substrato granito	16,69	30,8
Cde	Cambissolo de substrato depósitos de encostas	1,38	2,5
Cgn	Cambissolo de substrato gnaisses e migmatitos	12,84	23,7
PVAgn	Argissolo Vermelho-Amarelo de substrato gnaisses e migmatitos	6,16	11,4

Fonte: Autor

Para representação do mapa geotécnico, optou-se por utilizar as cores propostas por EMBRAPA (2006) para gleissolos na unidade ASq, cambissolos háplicos, flúvicos e húmicos para as unidades Cg, Cde, Cgn e argissolos vermelho-amarelo na unidade PVAgn.

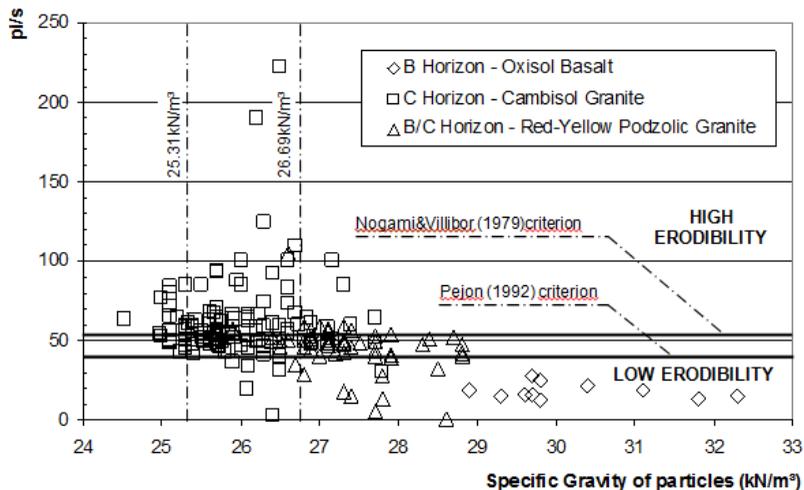
Figura 52 - Mapa geotécnico da bacia do rio Forquilhas.



Fonte: Autor.

Ao comparar os solos presentes na bacia com o estudo desenvolvido por Higashi, Dias e Maccarini (2012) (Figura 53), podem inferir que os solos da área de estudo possuem elevada suscetibilidade a erosão.

Figura 53 - Resultado dos ensaios de MCT – Infiltrabilidade e perda de massa por imersão.



Fonte: Higashi, Dias e Maccarini (2012)

A seguir, apresenta-se sucintamente as características das unidades geotécnicas identificadas na área estudada.

#### 5.4.1. Depósitos aluvionares substrato sedimentos quartenários (ASq)

A unidade ASq é composta principalmente por solos de textura arenosa com origem de depósitos aluvionares. Na bacia, estão localizados em relevo plano com altitude variando de 1 a 60m, portanto estes solos podem possuir o lençol freático próximo a superfície. Por esse motivo, a utilização do sistema fossa e sumidouro fica restrita ao nível de água do terreno, embora estes solos não funcionem corretamente como filtro - a estas áreas devem ser previstas redes de esgoto.

Por ser formada por depósitos sedimentares, a unidade pode apresentar intercalações de deposição de areias e argilas, inclusive de argilas moles. Estas podem vir a causar problemas construtivos se não considerados adequadamente seus parâmetros de resistência e

compressibilidade. Já as camadas de solos arenosos parcialmente saturadas podem desenvolver o colapso, redução brusca de volume, caso sejam submetidas a inundações súbitas, assim as fundações das edificações devem prever tal comportamento em seus dimensionamentos.

#### 5.4.2. **Cambissolo de substrato granito (Cg)**

A unidade Cg é composta por solos com horizonte B incipiente, em desenvolvimento, originados do granito. Na bacia, a unidade geotécnica está localizada em uma faixa muito ampla de relevo, desde suave ondulado até escarpado e sua espessura varia muito desde rasos até profundos.

O Cambissolo apresenta os horizontes superficiais, A e B, pouco espessos, somados são geralmente menores que 1 metro, assim a espessura do solo é essencialmente em função da camada e/ou horizonte C. Este último, devido a menor intensidade do intemperismo ainda possui características da rocha de origem.

No caso do substrato granito, a textura essencialmente arenosa dos horizontes favorece o desenvolvimento de processos erosivos. Além disto, os processos erosivos podem desencadear o rolamento de matacões, comuns em solos originados do granito.

#### 5.4.3. **Cambissolo de substrato depósitos de encostas (Cde)**

A unidade Cde é formada pelos solos de horizonte B incipiente cuja origem é da deposição gravitacional e pluvial de sedimentos do alto da encosta. Na bacia sua ocorrência está em relevo suave ondulado na transição da encosta para a planície de sedimentação.

A origem coluvionar é pouco significativa para os solos desta área, sendo o substrato mais encontrado os sedimentos aluvionares. Devido a posição no relevo podem ser de mal a muito mal drenado, desta forma deve-se ter cuidado com relação ao nível de água igual a unidade ASq.

#### 5.4.4. **Cambissolo de substrato gnaisses e migmatitos (Cgn)**

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

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

#### **5.4.5. Argissolo Vermelho-Amarelo de substrato gnaisses e migmatitos (PVAgn)**

A unidade de PVAgn é composta por solos com horizonte B textural, fator diagnóstico dos Argissolos, com material de origem o gnaiss e migmatitos. Este horizonte caracteriza-se pelo teor de argila ser muito maior em relação ao horizonte A. Assim este solo, em condição de igualdade de relevo, apresenta maior suscetibilidade a erosão que o cambissolo, devido a redução na permeabilidade para o interior do solo. Diferentemente do cambissolo, este solo apresenta os horizontes A e B bem desenvolvido, de maior espessura e com baixa taxa de minerais primários ou facilmente intemperizáveis.

Na bacia encontra-se em relevo suave ondulado a ondulado e com matiz 5YR, que o classifica de acordo com EMBRAPA (2006) como argissolo vermelho-amarelo. No geral, e em comparação aos solos residuais de granito encontrados na bacia, a resistência do horizonte B pode ser considerada baixa.

Os horizontes RA e R, assim como para a unidade Cgn, devem ter as fraturas, falhas e bandeamentos analisados antes de cortes e solicitações mecânicas.

### **5.5. ÁREAS SUSCETÍVEIS A DESLIZAMENTOS**

Para o mapeamento das áreas suscetíveis a deslizamentos translacionais rasos na bacia do Rio Forquilhas, utilizou-se o modelo SHALSTAB por meio do algoritmo desenvolvido por Michel (2013). Este algoritmo permitiu a espacialização dos parâmetros geotécnicos nos cálculos do modelo. Para tanto, cada variável das equações de estabilidade tinha que estar contida em um dado *raster* com resolução igual ao mapa de declividades.

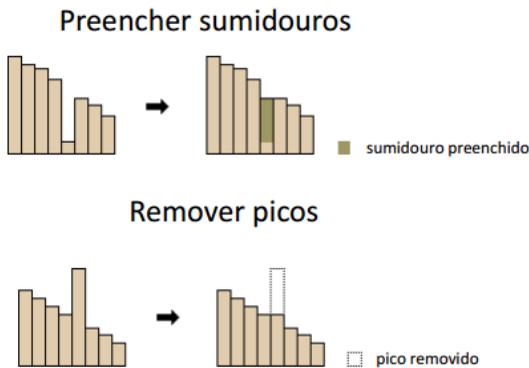
Os parâmetros geotécnicos foram estimados através dos ensaios e georreferenciados com base no mapa geotécnico e compostos por coesão, ângulo de atrito interno, massa específica natural e massa específica saturada, Figura 55, Figura 56, Figura 57, Figura 58, respectivamente, e apresentados a adiante. Cabe ressaltar que para a

unidade Cg os parâmetros geotécnicos são diferentes por não ter tido ensaios suficientes, pela área ser muito grande e composta por cambissolos, e para unidade ASq os valores foram estimados por meio de análise de sondagens da área.

Os parâmetros topográficos foram obtidos para cálculo por meio do mapa de declividades, apresentado anteriormente na Figura 42 da subseção 5.2. A área de contribuição foram obtidas por duas maneiras: a primeira considerando o fluxo sendo unidirecional pelo método D-8 e a segunda considerando-o com infinitas direções pelo método D-Infinito.

O método D-8 é aplicado utilizando as ferramentas de análises espaciais, *hidrology*, disponibilizadas pelo *software* ArcGIS. Enquanto o método D-Infinito é aplicado com o uso do *software* Tudem, disponibilizado pela *Utah State University*, com extensão para ser utilizado no ArcGIS. Para ambos os métodos utilizou-se o procedimento de preencher sumidouros e remover picos, ou seja, remover erros da geração do mapa hipsométrico que promovem picos e/ou rebaixos (Figura 54) para estimar corretamente as direções dos fluxos.

Figura 54 - Procedimento de correção do mapa hipsométrico.



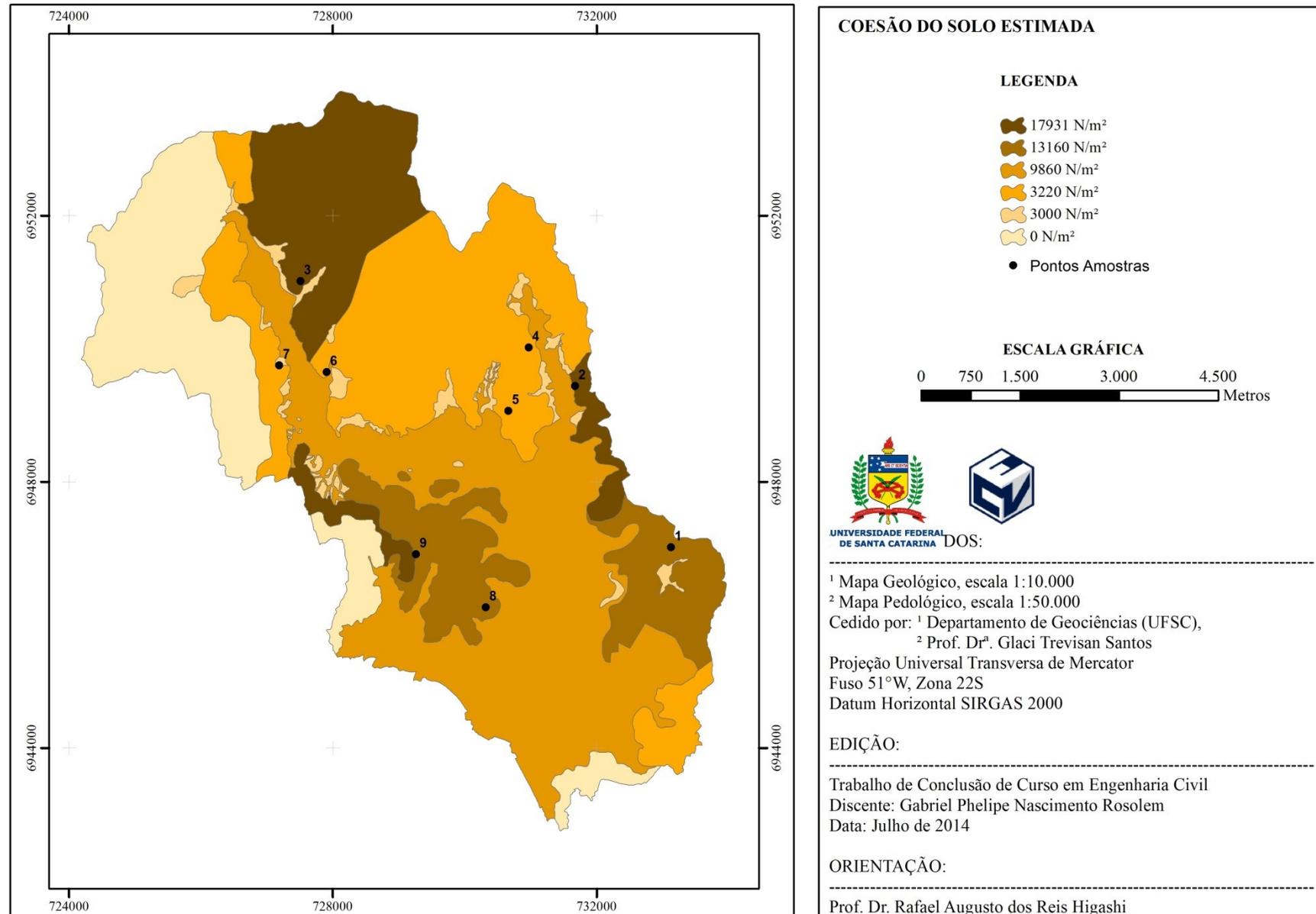
Fonte: Bortoloti (2014)

Pelo resultado da correção ser visualmente idêntico ao Mapa Hipsométrico, estes serão supridos. Os resultados obtidos com os dois métodos de estimar o fluxo serão apresentados intercalados para efeito comparativo.

As Figura 59 e Figura 60 apresentam as direções do fluxo e as Figura 61 e Figura 62 as áreas de contribuição pelo método D-8 e D-Infinito, respectivamente. A partir dos dados expostos, elaboraram-se os mapas de suscetibilidade considerando a massa específica natural

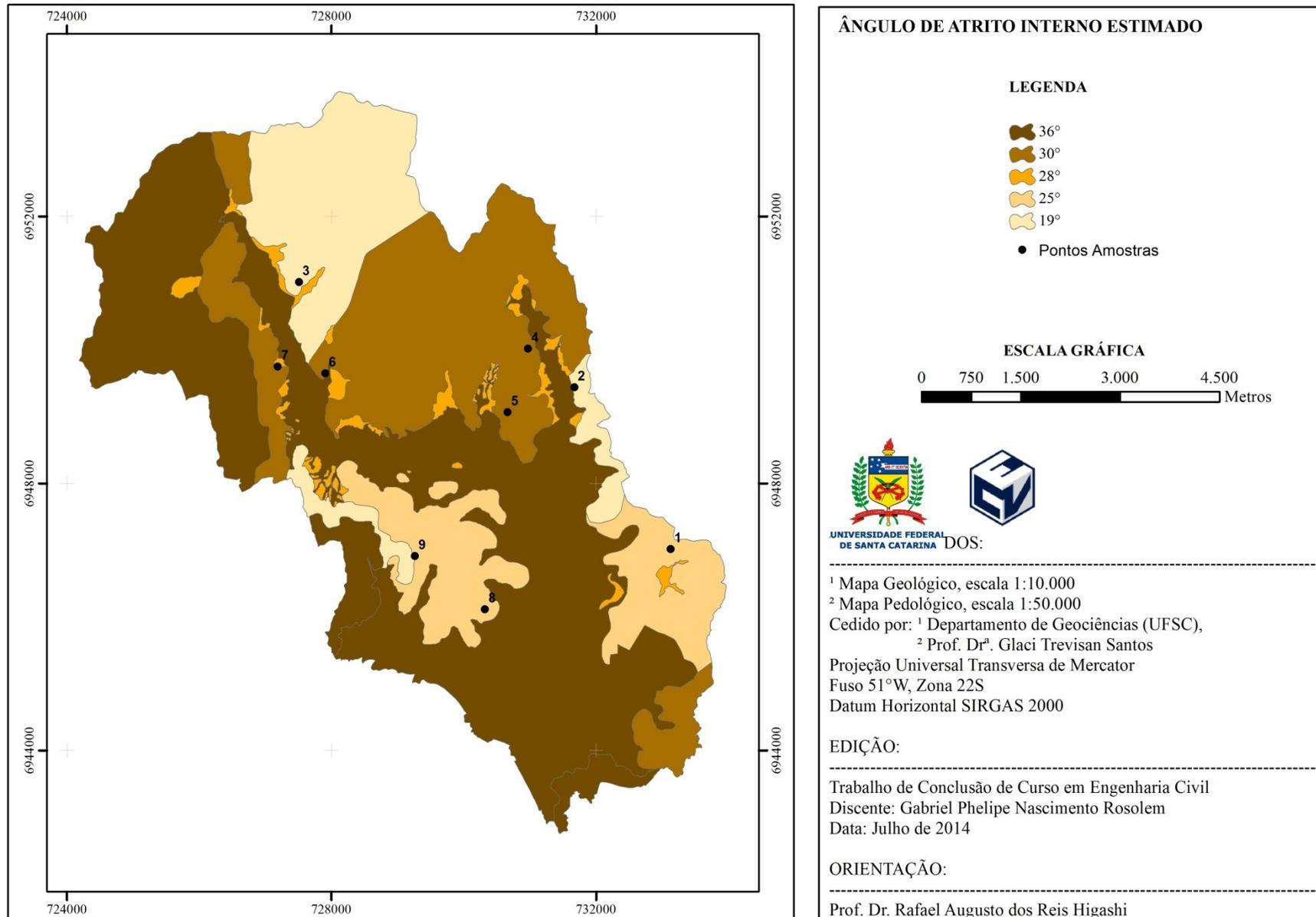
para superfície de ruptura à profundidade de 2 metros (Figura 63 e Figura 64), 5 metros (Figura 65 e Figura 66) e 7 metros (Figura 67 e Figura 68) e considerando a massa específica saturada para as profundidades de ruptura de 2 metros (Figura 69 e Figura 70), 5 metros (Figura 71 e Figura 72) e 7 metros (Figura 73 e Figura 74). Para representar as classes de estabilidade, utilizaram-se cores claras para indicar as áreas estáveis e tonalidades de vermelho para indicar as áreas instáveis.

