

**CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

Andressa Abich

**APLICAÇÃO DO MODELO SHALSTAB NO MAPEAMENTO DE ÁREAS  
SUSCETÍVEIS À OCORRÊNCIA DE ESCORREGAMENTOS TRANSLACIONAIS  
EM REGIÃO LOCALIZADA NA ZONA URBANA DE SANTA CRUZ DO SUL-RS**

Santa Cruz do Sul

2020

Andressa Abich

**APLICAÇÃO DO MODELO SHALSTAB NO MAPEAMENTO DE ÁREAS  
SUSCETÍVEIS À OCORRÊNCIA DE ESCORREGAMENTOS TRANSLACIONAIS  
EM REGIÃO LOCALIZADA NA ZONA URBANA DE SANTA CRUZ DO SUL-RS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Civil da Universidade de Santa Cruz do Sul - UNISC, para obtenção do título de Engenheira Civil.

Orientador: Prof. Dr. Leandro Olivio Nervis

Santa Cruz do Sul

2020

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, gostaria de agradecer àqueles que sempre estiveram do meu lado, meus pais Lizane e Leandro, minhas irmãs Alexandra e Andriele, que sempre me apoiaram e incentivaram a busca dos meus sonhos. Agradeço ao meu namorado Fernando, que sempre esteve disposto a ajudar.

Agradeço ao meu orientador Leandro Olívio Nervis por todo conhecimento transmitido, pela atenção e orientações que foram fundamentais para guiar este trabalho. Agradeço a todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

Às minhas amigas Francine, Luisa e Luciana, que são pessoas maravilhosas, foi um prazer compartilhar estes anos com vocês.

Agradeço a Deus por tudo.

## RESUMO

Existem diversos tipos de movimentos de massa que resultam, em maior ou menor grau, em prejuízos ambientais e econômicos, ou mesmo, em perda de vidas humanas. A identificação desses riscos é fundamental para evitar que isso ocorra. Este trabalho apresenta a aplicação do Modelo SHALSTAB – *Shallow Landslide Stability*, para identificar áreas suscetíveis a escorregamentos do tipo translacionais rasos em uma região da zona urbana do município de Santa Cruz do Sul, pois o município já evidenciou eventos do tipo. O SHALSTAB consiste em um modelo matemático que combina a equação de talude infinito de Mohr-Coulomb e de um modelo hidrológico de estado uniforme. Os dados requeridos são referentes a topografia e aos parâmetros do solo, sendo necessária a elaboração de um Modelo Digital de Elevação da área de estudo e a caracterização do solo por meio de ensaios de laboratório e análise de boletins de sondagens. A área de estudo foi delimitada em função de sua classificação geotécnica e das informações disponíveis sobre a mesma. Os ensaios de laboratório forneceram os dados de entrada necessários, sendo eles o ângulo de atrito do solo, o intercepto de coesão e densidade saturada. Como o modelo se aplica a taludes infinitos, outro parâmetro de entrada necessário é a profundidade da camada de solo, obtida ao gerar um perfil estratigráfico típico para a área de estudo a partir de laudos de sondagens disponíveis. Através da análise estatística obtiveram-se três valores para esse parâmetro (média, limite inferior e limite superior), tendo sido realizadas três combinações no modelo, utilizando os demais parâmetros topográficos e de solo fixos. Os resultados indicaram que a maior parte da área considerada para o estudo se classifica como estável, porém, há incidência de áreas instáveis, às quais foram associadas pluviosidades necessárias para deflagrar movimentos de massa. O comparativo com o mapa de declividades e com a ZOC5, zona delimitada no Mapa de Índices do Plano Diretor como sendo de suscetibilidade e risco a movimento de massa na área urbana do município, indicou incidência de áreas instáveis nas encostas com maiores declividades e evidenciou locais instáveis além dos limites da ZOC5. Com os resultados alcançados, além do mapeamento preliminar das áreas suscetíveis a escorregamentos, pretende-se contribuir com futuras investigações que venham a ser realizadas nas áreas identificadas como mais críticas, ou mesmo auxiliar para aplicar o modelo em outras áreas da zona urbana do município, que se apliquem ao modelo do talude infinito.