Figura 55 - Coesão estimada para os solos da bacia do Rio Forquilha



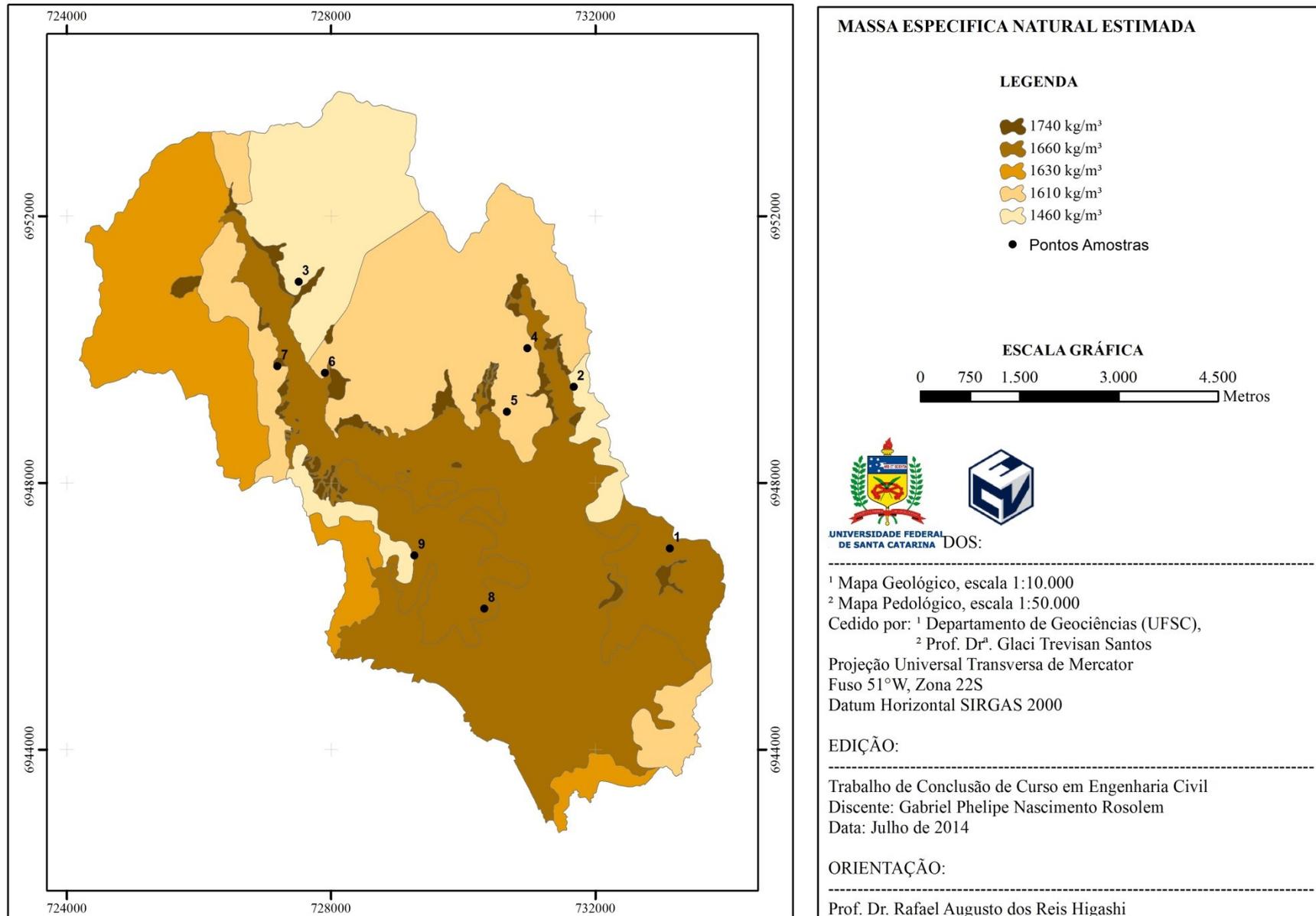
Fonte: Autor

Figura 56 - Ângulo de atrito interno estimado para os solos da bacia do Rio Forquilhas.



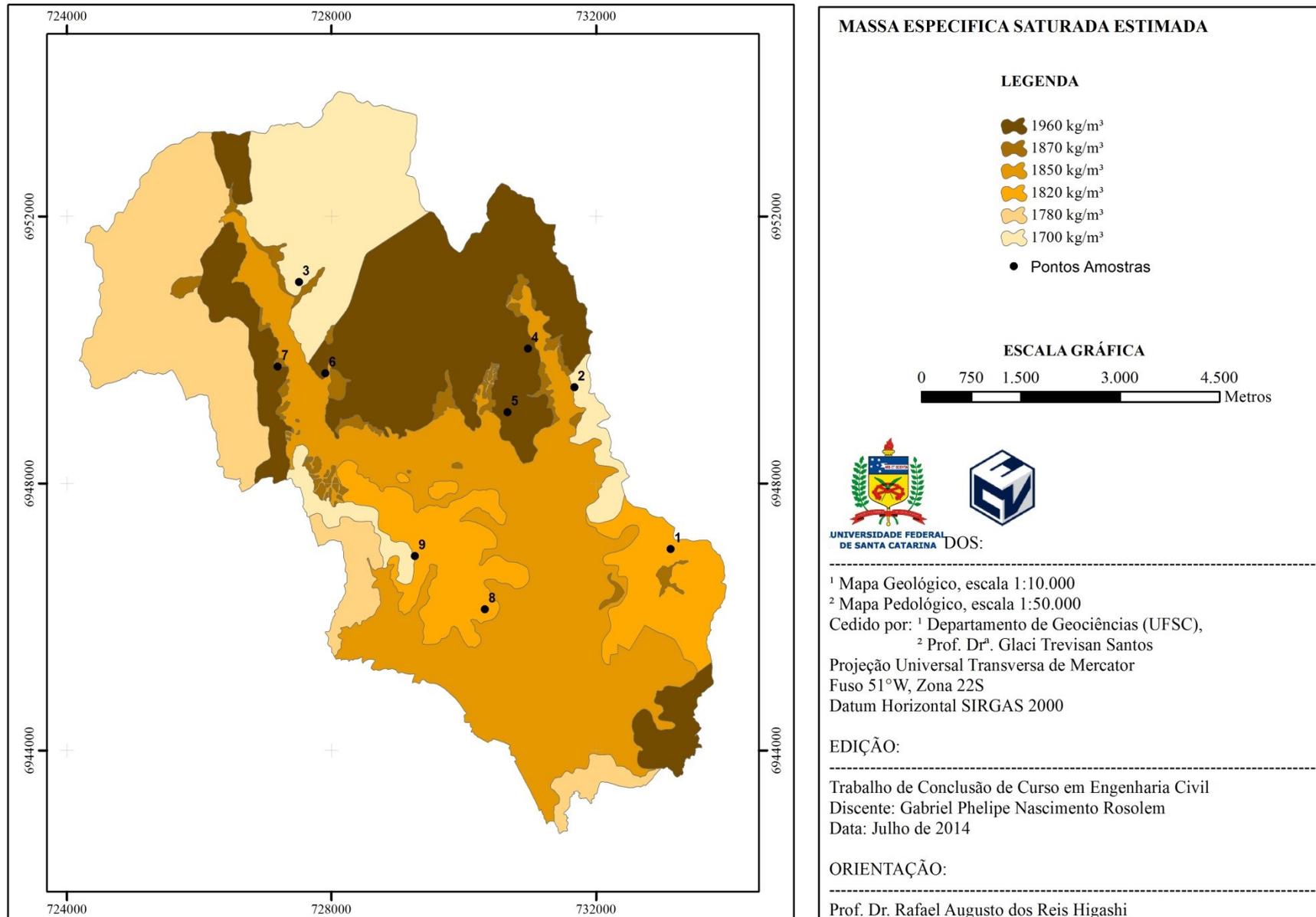
Fonte: Autor

Figura 57 – Massa específica natural estimado para os solos da bacia do Rio Forquilhas.



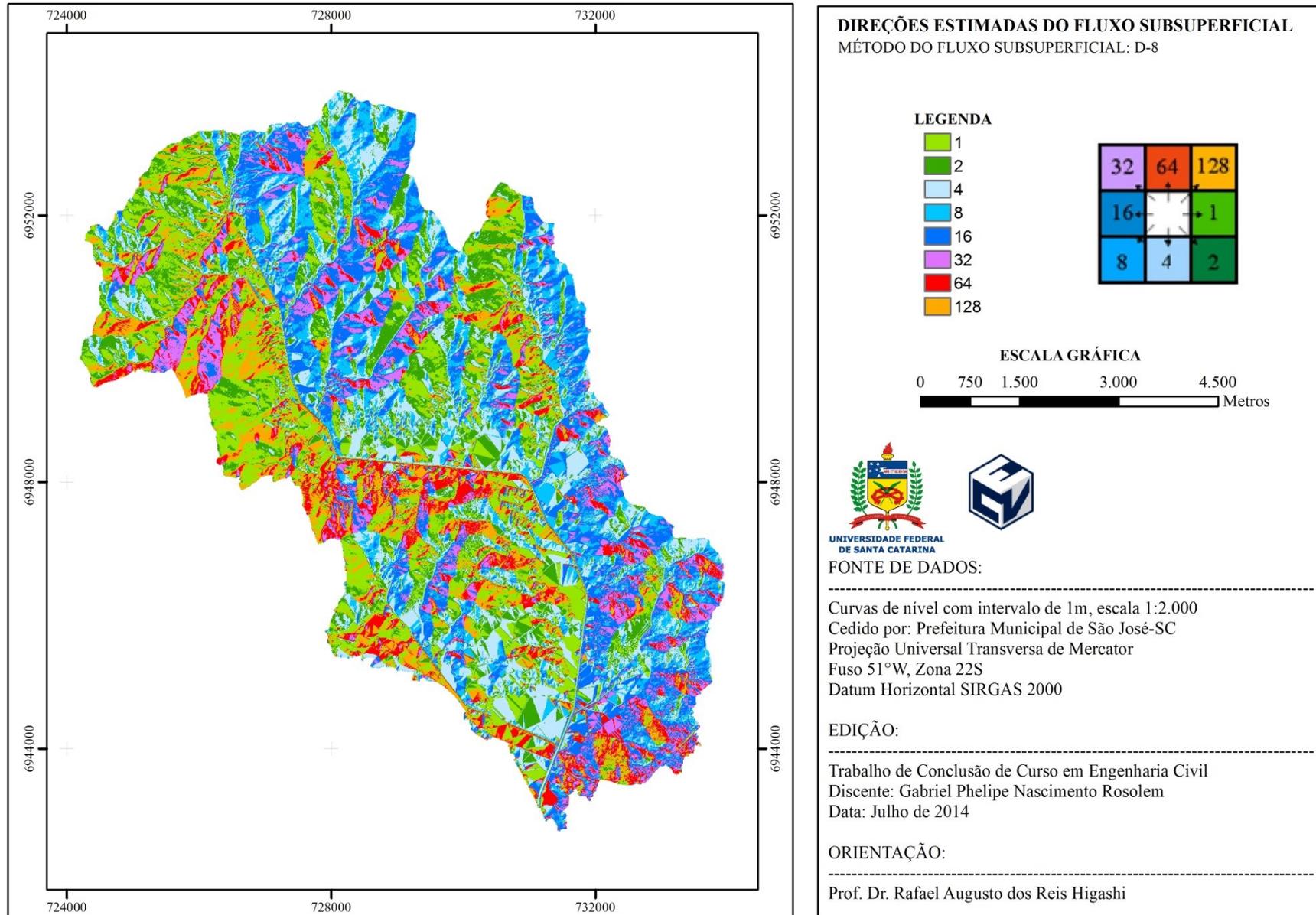
Fonte: Autor

Figura 58 - Massa específica saturado estimado para os solos da bacia do Rio Forquilhas.



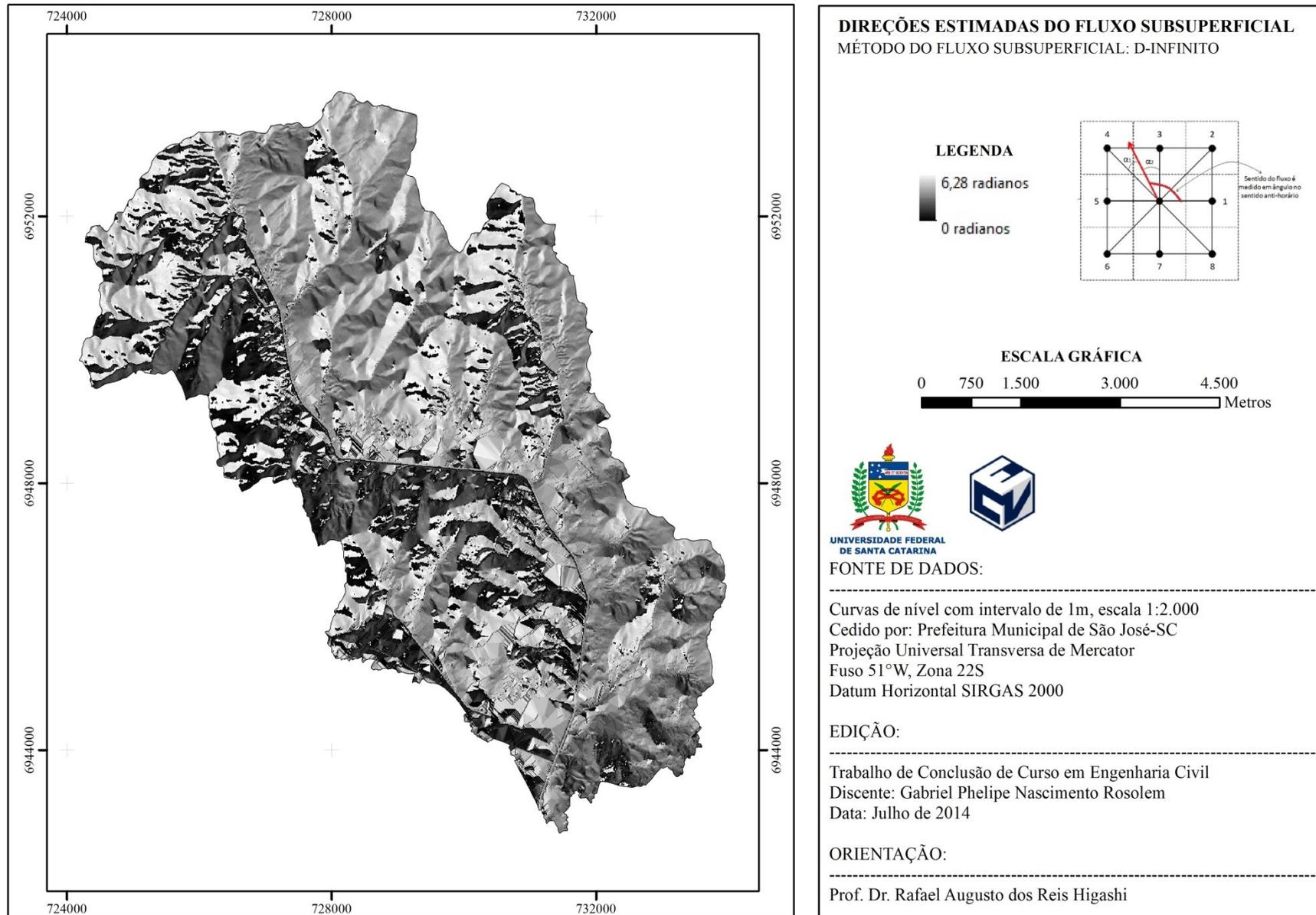
Fonte: Autor

Figura 59 - Direções do fluxo subsuperficial estimado pelo método D-8 do ArcGIS.



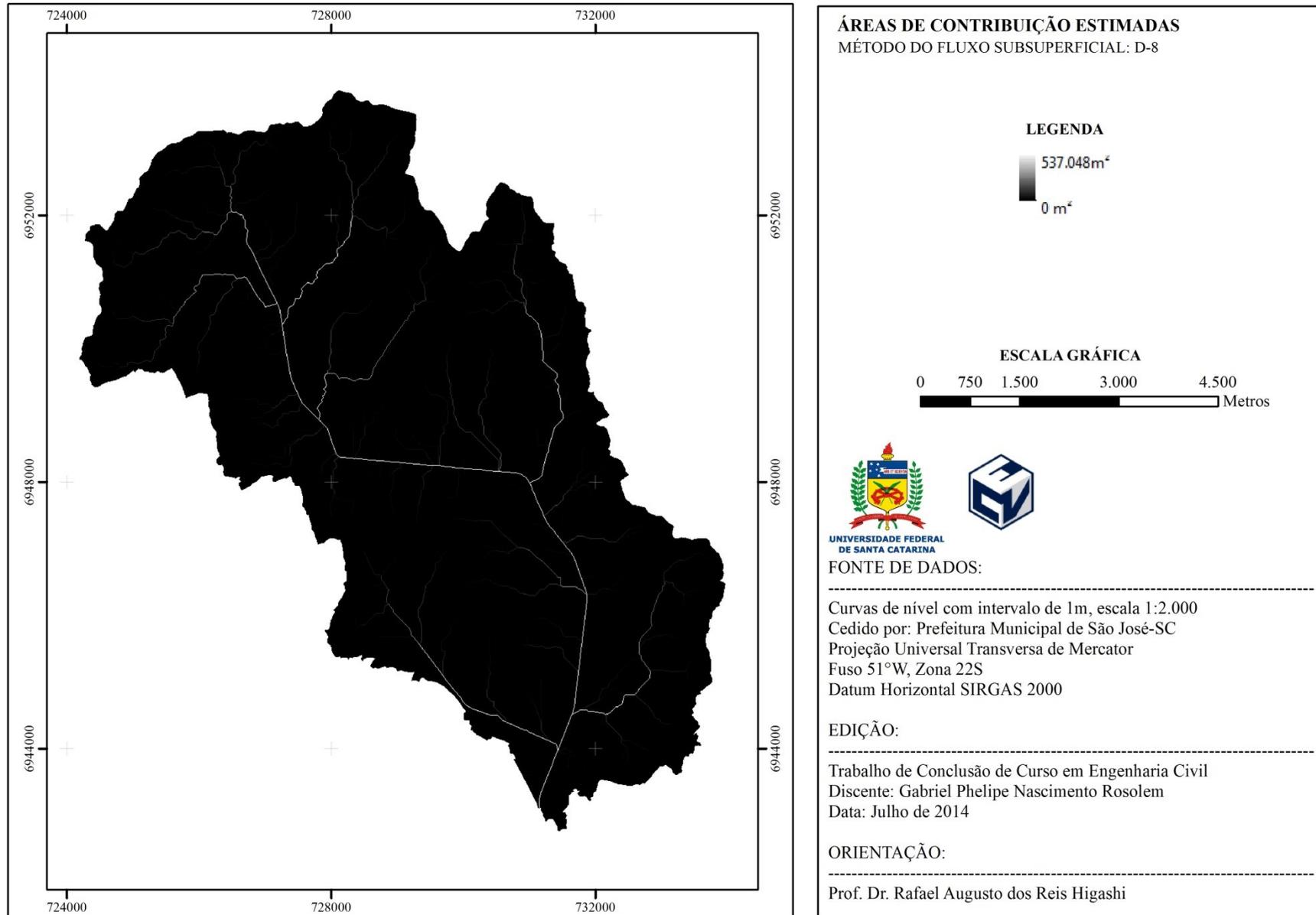
Fonte: Autor

Figura 60 - Direções do fluxo subsuperficial estimado pelo método D-Infinito do Taudem.



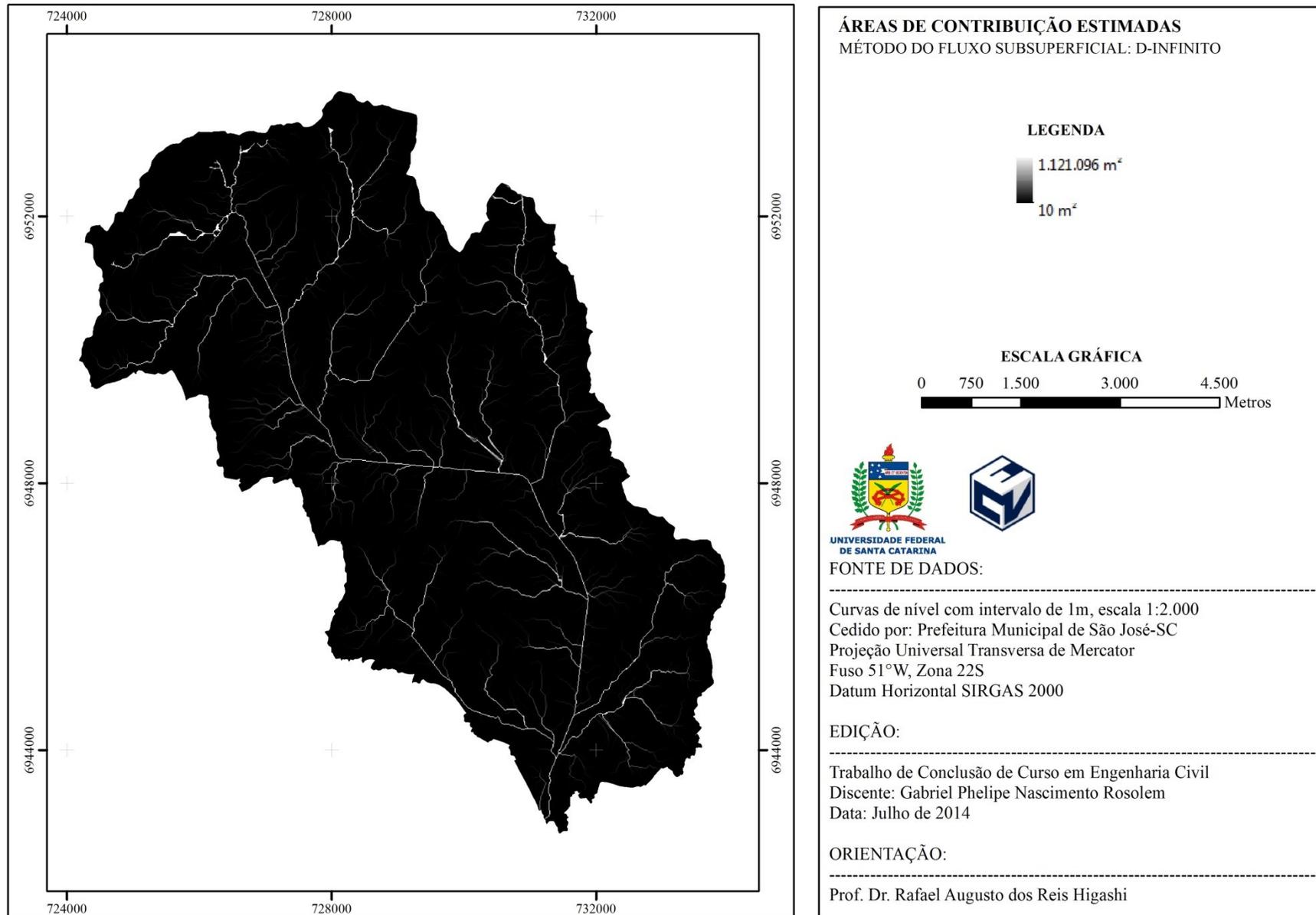
Fonte: Autor

Figura 61 - Áreas de contribuição estimadas pelo método D-8 do ArcGIS.