Palavras-chave: SHALSTAB. Escorregamentos translacionais. Mapeamento de Suscetibilidade.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Perfil Típico de Solo Residual .....	14
Figura 2 - Ilustração da Localização de Tálus .....	15
Figura 3 - Esquemas dos Tipos de Movimentos de Massa .....	19
Figura 4 - Diagrama do Critério de Ruptura de Mohr-Coulomb.....	23
Figura 5 - Modelo Físico de Referência para Implementação do SHALSTAB .....	24
Figura 6 - Representação do Modelo Hidrológico .....	26
Figura 7- Definição dos Campos de Estabilidade .....	28
Figura 8 - Ruptura Rotacional no Bairro Santo Inácio - SCS .....	32
Figura 9 - Deslizamento do Tipo Corrida no Bairro Santo Inácio - SCS.....	32
Figura 10 - Deslizamento no Bairro Belvedere - SCS.....	33
Figura 11 - Queda de Bloco no Bairro Belvedere - SCS.....	33
Figura 12 - Movimento de Terra no Bairro Belvedere - SCS .....	33
Figura 13 - Deslizamento de Encosta no Bairro Margarida - SCS.....	34
Figura 14 - Localização da Área de Estudo.....	37
Figura 15 - Localização do Terreno de Coleta das Amostra .....	38
Figura 16 - Perfil Geomorfológico .....	39
Figura 17 - Amostra Indeformada .....	45
Figura 18 - Processo de Sedimentação .....	46
Figura 19 - Ensaio de Limite de Liquidez .....	47
Figura 20 - Ensaio de Limite de Plasticidade .....	48
Figura 21 - Ensaio de Cisalhamento Direto.....	49
Figura 22 - Bacia Hidrográfica Delimitada e MDE Gerado.....	52
Figura 23 - Perfil Estratigráfico Típico .....	54
Figura 24 - Curva Granulométrica do Solo Coluvionar .....	54
Figura 25 - Tensão Cisalhante x Deformação Horizontal .....	56
Figura 26 - Envoltória de Ruptura (Tensão cisalhante x Tensão normal).....	56
Figura 27 - Combinação 1 .....	58
Figura 28 - Combinação 2 .....	59
Figura 29 – Combinação 3 .....	60
Figura 30 - Mapa de Declividades.....	64
Figura 31 - Comparações das Combinações nas Declividades mais Acentuadas (a-d) .....	65
Figura 32 - Comparações das Combinações nas Declividades mais Acentuadas (e-h) .....	66
Figura 33 - Área da ZOC5 sobreposta a Área de Estudo .....	68

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classes de Estabilidade do Modelo de Dietrich e Montgomery (1998).....	27
Tabela 2 - Dados Climatológicos de Santa Cruz do Sul.....	41
Tabela 3 - Dados para Obter um Perfil Estratigráfico Típico.....	53
Tabela 4 - Resultados das Análises Estatísticas Realizadas para Obtenção de um Perfil Estratigráfico Típico .....	53
Tabela 5 - Caracterização do Solo Coluvionar.....	55
Tabela 6 - Índices Físicos .....	56
Tabela 7 - Combinações dos Parâmetros de Entrada .....	57
Tabela 8 - Incidência das Classes nas Três Combinações.....	61
Tabela 9 - Precipitações Necessárias para Desencadear Riscos.....	62

## **LISTA DE QUADROS**

Quadro 1 - Composição do Solo Residual em Função da Rocha-mãe.....	14
Quadro 2 - Classificação de Movimentos de Encosta segundo Varnes (1978).....	16
Quadro 3 - Classificação dos Tipos de Movimento de Massa de Augusto Filho (1992).....	17

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>9</b>
1.1	Área de Pesquisa .....	10
1.2	Objetivos .....	10
1.2.1	Objetivo Geral.....	10
1.2.2	Objetivos Específicos.....	10
1.3	Justificativa.....	11
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>12</b>
2.1	As Rochas e o Processo de Formação dos Solos.....	12
2.1.1	As Rochas .....	12
2.1.2	O Intemperismo e o Processo de Formação dos Solos .....	13
2.2	Movimentos de Massas de Solo .....	16
2.2.1	Classificação dos Movimentos de Massa.....	16
2.2.2	Agentes e Causas de Movimentos de Massa .....	20
2.3	O Modelo SHALSTAB .....	21
2.3.1	Critério de Ruptura de Mohr-Coulomb.....	22
2.3.2	Modelo Hidrológico de Estado Uniforme.....	25
2.3.3	Equação de Estabilidade Hidrológica da Encosta.....	26
2.4	Modelo SHALSTAB Modificado por Michel (2013).....	28
2.5	A Problemática dos Movimentos de Massa em Santa Cruz do Sul .....	30
2.5.1	Breve Registro de Ocorrências de Movimentos de Massa em Santa Cruz do Sul.....	31
2.5.2	Zoneamento de Índices de Uso no Município.....	34
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>36</b>
3.1	Localização e Definição da Área de Estudo.....	36
3.2	Descrição da Área de Estudo.....	38
3.2.1	Geologia, Geomorfologia e Classificação Geotécnica.....	38
3.2.2	Vegetação.....	40
3.2.3	Clima.....	40