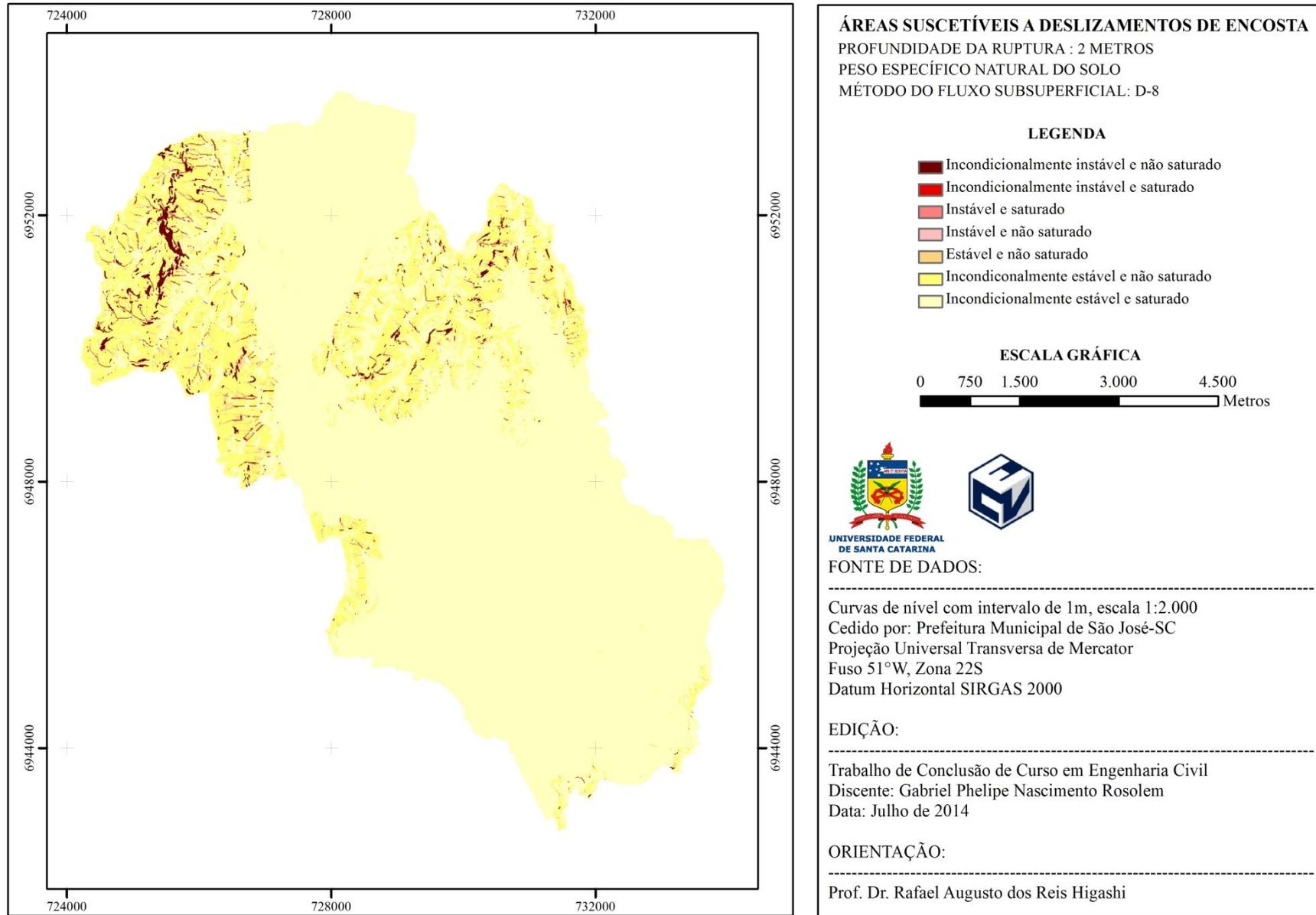
Fonte: Autor

Figura 62 - Áreas de contribuição estimadas pelo método D-Infinito do Tudem



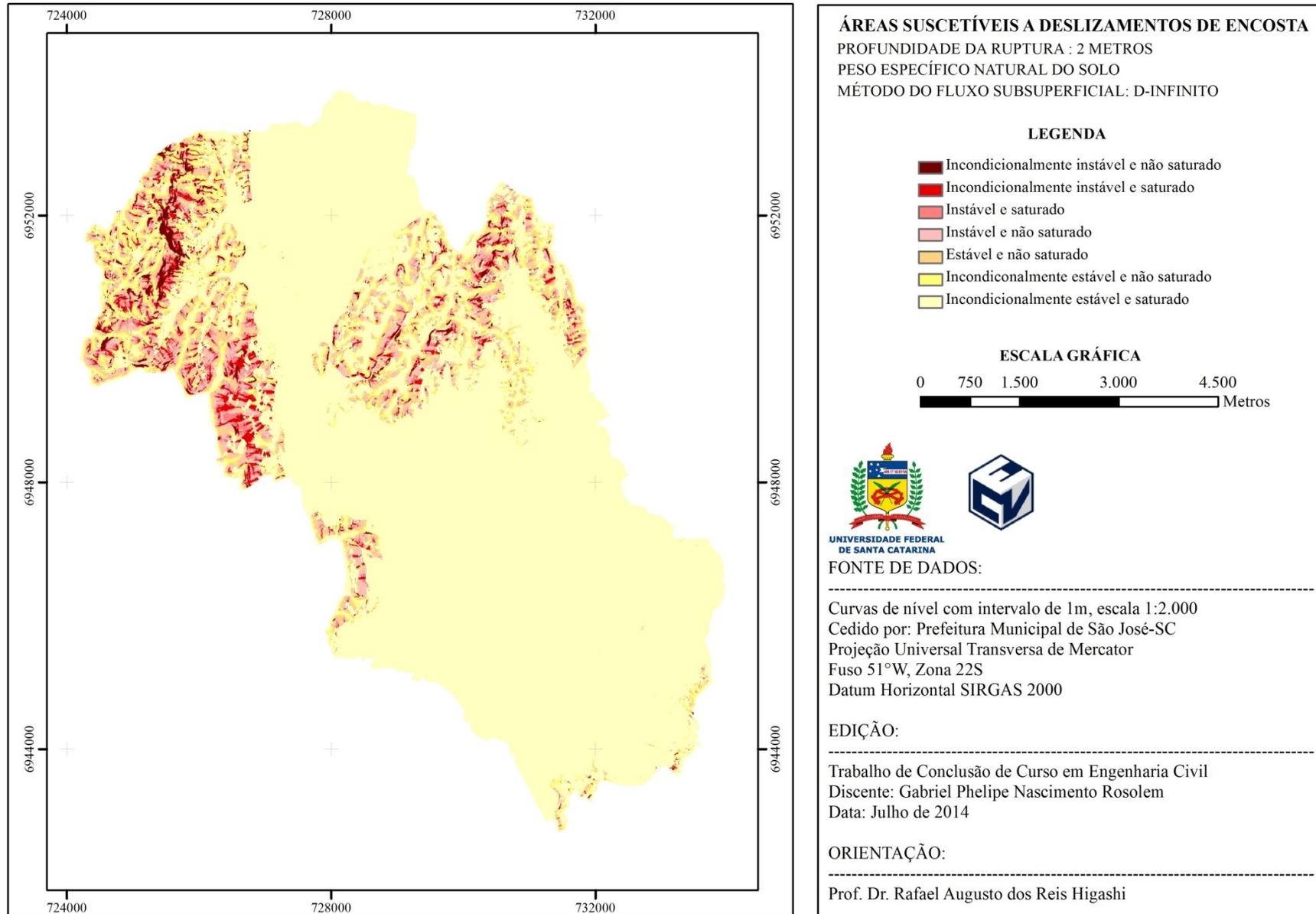
Fonte: Autor

Figura 63 - Áreas suscetíveis a deslizamentos translacionais rasos com  $\gamma$  nat., profundidade de 2 metros e fluxo subsuperficial pelo método D-8.



Fonte: Autor

Figura 64 - Áreas suscetíveis a deslizamentos translacionais rasos com  $\gamma$  nat., profundidade de 2 metros e fluxo subsuperficial pelo método D-Infinito.



Fonte: Autor

Figura 65 - Áreas suscetíveis a deslizamentos translacionais rasos com  $\gamma$  nat., profundidade de 5 metros e fluxo subsuperficial pelo método D-8.

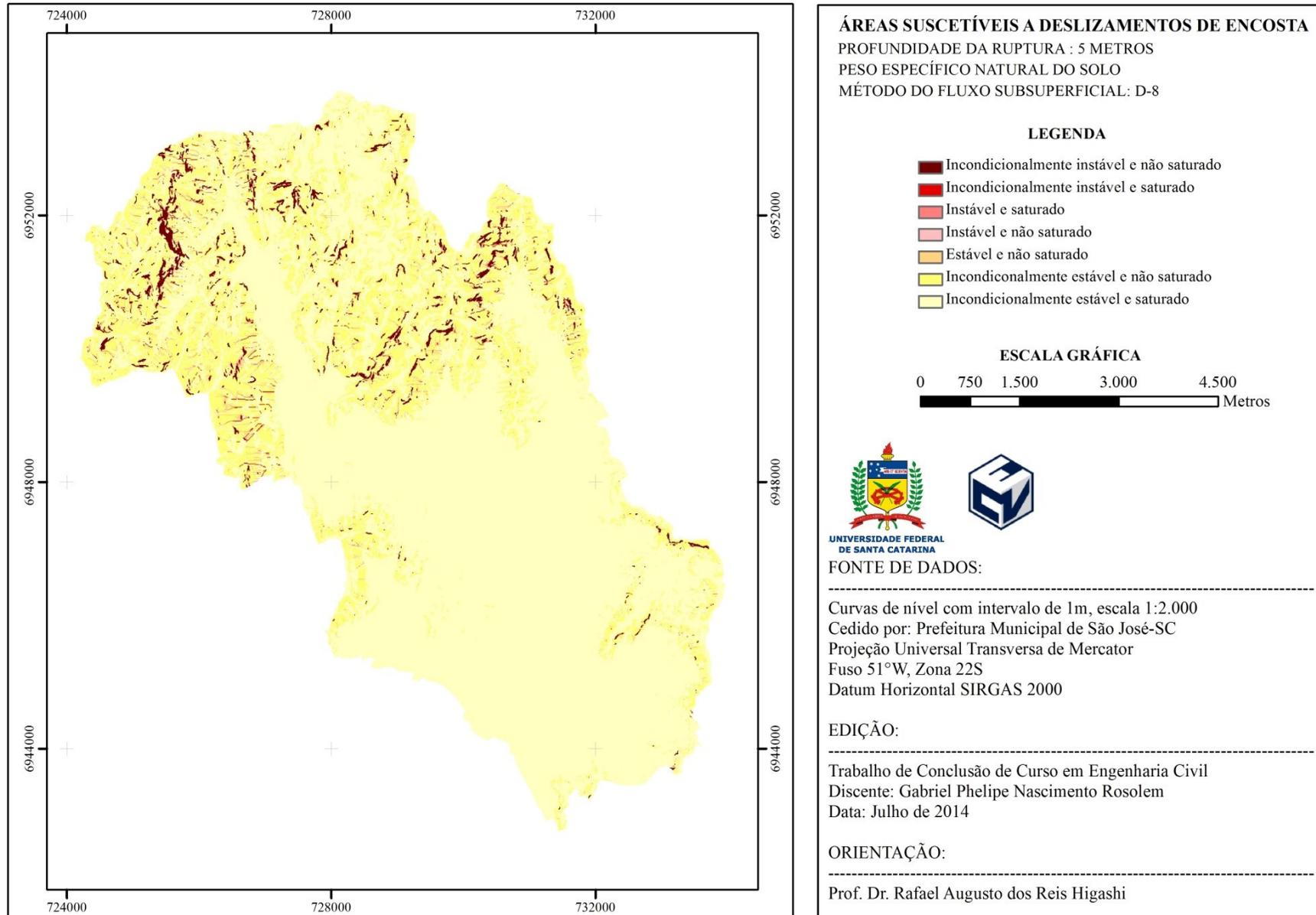
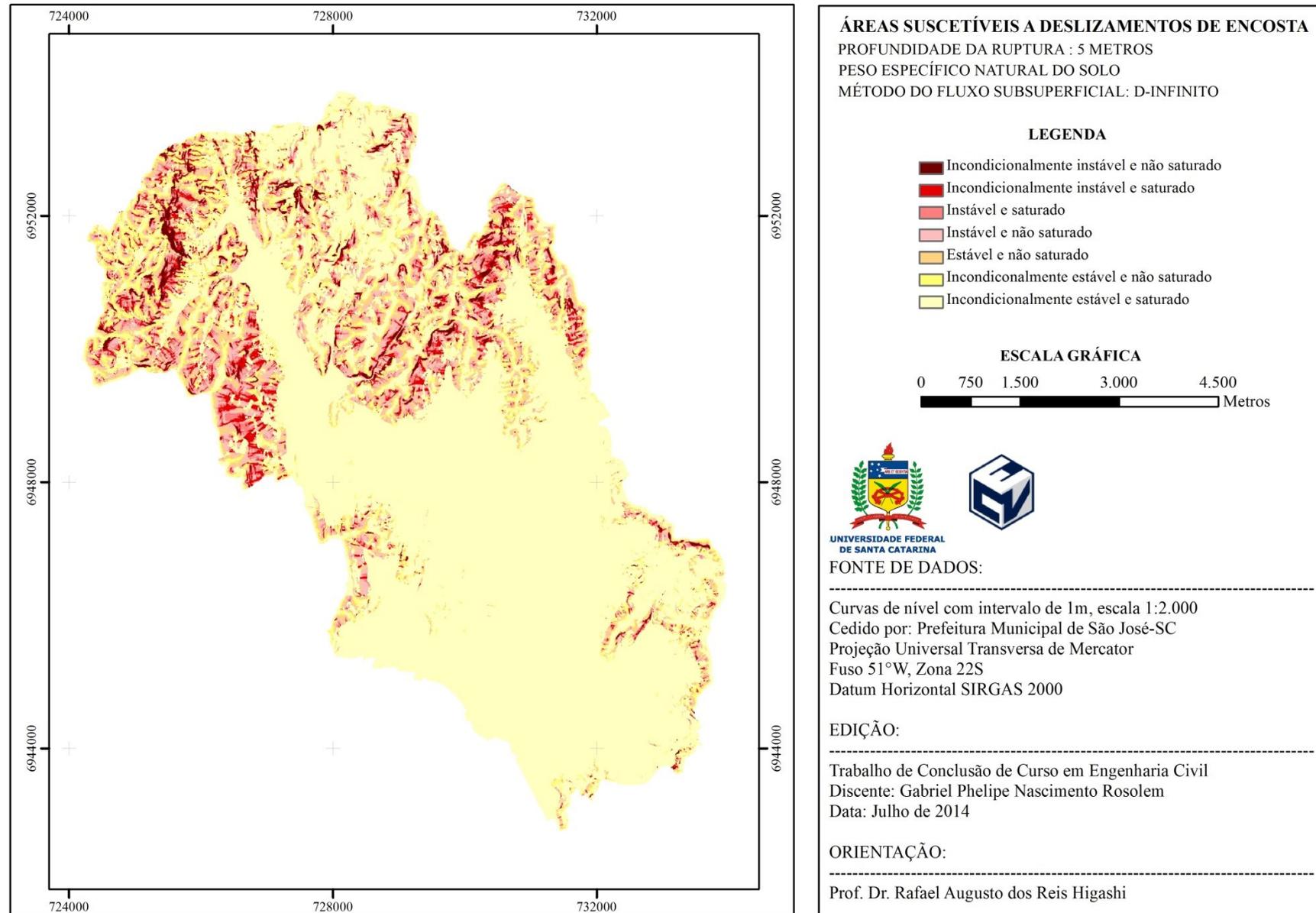
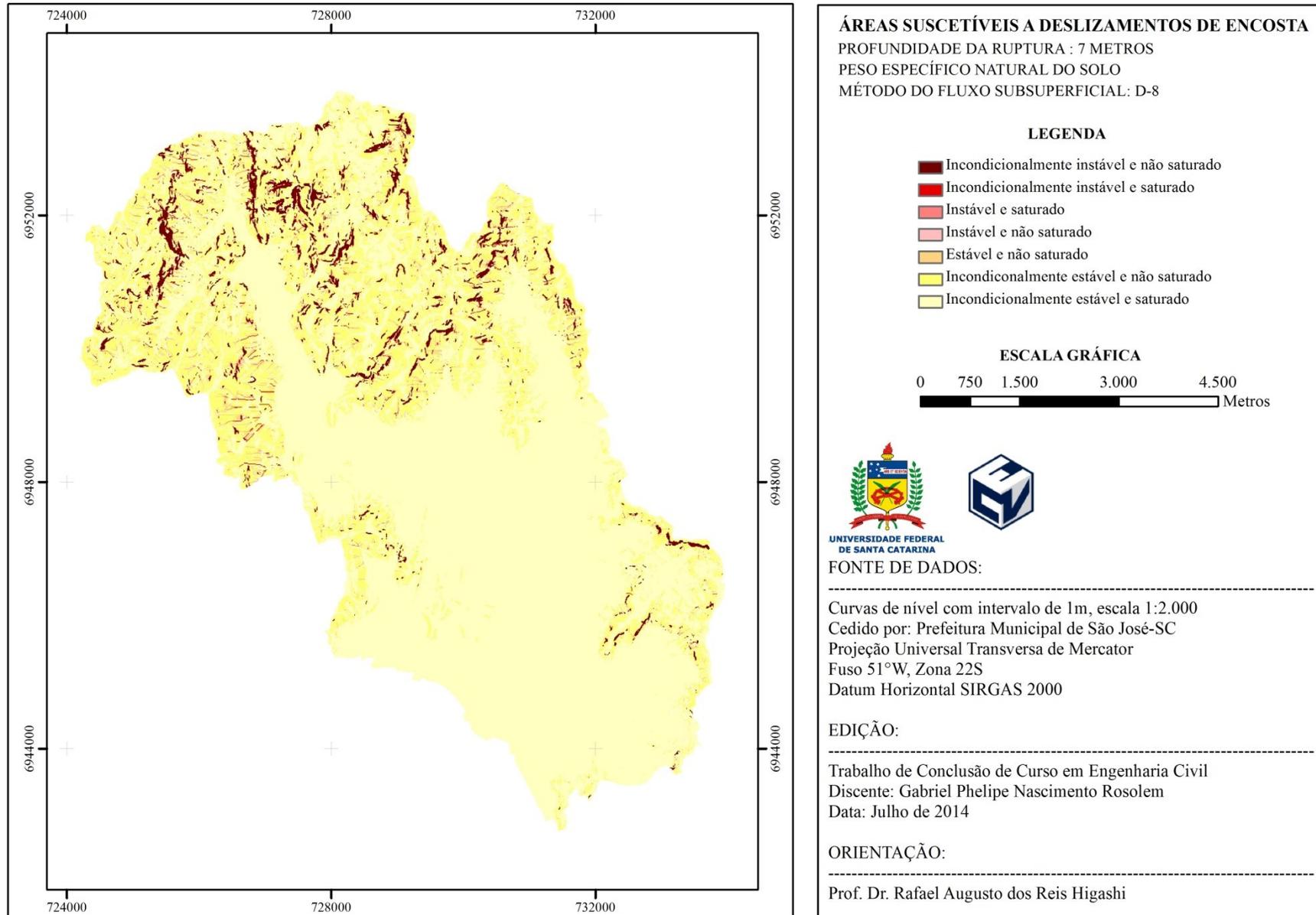


Figura 66 - Áreas suscetíveis a deslizamentos translacionais rasos com  $\gamma$  nat., profundidade de 5 metros e fluxo subsuperficial pelo método D-Infinito.