3.3 Levantamento de Dados Disponíveis sobre a Área de Estudo .....	41
3.4 Processamento e Interpretação dos Dados .....	41
3.4.1 Ambiente SIG .....	41
3.4.2 Criação de MDE e Delimitação da Bacia Hidrográfica a partir das Curvas de Nível ....	42
3.4.3 Geração de Perfil Estratigráfico Típico da Unidade Geotécnica a partir das Sondagens	42
3.5 Coleta de Amostras de Campo .....	44
3.6 Ensaio de Laboratório .....	45
3.6.1 Ensaio de Análise Granulométrica.....	45
3.6.2 Ensaio de Determinação do Limite de Liquidez (LL) .....	47
3.6.3 Ensaio de Determinação do Limite de Plasticidade (LP).....	48
3.6.4 Ensaio de Cisalhamento Direto.....	48
3.7 Aplicação do Modelo SHALSTAB.....	49
<b>4 APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....</b>	<b>52</b>
4.1 MDE e Bacia Hidrográfica Delimitada .....	52
4.2 Perfil Estratigráfico Típico da Unidade Geotécnica.....	53
4.3 Caracterização do Solo de Colúvio .....	54
4.4 Resistência ao Cisalhamento do Solo de Colúvio .....	55
4.5 Mapa de Suscetibilidade a Escorregamentos Translacionais .....	57
<b>5 CONCLUSÕES .....</b>	<b>69</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>72</b>
<b>APÊNDICES .....</b>	<b>78</b>
<b>APÊNDICE A –Localizações dos Pontos com Possibilidade de Retirada de Amostras ..</b>	<b>78</b>
<b>APÊNDICE B – Procedimentos para Obtenção de Bacia Hidrográfica e MDE em SIG</b>	<b>83</b>
<b>APÊNDICE C – Mapa de Geoespacialização das Sondagens .....</b>	<b>92</b>
<b>APÊNDICE D – Perfis Esquemáticos dos Boletins de Sondagens .....</b>	<b>93</b>
<b>APÊNDICE E – Aplicação do Modelo <i>Automatic SHALSTAB Analysis</i> (ASA) .....</b>	<b>96</b>
<b>APÊNDICE F – Criação de Mapa de Declividades.....</b>	<b>102</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>103</b>
<b>ANEXO A – Mapa de Unidades Geotécnicas da Área Urbana de Santa Cruz do Sul ..</b>	<b>103</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Os movimentos de massa estão entre os principais desastres naturais que acontecem no Brasil, relacionados, geralmente, a precipitações pluviométricas intensas e prolongadas (TOMINAGA, 2009). Para Rebelo (2010), os movimentos de massa em encostas são considerados riscos geomorfológicos e, quando ocorrem, podem colocar em risco a vida de pessoas, devido a áreas instáveis cada vez mais ocupadas. Segundo Nummer e Pinheiro (2013), os movimentos são processos geológicos que contribuem para a evolução da paisagem, modificando a forma das encostas e vertentes.

Um deslizamento de terra é um fenômeno que inclui uma variedade de movimentos, os quais podem ser quedas de rochas, falhas profundas de declives e fluxos de detritos rasos. Embora a gravidade seja a principal força motriz para desencadeá-lo, existem outros fatores que afetam a estabilidade de uma encosta (WERNER e FRIEDMAN, 2010). Esta é apenas uma das definições de movimentos de massa, pois, segundo Nummer e Pinheiro (2013), existem inúmeras classificações que envolvem variáveis como o material deslocado, o processo do movimento, os fatores condicionantes, a geometria e velocidade do deslocamento.