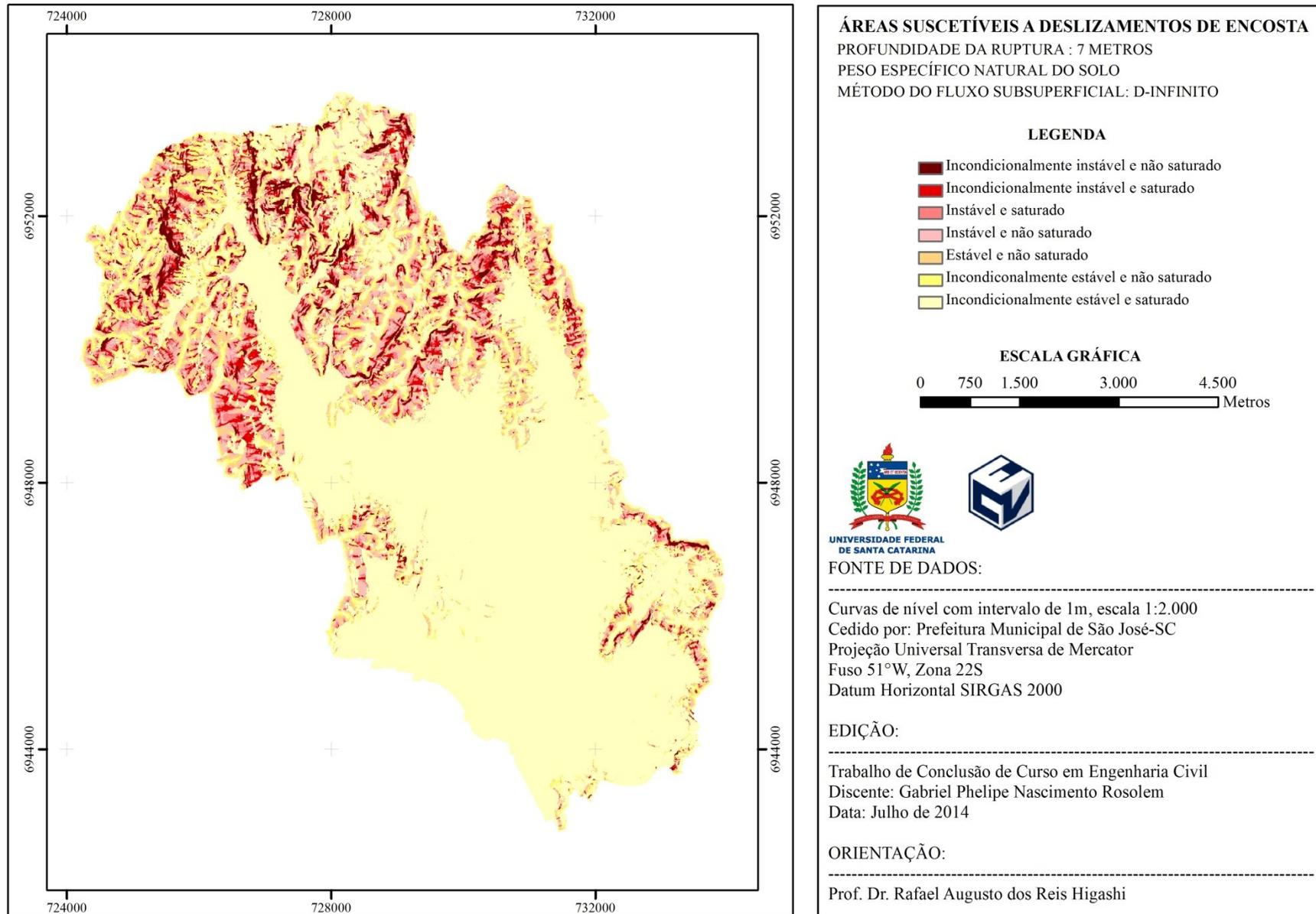
Fonte: Autor

Figura 67 - Áreas suscetíveis a deslizamentos translacionais rasos com  $\gamma$  nat., profundidade de 7 metros e fluxo subsuperficial pelo método D-8.



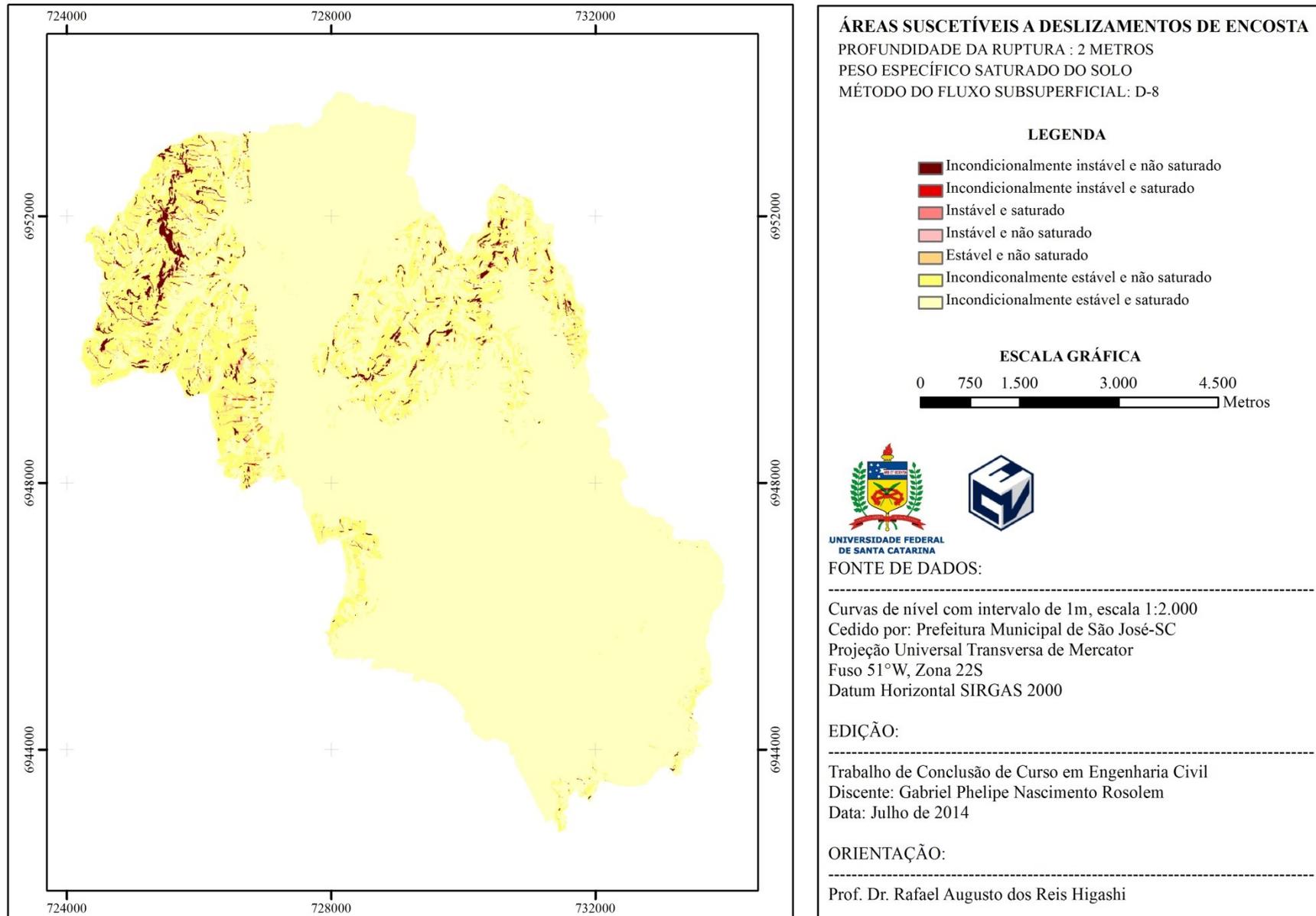
Fonte: Autor

Figura 68 - Áreas suscetíveis a deslizamentos translacionais rasos com  $\gamma$  nat., profundidade de 7 metros e fluxo subsuperficial pelo método D-Infinito.



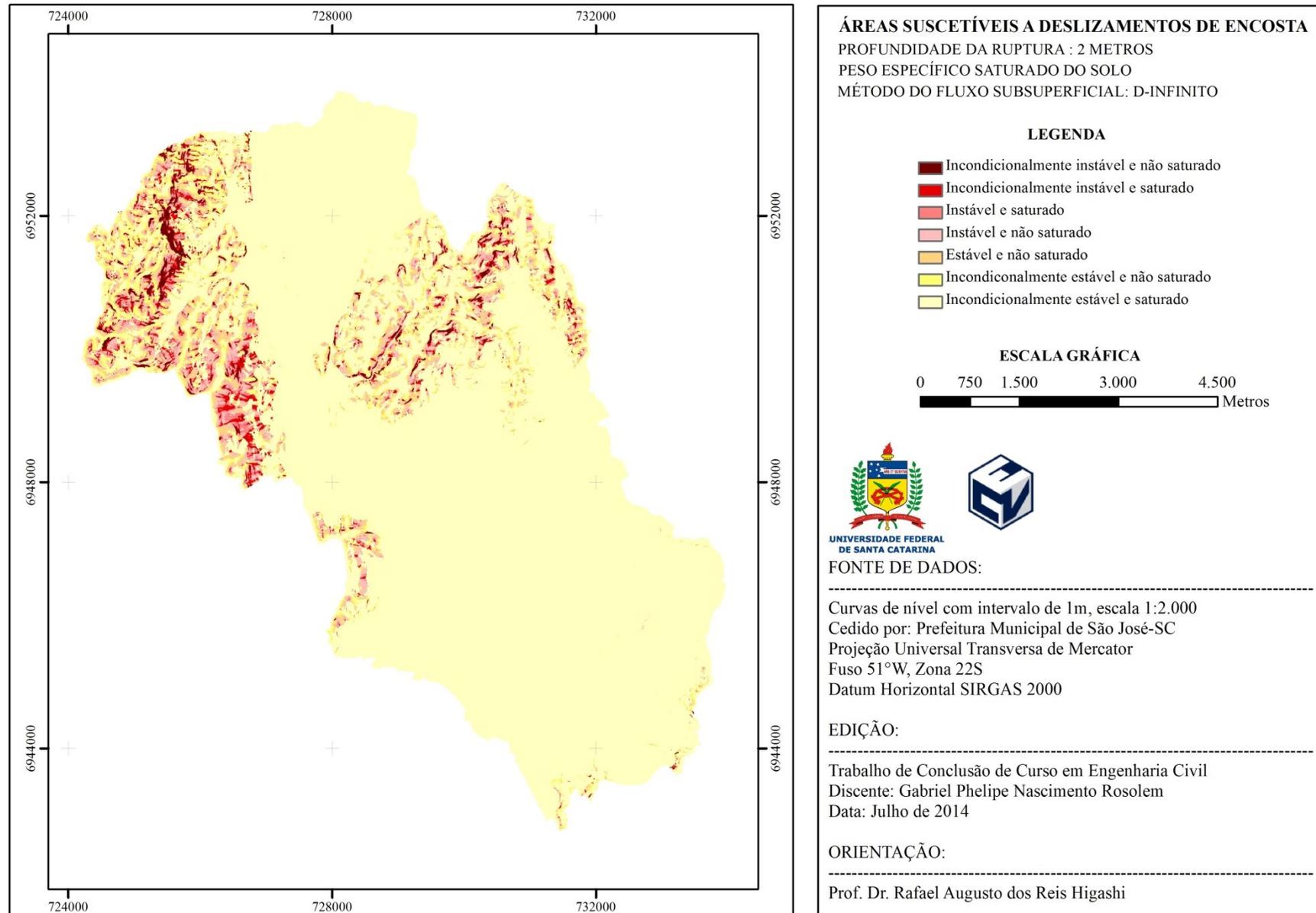
Fonte: Autor

Figura 69 - Áreas suscetíveis a deslizamentos translacionais rasos com  $\gamma$  sat., profundidade de 2 metros e fluxo subsuperficial pelo método D-8.



Fonte: Autor

Figura 70 - Áreas suscetíveis a deslizamentos translacionais rasos com  $\gamma$  sat., profundidade de 2 metros e fluxo subsuperficial pelo método D-Infinito.



Fonte: Autor

Figura 71 - Áreas suscetíveis a deslizamentos translacionais rasos com  $\gamma$  sat., profundidade de 5 metros e fluxo subsuperficial pelo método D-8.

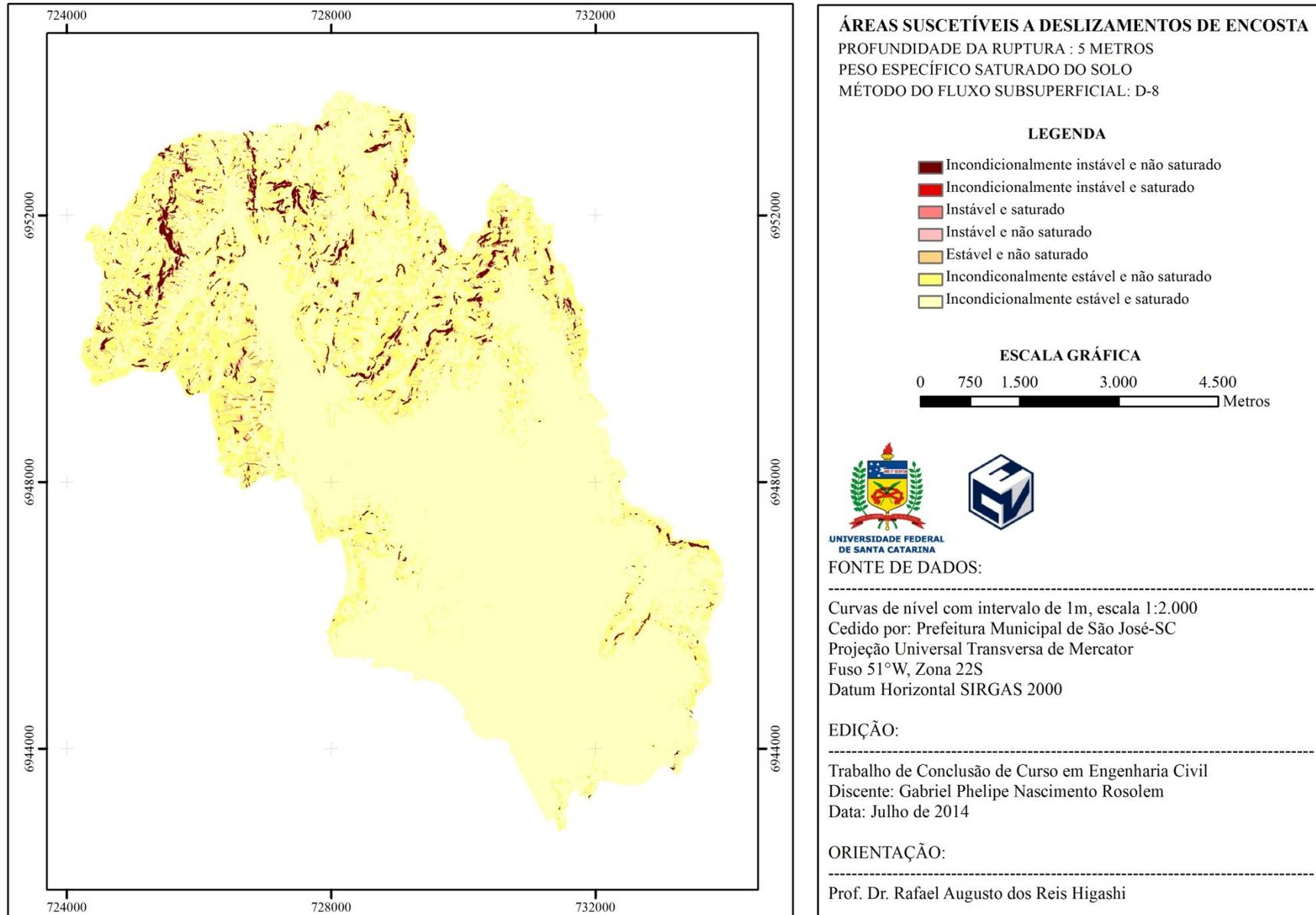
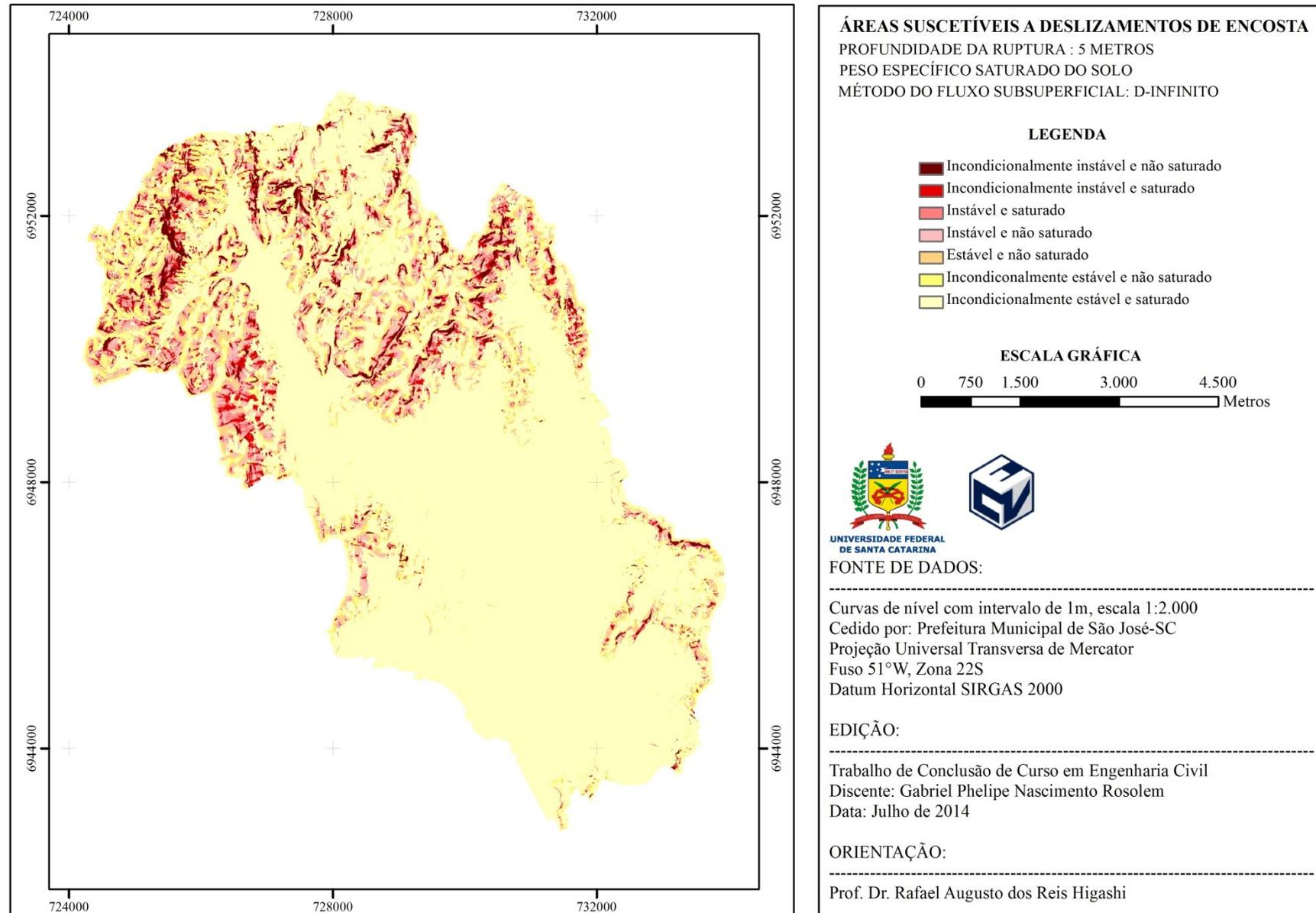
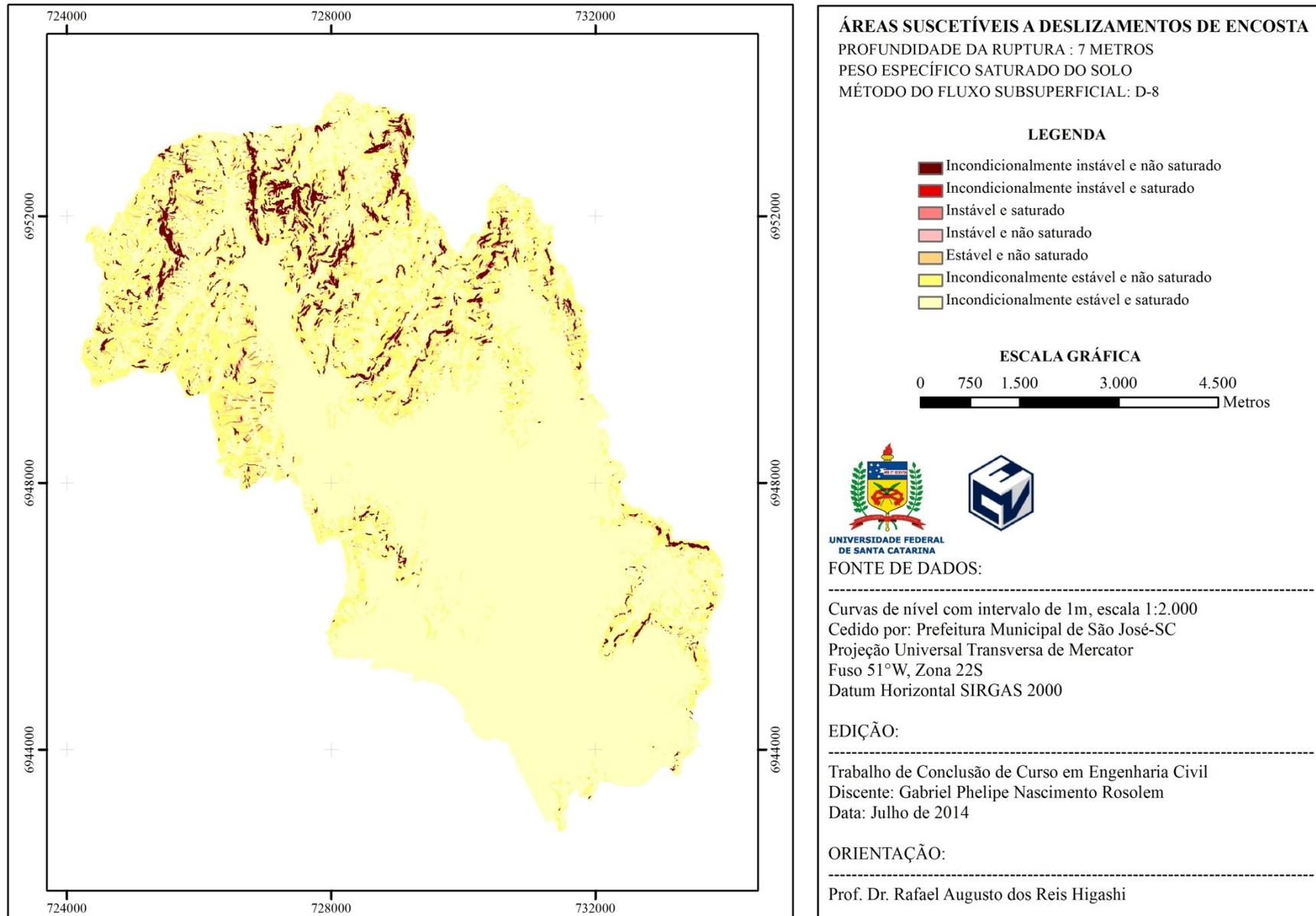


Figura 72 - Áreas suscetíveis a deslizamentos translacionais rasos com  $\gamma$  sat., profundidade de 5 metros e fluxo subsuperficial pelo método D-Infinito.



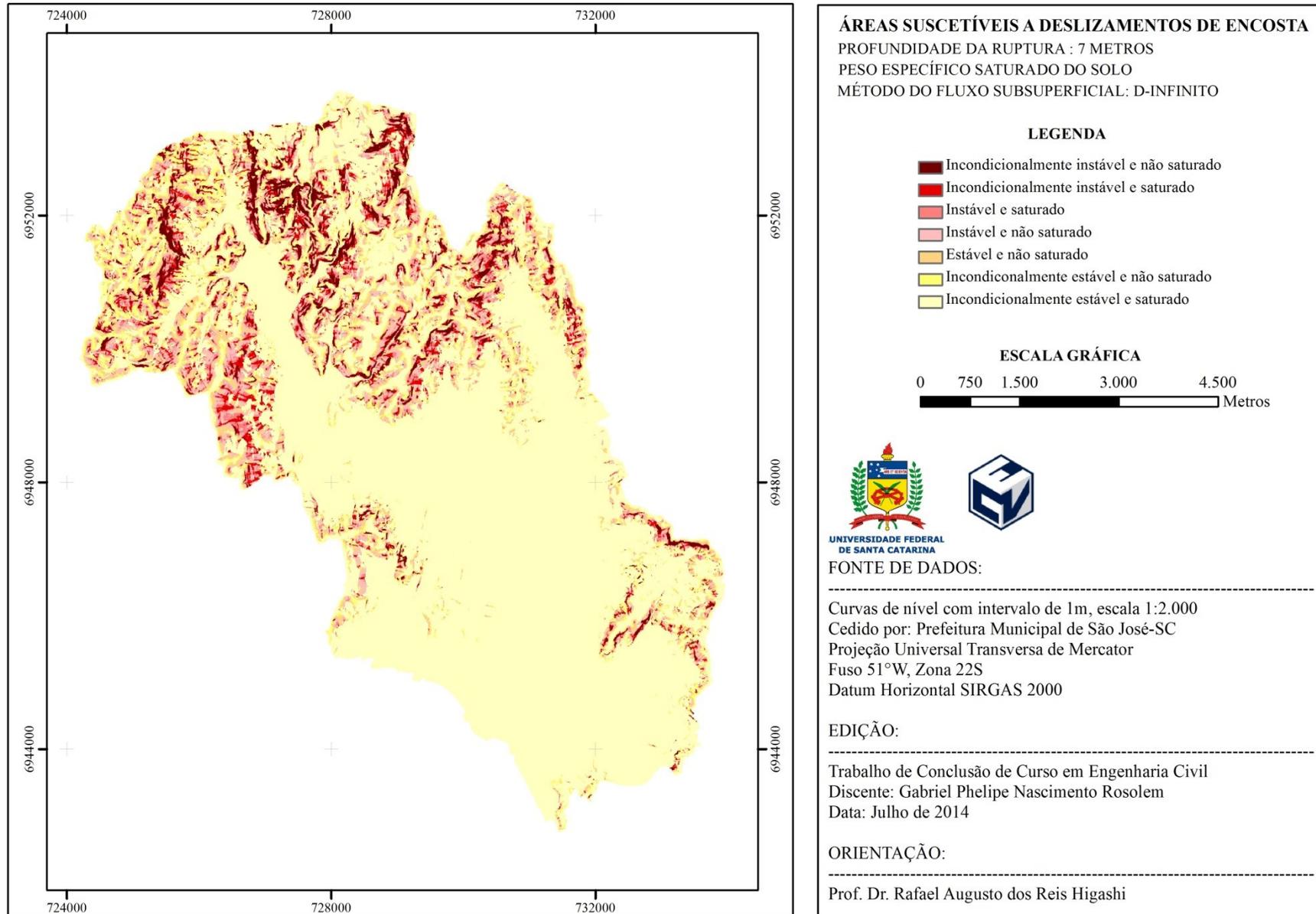
Fonte: Autor

Figura 73 - Áreas suscetíveis a deslizamentos translacionais rasos com  $\gamma$  sat., profundidade de 7 metros e fluxo subsuperficial pelo método D-8.



Fonte: Autor

Figura 74 - Áreas suscetíveis a deslizamentos translacionais rasos com  $\gamma$  sat., profundidade de 7 metros e fluxo subsuperficial pelo método D-Infinito.

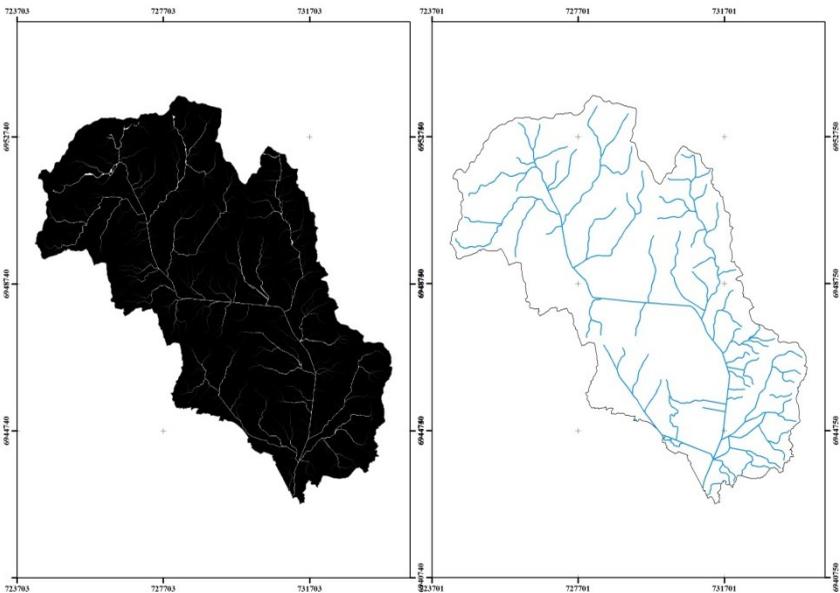


Fonte: Autor

### 5.5.1. Análise dos resultados

Ao comparar as áreas de contribuição geradas por cada método com os cursos de água da restituição aerofotogramétrica em escala 1:50.000, fornecida por EPAGRI, verificou-se que o método D-Infinito se assemelha mais a drenagem natural (Figura 75). Assim pode-se concluir que este método simula o fluxo subsuperficial melhor que o método D-8. Além do fluxo, verificou-se que tanto para o peso específico natural quanto para o peso específico saturado, independente da profundidade de ruptura, as áreas de instabilidade são maiores quando calculadas com a área de contribuição obtida pelo método D-Infinito.

Figura 75 - Comparação área de contribuição pelo método D-Infinito, a esquerda, e cursos d'água de restituição aerofotogramétrica EPAGRI em escala 1:50.000, a direita.