O último Anuário Climático do Brasil referente ao ano de 2018, apresentou para as regiões sul e sudeste do país, chuvas acima da Normal Climática, com máxima no estado do Rio Grande do Sul. O mesmo documento apresenta um total de 372 ocorrências confirmadas de desastres naturais, das quais 174 são de natureza hidrogeológica (deslizamentos de terra) no território nacional (RAMOS *et al.*, 2019).

No município de Santa Cruz do Sul, são comuns os problemas de instabilidade. Por esta razão, a cidade tem sido alvo de estudos desde 1976, com mapeamento de ocorrências e seus indícios pelo geólogo Sandor Grehs. Assim, o município foi um dos primeiros do país a contar com levantamento geológico-geotécnico com propósito de planejamento urbano (NORONHA, MIZUSAKI e BRESSANI, 2012). Duas décadas depois, outro estudo importante realizado pelo geólogo Wenzel, contribuiu com um mapeamento geológico estrutural da cidade. Os estudos citados auxiliaram na delimitação das zonas de risco no Plano Diretor, atestando maior fragilidade na área do Cinturão Verde e seu entorno (WENZEL, 2013).

Apesar de haverem estudos e mapeamentos sobre a área, é interessante o teste de outros modelos determinísticos, como os modelos matemáticos, em especial o SHALSTAB – *Shallow Landsliding Stability*, modificado por Michel (2013), baseado no modelo original (DIETRICH e MONTGOMERY, 1998), que combina a equação de talude infinito de Mohr-Coulomb e de um modelo hidrológico de estado uniforme, associado a dados topográficos da área de estudo.

O modelo se aplica a solos rasos, identificando áreas suscetíveis a escorregamentos do tipo translacionais e pode apontar até 7 classes de estabilidade. Além disso, em posse dos parâmetros de permeabilidade do solo, é possível associar um volume de chuva que pode desencadear determinada classe de estabilidade.

Neste trabalho, para a futura aplicação do método, foi realizada uma revisão bibliográfica sobre o tema, desde a origem das rochas até a formação dos solos, definição e classificação dos movimentos de massas e seus fatores condicionantes, descrição da área de estudo e uma breve explicação do modelo matemático SHALSTAB.

## **1.1 Área de Pesquisa**

O presente trabalho pertence a área da Geotecnia, ao que se refere à estabilidade de taludes. O método utilizado para identificar diferentes classes de estabilidade foi o modelo SHALSTAB, que mapeia áreas suscetíveis a escorregamentos do tipo translacionais. A área escolhida para realizar o mapeamento situa-se na zona urbana de Santa Cruz do Sul, Rio Grande do Sul.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo Geral**

O trabalho teve por objetivo elaborar o mapeamento de áreas suscetíveis a movimentos de massa do tipo escorregamentos translacionais em uma região localizada na zona urbana do município de Santa Cruz do Sul.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

Os objetivos específicos do presente trabalho são os seguintes:

- Obter parâmetros geotécnicos da área de estudo, através de coleta de solo e realização de ensaios de laboratório, que venham se somar a dados pré-existentes;
- Obter parâmetros topográficos da área de estudo através da aquisição de dados de curvas de níveis;
- Gerar um Perfil Estratigráfico Típico para a área de estudo;

- Obter um mapa de áreas suscetíveis a escorregamentos através da aplicação do modelo SHALSTAB e realizar a análise dos resultados finais;
- Determinar um índice pluviométrico que poderá ocasionar rupturas em cada classe;
- Realizar comparações com um mapa de declividades e com o Mapa de Índices do Plano Diretor, que delimita a zona ZOC5 (susceptível a movimentos de massa);
- Servir de subsídio para investigações geotécnicas que venham a ser realizadas nessa área e nas demais regiões da cidade, onde se aplica o modelo.

### 1.3 Justificativa

O surgimento de novos núcleos de ocupação urbana leva a uma transformação do espaço (MELLO, 2005 apud ROBAINA e OLIVEIRA, 2013). Quando não há um planejamento prévio e legislação de uso e ocupação do solo, ou fiscalização de seu cumprimento, esse crescimento pode levar a povoação de áreas consideradas de risco, onde ocorrem retiradas de vegetação, realização de cortes nas encostas tanto para moradias, como para vias de acesso, favorecendo os condicionantes deflagradores de deslizamentos de terra (KOBİYAMA *et al.*, 2006).