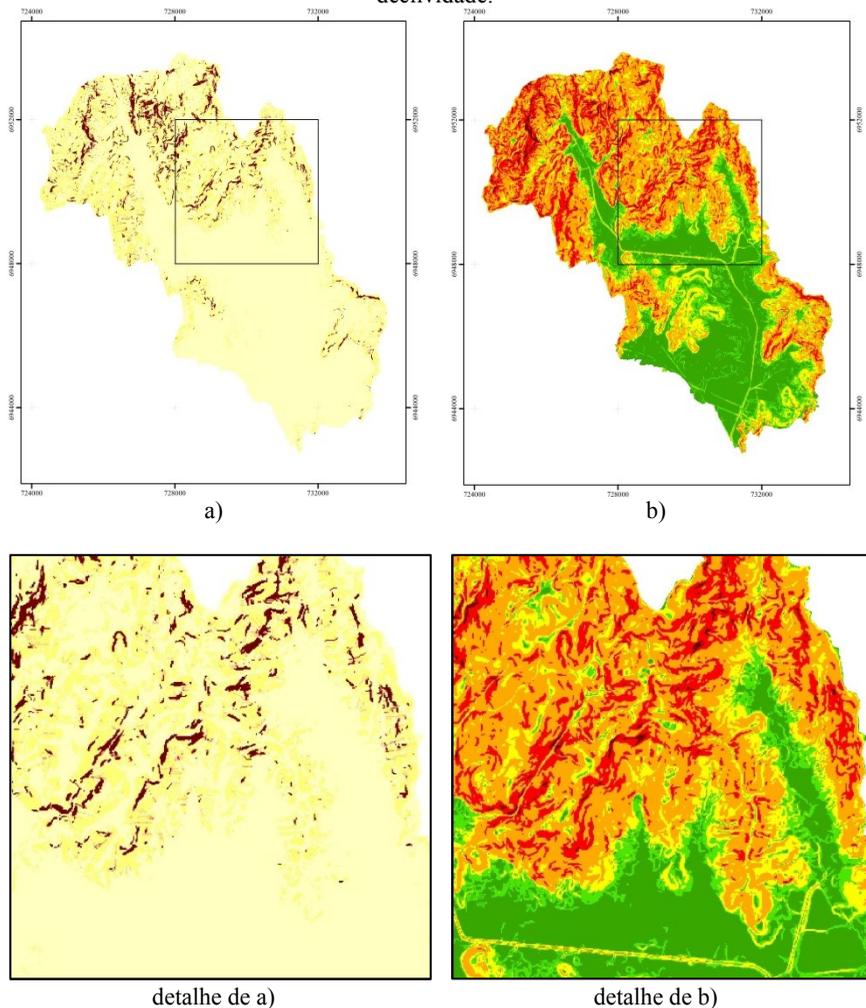


Fonte: Autor

Comparando as áreas de instabilidade com o mapa de declividades observou-se a sensibilidade do modelo SHALSTAB a topografia, devido a concentração nas áreas mais íngremes do relevo. Ao sobrepor os resultados do modelo D-8 com o mapa de declividades, se constataram que as áreas instabilidades predominam nos trechos mais íngremes da encosta, com

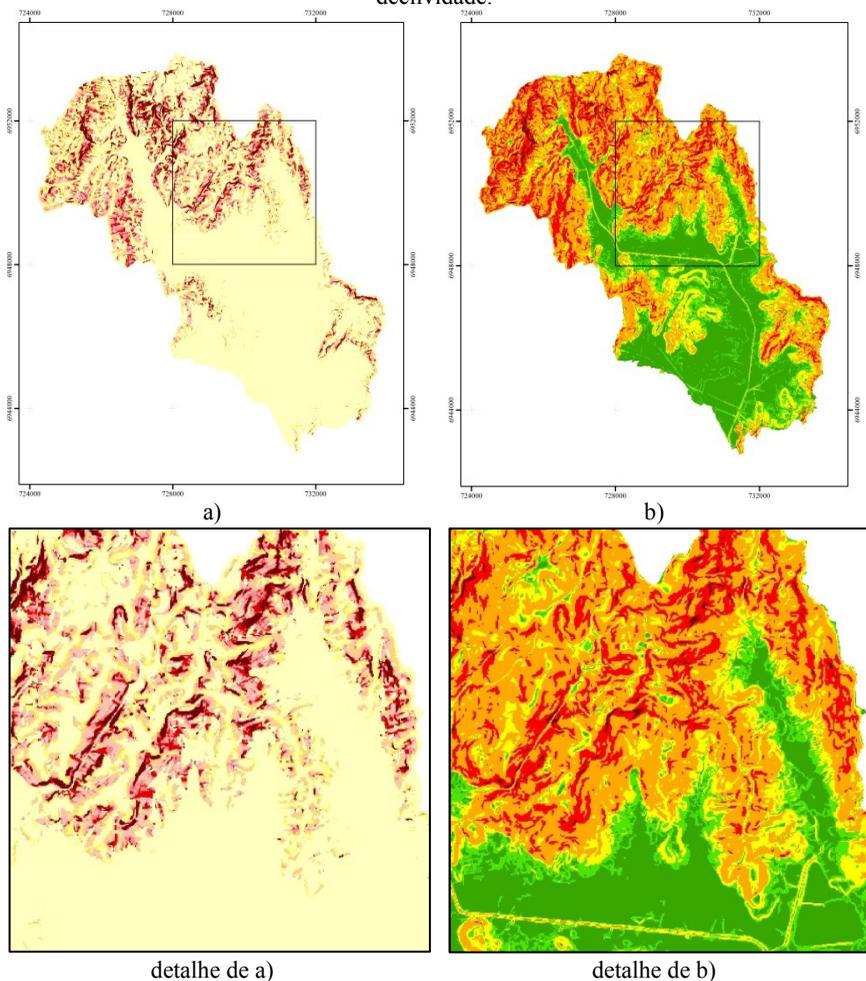
relevo variando de montanhoso a escarpado (Figura 76). Já para o método D-Infinito as áreas de instabilidade estão mais distribuídas desde o relevo ondulado ao escarpado (Figura 77).

Figura 76 - a) áreas suscetíveis a deslizamentos pelo método D-8, b) mapa de declividade.



Fonte: Autor.

Figura 77 - a) áreas suscetíveis a deslizamentos pelo método D-INFINITO, b) mapa de declividade.



Fonte: Autor

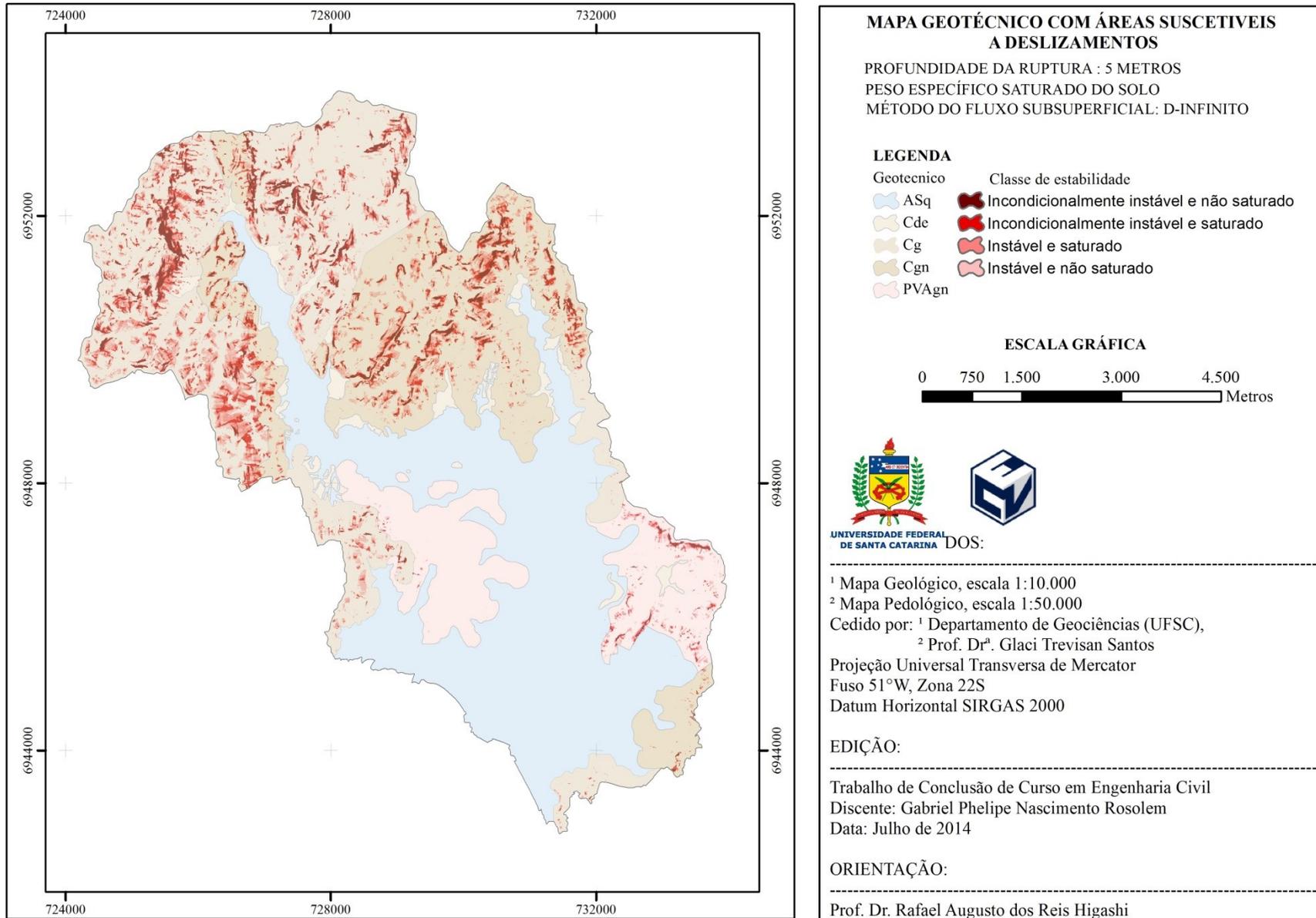
Observou-se ao comparar os resultados gerados pelo SHALSTAB utilizando o método D-Infinito e D-8, que as áreas com mais estabilidade aumentam e as instáveis se ressaltam levemente quando o cálculo considerada o peso específico saturado a o peso específico natural.

Conclui-se então que o método D-Infinito possibilita uma análise mais realística das áreas suscetíveis a deslizamentos translacionais rasos. Cabe



Sobrepondo o mapa geotécnico sobre o mapa de áreas suscetíveis a deslizamentos da Figura 80, verificou-se que as unidades geotécnicas com encostas mais instáveis são as Cgn, Cg e PVAgn, Cambissolo substrato gnaisse e migmatitos e Cambissolo substrato granito e respectivamente, Embora não apresente no mapa muita suscetibilidade, os argissolos apresentam maior erodibilidade que os cambissolos, além de permeabilidade variável ao longo do perfil de solo, desta forma a unidade PVAgn enquadra-se na restrição a ocupação alta.

Figura 80 - Áreas suscetíveis a deslizamentos sobrepostas ao mapa geotécnico.



Fonte: Autor

## 6. CONCLUSÕES

Os dados cartográficos obtidos estavam em diferentes sistemas de referência e precisaram ser transformados em SIRGAS2000 a fim de unificar e evitar erros de posicionamento. O resultado da transformação entre os sistemas SAD69 e SIRGAS2000 resultou em um vetor de deslocamento de aproximadamente 71 metros com sentido nordeste, condizentes com o apresentado por IBGE (2014b). A transformação entre WGS84 e SIRGAS2000 não foi necessária, visto que os dois sistemas são geocêntricos e praticamente iguais.

A partir da base cartográfica, aplicou-se a metodologia de Dias (1995) e gerou-se um mapa geotécnico por meio da combinação dos mapas pedológicos e geológicos - com os quais definiram os pontos de coleta de amostras de solos juntamente com o MDT. Os solos foram amostrados em 9 pontos da bacia do rio Forquilhas e realizados os ensaios de caracterização e de cisalhamento direto.

Os resultados dos ensaios de caracterização demonstram que os solos da bacia são predominantemente de textura arenosa, com plasticidade mediana e elevada suscetibilidade a erosão. Os resultados da classificação MCT indicam a predominância de solos siltosos não lateríticos (NS'), que caracterizam-se principalmente por apresentarem baixa capacidade de suporte quando imersos em água, elevada expansibilidade e baixa massa específica aparente seca. Ressalta-se que esta classificação MCT atribuída aos solos da bacia é resultado apenas do método das pastilhas e que se deve executar a metodologia completa para resultados mais confiáveis.

Já os resultados dos ensaios de cisalhamento direto indicam que os valores de coesão são médios e o ângulo de atrito interno baixos, se comparados com os resultados obtidos por Higashi (2006) e demais autores contidos no Quadro 17. Ao comparar os resultados do ângulo de atrito interno com a granulometria, concluiu-se que estes estavam coerentes, pois os maiores valores obtidos estavam relacionados aos pontos com maior porcentagem de fração de areia grossa e pedregulho fino.

Após as saídas de campo e realização dos ensaios, ajustou-se o mapa geotécnico preliminar e incluíram-se os parâmetros geotécnicos ensaiados nas unidades delimitadas. O ajuste resultou em cinco unidades geotécnicas, sendo as maiores delas a Depósito Aluvionares substrato depósitos quartenários (ASq) com 31,6% da área da bacia e Cambissolo substrato granito (Cg) com 30,8%.

Com os parâmetros geotécnicos georreferenciados e em dados raster, procedeu-se para correção dos MDT's a fim de retirar os picos e preencher os sumidouros. As correções foram utilizadas para os cálculos de direções de fluxos e área de contribuição tanto para método D-8 quanto para o método D-Infinito. Estas áreas quando comparadas com os cursos d'água naturais, permitiram concluir que o método D-Infinito simula melhor o fluxo subsuperficial.

Ao analisar as áreas suscetíveis a deslizamentos rasos, verificou-se que ao utilizar a área de contribuição elaborada pelo método D-8 independentemente da profundidade de ruptura e o peso específico utilizado, as áreas instáveis eram menores comparadas às obtidas considerando a área de contribuição do D-Infinito.

Sobrepondo os resultados do SHALSTAB com o mapa de declividades foi possível verificar a sensibilidade do modelo aos parâmetros topográficos. Além disto, constatou-se que as áreas de instabilidade resultantes do método D-8 eram restritas aos trechos mais íngremes da encosta, entre o relevo montanhoso a escarpado, enquanto as obtidas com o método D-Infinito estavam no intervalo do fortemente ondulado ao escarpado. Por fim, conclui-se que o método D-Infinito permitia alcançar resultados mais realistas das áreas suscetíveis a deslizamentos rasos.

Considerando o mapa de suscetibilidade com solo saturado e profundidade de ruptura a 5m, classificou-se que as unidade Cg, Cgn e PVAgn com restrição a ocupação alta. Portanto, conclui-se que o mapa geotécnico e o mapa de suscetibilidade são de grande aplicabilidade a gestão uso e ocupação do solo.

## 6.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS POSTERIORES

Tendo em vista a realização de trabalhos na mesma área ou trabalhos similares em outras bacias, sugere-se:

- i. Pesquisar outro software compatível com o ArcGIS que utilize o método D-Infinito. O *software* Taudem, embora tenha uma ótima aplicabilidade, possui a limitação de não ter suporte para dúvidas e erros que venham a ocorrer. A grande dificuldade está em conseguir inserir o MDT em formato *.tif* e que seja aceito pelo *software*;

- ii. Analisar a bacia primeiramente do geral ao particular a fim de evitar retrabalhos e entender as dinâmicas ambientais no seu interior;
- iii. Solicitar dados pessoalmente junto aos órgãos e instituições;
- iv. Utilizar fotointerpretação e técnicas de geoprocessamento para facilitar a validação e ajustes dos mapas pedológicos e geotécnicos;
- v. Fotointerpretar as áreas suscetíveis a deslizamentos e aferir em campo;
- vi. Realizar um inventário de cicatrizes de deslizamentos passados;
- vii. Obter série histórica de fotos aéreas da área de estudo para classificar o uso do solo e expansão da mancha urbana.

## REFERÊNCIAS

- AUSTRALIAN GEOMECHANICS. **Australian GeoGuides for slope management and maintenance**. Australian Geomechanics Society, Australian Geomechanics, Vol 42, No 1, March 2007e
- AUSTRALIAN GEOMECHANICS. **Commentary on guideline for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning**. Australian Geomechanics Society, Vol 42, No 1, March 2007b .
- BASSO, S. **Compatibilização da rede geodésica da REFAP para o sistema geodésico de referência SIRGAS20000 e geração de carta-imagem**. Monografia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.
- BEVEN, K. J.; KIRKBY, M. J. **A physically based, variable contributing area model of basin hydrology**/Un modèle à base physique de zone d'appel variable de l'hydrologie du bassin versant. Hydrological Sciences Journal, v. 24, n. 1, p. 43-69, 1979.
- BORTOLOTI, F. D. **ArcGIS Aplicado a Bacias Hidrográficas. Laboratório de Topografia e Cartografia – LTC**. Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória. 97 slides. Disponível em: <[www.ltc.ufes.br/gisbasins/Aula\\_06.pdf](http://www.ltc.ufes.br/gisbasins/Aula_06.pdf)>. Acesso em: 03 de dezembro de 2013. Apresentação em PowerPoint.
- BRASIL. Ministério das Cidades. **Capacitação em Mapeamento e Gerenciamento de Risco**. Brasília, DF, 2006. 122p
- CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A. M. **Introdução à ciência da geoinformação**. São José dos Campos: DPI/Inpe, 2001.
- CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. 6 ed. Rio de Janeiro: LTC, 1988. 234p.

CARDOZO, F. S. **Análise das áreas suscetíveis a inundações e escorregamentos na bacia do rio Forquilhas, São José/SC.** 226f. Dissertação (Mestrado em Geografia). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

CARVALHO, P. R. S. **Análise comparativa de métodos para a delimitação automática das sub-bacias do alto curso do rio Preto.** Dissertação de mestrado. Pós Graduação em Gestão Ambiental e Territorial. Universidade de Brasília, Brasília, 2007.

COSTA JUNIOR, H. **Mapa de estimativa de unidades geotécnicas de São José dos Pinhais - PR.** Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001. 100 f

DALAZOANA, R. **Implicações na cartografia com a evolução do sistema geodésico brasileiro e futura adoção do SIRGAS.** Dissertação de mestrado. Pós-graduação em Ciências Geodésicas, Curitiba, 2001.

DAS, B. M.. **Fundamentos de engenharia geotécnica.** São Paulo: Cengage Learning, 2011. 557p.

DIAS, R. D. **Proposta de metodologia de definição de carta geotécnica básica em regiões tropicais e subtropicais.** Revista do Instituto Geológico, v. 16, n. esp, p. 51-55, São Paulo,1995.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos.** 2ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA-SOLOS, 2006.

EPAGRI. **As chuvas de novembro de 2008 em Santa Catarina: um estudo de caso visando à melhoria do monitoramento e da previsão de eventos extremos.** Disponível em: <[http://www.ciram.com.br/ciram\\_arquivos/arquivos/gtc/downloads/NotaTecnica\\_SC.pdf](http://www.ciram.com.br/ciram_arquivos/arquivos/gtc/downloads/NotaTecnica_SC.pdf)>. Acesso em: 30 de junho de 2014.

FERNANDES et al. **Condicionantes geomorfológicos dos deslizamentos nas encostas: avaliação de metodologias e aplicação de modelo de previsão de áreas suscetíveis.** Revista Brasileira de Geomorfologia, v. 2, n. 1, 2010.

FERNANDES, G. **Caracterização geológico - geotécnica e propostas de estabilização da encosta do morro do curral – centro de artes e convenções de ouro preto.** Dissertação de mestrado. Pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2000. 154f.

FERNANDES, V. D. O. **Implicações da adoção do referencial geodésico SIRGAS 2000 na cartografia em escala grande.** Tese de Doutorado. Pós Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

FONTES, L. P. T. L.. **Contribuição à investigação geotécnica de vias urbanas não pavimentadas através do emprego do penetrômetro dinâmico de cone.** Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2001. 184f.

FRANCO et al. **Cartografia geotécnica: estágio atual do conhecimento.** GEOTECHNICAL CARTOGRAPHY: ACTUAL STATE KNOWLEDGE. Caminhos de Geografia (Online), v. 11, n. 35, 2010.

GERSCOVICH, D. M. S. **Apostila: Estabilidade de Taludes.** Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2009.

GT-CADASTRO. **Leitura da cidade de São José, SC (Tendências e Potenciais).** Florianópolis, 2004, 337 p, mapas (92) - Projeto de Revisão do Plano Diretor de São José-SC.

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.

HAMADA, E. H.; GONÇALVES, R. R. V. **Introdução ao Geoprocessamento: princípios básicos e aplicação.** Embrapa Meio Ambiente, 2007.

HIGASHI, R. A. R. **Utilização de um SIG no desenvolvimento de um banco de dados geotécnicos do norte do estado do Rio Grande do Sul.** Dissertação de Mestrado. Pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002. 155f.

HIGASHI, R. A. R. **Metodologia de Uso e Ocupação dos Solos de Cidades Costeiras Brasileiras Através de SIG com Base no Comportamento Geotécnico e Ambiental.** Tese de Doutorado. Pós-Graduação em Engenharia Civil. Área de Concentração: Infra-Estrutura e Gerência Viária. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006, 486 p.

HIGASHI, R.R.; DIAS, R. D. ; MACCARINI, M. **On the Erosive Potential of Some Weathered Soils from Southern Brazil.** Soils and Rocks, São Paulo, 34 (3). P. 219-225, 2012.

IBGE. **Manual Técnico de Pedologia.** 2ed. Rio de Janeiro, 2007.

IBGE. **O Brasil município por município.** Disponível em: <<http://www.cidades.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 24 de maio de 2014a.

IBGE. **Proposta preliminar para a adoção de um referencial geocêntrico no brasil.** Rio de Janeiro, 2000.

IBGE. **Resolução 1/2005 Altera a caracterização do Sistema Geodésico Brasileiro.** Disponível em: <[ftp://geoftp.ibge.gov.br/documentos/geodesia/projeto\\_mudanca\\_referencia\\_1\\_geodesico/legislacao/rpr\\_01\\_25fev2005.pdf](ftp://geoftp.ibge.gov.br/documentos/geodesia/projeto_mudanca_referencia_1_geodesico/legislacao/rpr_01_25fev2005.pdf)>. Acesso em: 10 de Junho de 2012.

IBGE. **Sistema de Referência.** Disponível em: <[ftp://geoftp.ibge.gov.br/documentos/geodesia/sisref\\_2.pdf](ftp://geoftp.ibge.gov.br/documentos/geodesia/sisref_2.pdf)> Acesso em: 05 de junho de 2014b.

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

LIMA JR, C. O. **Geração de bases de dados digitais espaciais a partir dos mapas geológicos, pedológico e geotécnico do município de Florianópolis, SC**. Dissertação de Mestrado. Pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

LISTO, F. L. R.. **Análise da suscetibilidade e do grau de risco a escorregamentos rasos na bacia do Alto Aricanduva, RMSP (SP)**. Dissertação de mestrado. Pós Graduação em Geografia Física. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.162f.

MAFRA JR, C. S. **Elaboração do mapa preliminar de unidades geotécnicas do município de Brusque associado a um banco de dados geotécnico em ambiente de SIG**. Dissertação de Mestrado. Pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina, 2007. 136f.

MASSAD, F. **Obras de terra: curso básico de geotecnia**. 2ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

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

MICHEL, G. P. **Modelagem de estabilidade de encostas com consideração do efeito da vegetação**. Dissertação de mestrado. Pós Graduação em Engenharia Ambiental. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013. 152f.

MICHEL, G. P.; KOBIYAMA, M. ; GOERL, R. F. **Comparative analysis of SHALSTAB and SINMAP for landslide susceptibility mapping in the Cunha River basin, southern Brazil**. *Journal of Soils and Sediments*, v. 14, n. 7, p. 1266-1277, 2014.

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

MOURA, E.; SANT'ANA, W. C.; BERNUCCI, L. B. **Coefficiente, M-MCV simplificado cálculo: uma abordagem didática.** 37ª Reunião Anual de Pavimentação – RAPv. 11º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária – ENACOR. Goiânia, 2006

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. **Estado atual da metodologia MCT de estudo geotécnico de solos.** In: Simpósio Sobre Novos Conceitos em Ensaios de Campo e Laboratório em Geotecnia. Rio de Janeiro, 1988.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. **Identificação expedita dos grupos da classificação MCT para solos tropicais.** In: X Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações. ABMS. Foz do Iguaçu, 1994. p. 1293-1300.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. **Use of lateritic fine-grained soils in road pavement base courses.** Geotechnical & Geological Engineering, v. 9, n. 3-4, p. 167-182, 1991.

NOGAMI, J. S.; Villibor, **Pavimentação de Baixo Custo com Solos Lateríticos.** São Paulo: Vilibor, 1995. 240p

OLIVEIRA, J. B. **Pedologia Aplicada.** 3ed. Piracicaba: FEALQ, 2008.

OLIVEIRA, M. O. **Monitoramento da paisagem: da ferrovia à avenida centenário em Criciúma-SC.** Dissertação de Mestrado. Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011. 184f.

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.

PANDOLFO et al. **Atlas climatológico do Estado de Santa Catarina.** Florianópolis: Epagri, 2002. CD-ROM.

PAZ, M. R. **Integração do sistema de informações geográficas e do cadastro técnico multifinalitário para zoneamento de áreas de risco com base na pedologia**. Dissertação de mestrado. Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011. 190p.

PRADO, H. **Manual de classificação de solos do Brasil**. 3ed. Jaboticabal: FUNEP, 1996. 194p.

PRADO, H. **Solos do Brasil: gênese, morfologia, classificação, levantamento, manejo**. 3 ed. Piracicaba: H do Prado, 2003. 275p.

PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO JOSÉ. Disponível em: <<http://www.pmsj.sc.gov.br/cidade/>>. Acesso em: 25 de maio de 2014.

RAMOS, P. R. **Modelo para outorga de uso da água utilizando a metodologia multicritério de apoio à decisão: estudo de caso da Bacia Hidrográfica do rio Cubatão do Sul**. Tese de Doutorado Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2005. 260 f.

REGINATTO, et al. **Shalstab application to identify the susceptible areas of shallow landslides in Cunha river watershed, Rio dos Cedros city, SC, Brazil**. In: 4th GEOBIA, Rio de Janeiro, 2012, p.108.

ROSENFELDT, Y. A. Z. **O cadastro técnico multifinalitário como suporte para análise e subsídio às políticas públicas de regularização fundiária**. Dissertação de Mestrado. Pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012. 153f.

ROSNICIEK, A.; IMAI, H. I. **Mapeamento geotécnico e análise de áreas suscetíveis a deslizamentos rasos da bacia do rio Ratonés – aplicação do modelo SHALSTAB**. Trabalho de conclusão de curso. 155f. Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

ROSOLEM, G. P.N.; SCHIMITT, A.; ROSENFELDT, Y.A.Z, LOCH, C. **Atualização de Bases Cartográficas para Projetos de Engenharia**. In: Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário. Florianópolis, 2012.

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.

SANTA CATARINA. Secretaria de Estado do Planejamento, Orçamento e Gestão. **Conhecendo Santa Catarina** (Capítulo 2: Diversidade Ambiental). Disponível em: <  
[http://www.spg.sc.gov.br/Cartografia%20e%20Geografia/Atlas%20de%20SC/atlas/CAP\\_2\\_%20VERSAO\\_13\\_be.pdf](http://www.spg.sc.gov.br/Cartografia%20e%20Geografia/Atlas%20de%20SC/atlas/CAP_2_%20VERSAO_13_be.pdf) > Acesso em: 25 de maio de 2014.

SANTOS, E. F. **Estudo comparativo de diferentes sistemas de classificações geotécnicas aplicadas aos solos tropicais**. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo. São Carlos, 2006. 145 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.

SANTOS, V. C. **Classificação de vazios urbanos utilizando S.I.G como apoio ao planejamento e gestão urbanos e à implementação do estatuto da cidade. Estudo de caso: município de São José – SC**. Dissertação de Mestrado. Pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002. 205f.

SILVA, E O, **Extensões Espaciais em MySQL**, Revista SQLMagazine, ed. 14, 2004. ISSN 1677918 – 5.

SILVA, J. P. M. **Os métodos de equilíbrio limite e dos elementos finitos na análise de estabilidade de taludes**. Dissertação de mestrado. Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto-Pt, 2011.

TARBOTON, D. G. **A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models.** Water resources research, v. 33, n. 2, p. 309-319, 1997

TAROLLI, P.;TARBOTON, D.G. **A new method for determination of most likely landslide initiation points and the evaluation of digital terrain model scale in terrain stability mapping.** Hydrology and Earth System Sciences Discussions, v. 10, n. 5, p. 663-677, 2006.

TÉCNOMAPAS. **Transformação entre o SAD 69 e o SIRGAS2000 no ArcGIS.** Disponível em:  
<[http://www.geobases.es.gov.br/portal/attachments/032\\_SAD69\\_SIRGAS2000\\_ArcGis\\_NTV2.pdf](http://www.geobases.es.gov.br/portal/attachments/032_SAD69_SIRGAS2000_ArcGis_NTV2.pdf)>. Acesso em: 30 de junho de 2014.

TONUS, B. P. A. **Estabilidade de taludes: avaliação dos métodos de equilíbrio limite aplicados a uma encosta coluvionar e residual da serra do mar paranaense.** Dissertação de Mestrado. Pós-graduação em Construção Civil. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009. 147f.

UBERTI, A. A. A. **Santa Catarina: Proposta de Divisão Territorial em Regiões Edafoambientais Homogêneas.** Tese de Doutorado. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005. 185 f.

UFRGS. **Transformação entre Referenciais Geodésicos.** Disponível em:  
< [http://www.ufrgs.br/engcart/Teste/refer\\_exp.html](http://www.ufrgs.br/engcart/Teste/refer_exp.html)>. Acesso em: Junho de 2014.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA. Centro Universitário de Estudos e Pesquisas Sobre Desastres. **Atlas brasileiro de desastres naturais 1991 a 2010: volume Brasil.** Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastre. Florianópolis: CEPED UFSC, 2012.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA. Centro Universitário de Estudos e Pesquisas Sobre Desastres. **Atlas brasileiro de desastres naturais 1991 a 2010: volume Santa Catarina.** Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastre. Florianópolis: CEPED UFSC, 2011.

**USGS. Landslide Types and Processes.** U.S. Department of Interior. U.S. Geological Survey. Disponível em: <<http://pubs.usgs.gov/fs/2004/3072/fs-2004-3072.html>>. Acesso em: 25 de junho de 2014.

VILLIBOR, D. F.; NOGAMI, J. S.; FABRI, GTP. **Proteção à erosão de pavimentos de baixo custo.** 21ª Reunião Anual de Pavimentação-ABPV, Salvador, 1986.

XAVIER, S. C. **O mapeamento geotécnico por meio de geoprocessamento como instrumento de auxílio ao planejamento do uso e ocupação do solo em cidades costeiras: estudo de caso para Pelotas (RS).** Dissertação de Mestrado. Pós-graduação em Engenharia Oceânica. Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 2010.