Dessa forma, torna-se bastante importante o estudo e análise de movimentações de massa para evitar ou mitigar as consequências destes eventos, que podem ser perdas humanas, ambientais e econômicas. Trabalhos na área de previsão de deslizamentos contribuem para a prevenção de riscos e, segundo Kobiyama *et al.* (2006) a prevenção requer ações tais como mapeamentos de riscos, planejamento de medidas emergenciais, conscientização da comunidade, além de outros, que buscam garantir o bem estar das pessoas, do meio ambiente e evitar prejuízos financeiros.

O município de Santa Cruz do Sul possui um histórico de deslizamentos, principalmente na região do Cinturão Verde e entornos, onde já foi atestada a sensibilidade geológica por autores da bibliografia pesquisada. Desta forma, é relevante aplicar uma metodologia avaliativa de instabilidade e risco de movimentos de massa, pois se torna útil para comparações e maiores precisões de fatores de segurança. O modelo SHALSTAB classifica as áreas em até sete classes de estabilidade, proporcionando informações mais detalhadas sobre a área de estudo, o que pode incluir áreas consideradas estáveis em áreas com algum grau de risco, ou classificar áreas com pequeno grau de risco em áreas seguras. Essas informações podem ser utilizadas como medida preventiva, colaborando com a segurança da população e do meio ambiente.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 As Rochas e o Processo de Formação dos Solos**

#### **2.1.1 As Rochas**

As rochas são definidas como agregados de minerais, podendo ser formadas por um só tipo de mineral (rochas simples); ou constituídas por mais de um tipo de mineral (rochas compostas). Em Geologia, são consideradas rochas tanto materiais duros e resistentes, quanto materiais moles e friáveis (CHIOSSI, 2013). Em Engenharia, são consideradas rochas materiais que podem ser desagregados apenas com uso de explosivos. Materiais que podem ser facilmente escavados são definidos como solos, mesmo que oriundos de um maciço de rocha alterada (QUEIROZ, 2016). As rochas são divididas, de acordo com sua gênese em três grupos distintos: magmáticas, sedimentares e metamórficas.

As rochas magmáticas, também denominadas de rochas ígneas, são formadas pelo resfriamento e consolidação do magma, material originário do manto, devido às altas temperaturas, que quando escoam e se depositam na superfície da crosta terrestre dá origem as rochas extrusivas, e quando este material se consolida no interior da crosta dá origem às rochas intrusivas (QUEIROZ, 2016). Entre os tipos de rochas extrusivas estão os derrames de basalto do sul do Brasil, que possuem coloração preta a cinza-escura e são compostos de minerais microscópicos: piroxênios e ferromagnesianos, quartzo, feldspato, ferro, cálcio, magnésio e, também magnetita que confere um pequeno grau de magnetismo (QUEIROZ, 2016; CHIOSSI, 2013). A principal rocha intrusiva do Rio Grande do Sul é o granito, sendo possível observar a sua ocorrência no Mapa Geológico do Estado do Rio Grande do Sul, documento elaborado pelo Serviço Geológico do Brasil (BRASIL, 2008).

As rochas sedimentares são aquelas cujos minerais são resultado de processos de intemperismo, erosão e sedimentação (RAFFERTY, 2012). São constituídas de elementos que foram desagregados e decompostos, depositados ou transportados por agentes como vento, água ou gravidade. Além disso, ocorre a consolidação desses sedimentos em decorrência do peso das próprias camadas superiores, com aproximação das partículas e diminuição dos vazios, que favorece a cimentação (minerais cimentantes mais comuns: carbonato de cálcio, argilas, sílica ou óxidos de ferros). Esse processo é denominado de diagênese ou litificação. Como exemplos comuns desse tipo de rocha tem-se os arenitos, os siltitos e argilitos (QUEIROZ, 2016).

Por fim, as rochas metamórficas são aquelas nas quais novos minerais se formaram devido a efeitos de mudança de temperatura ou pressão, ou ambos, em rochas preexistentes, modificando a sua estrutura cristalina (RAFFERTY, 2012). Podem originar-se de rochas magmáticas, sedimentares e metamórficas preexistentes, a grandes profundidades na crosta terrestre, onde as condições de pressão e temperatura favorecem as mudanças. Nessa transformação pode ou não haver mudança da composição química. As novas estruturas formadas afetam o comportamento mecânico das rochas, tornando-as anisotrópicas, ou seja, as tensões diferem dependendo da direção de aplicação de cargas. Os quartzitos, os mármore e os xistos são alguns exemplos desse tipo de rocha (QUEIROZ, 2016).

### **2.1.2 O Intemperismo e o Processo de Formação dos Solos**

Os solos se formam a partir do intemperismo das rochas. Suas propriedades físicas são determinadas pelos minerais que os constituem e, portanto, das rochas que lhe deram origem. O intemperismo consiste em processo de desgaste rochoso através de meios mecânicos e químicos (DAS, 2011). Para Chioffi (2013), esse processo resulta na desintegração e decomposição das rochas e minerais pela ação de agentes físicos ou mecânicos e químicos. Como consequência, haverá produção de novos materiais, que por sua vez, constituirão os solos, sedimentos e as rochas sedimentares. Segundo o mesmo autor, esse material intemperizado denomina-se regolito ou manto de decomposição e, recobre a rocha original. Sua espessura varia de centímetros até dezenas de metros.

Quanto a sua formação, os solos podem ser classificados em dois grupos: solos residuais, que permanecem no local onde ocorreu a intemperização da rocha de origem, e solos transportados, quando ocorre o transporte, por um agente qualquer, dos produtos de intemperização da rocha (CHIOSSI, 2013).

Segundo Chioffi (2013), os solos residuais são muito comuns na região centro-sul do Brasil em razão do clima. Encontram-se no próprio local em que se formaram e, para sua ocorrência, é necessário que haja decomposição da rocha com ausência de remoção por agentes externos. Essa decomposição depende de alguns fatores, tais como a temperatura, cobertura vegetal e regime pluviométrico, portanto, regiões tropicais favorecem degradações aceleradas das rochas (PINTO, 2006).

A composição do solo formado é em função da composição mineralógica da rocha de origem (MASSAD, 2005 apud GERSCOVICH, 2016). Portanto, pode-se associar a composição do solo residual em função da rocha-mãe, conforme apresenta o Quadro 1.

**Quadro 1 - Composição do Solo Residual em Função da Rocha-mãe**

ROCHA	TIPO DE SOLO
Basalto	Argiloso
Quartzito	Arenoso
Filito	Argiloso
Granito	Arenoargiloso
Calcário	Argiloso
Gnaisse	Siltoso e Micáceo

Fonte: Gerscovich, 2016, p. 15.

Conforme o processo de intemperismo avança da superfície para as regiões mais profundas, o solo residual acaba por apresentar diferentes horizontes. A camada mais superficial contém o solo maduro, e, devido ao alto grau de intemperismo esse horizonte perde as características da rocha de origem. Abaixo desse horizonte há uma camada de solo residual jovem, saprolítico ou solo de alteração de rocha, com menor grau de intemperização, preservando características estruturais e alguns minerais da rocha mãe. Abaixo deste horizonte pode-se identificar uma camada de rocha alterada, onde o intemperismo está em um grau bem reduzido (GERSCOVICH, 2016). Não há um limite brusco bem definido entre os horizontes, sendo a passagem entre eles gradativa (CHIOSSI, 2013).

Queiroz (2016) esquematizou o perfil típico de um solo residual como aparece na Figura 1, sendo o solo superficial orgânico denominado como Horizonte A, o solo de decomposição de rocha denominado como Horizonte B, o solo com matacões denominado como Horizonte C e, a rocha sã denominada como Horizonte D.

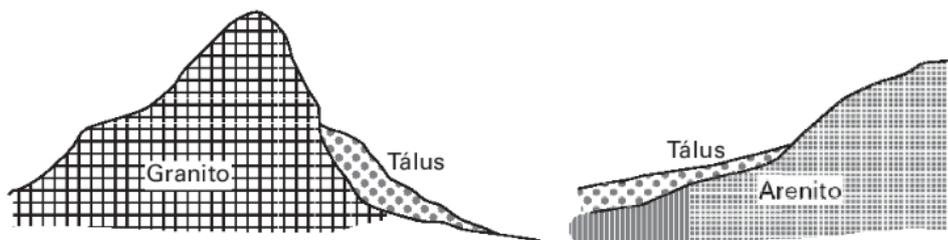
**Figura 1 - Perfil Típico de Solo Residual**

Fonte: Queiroz, 2016.

Já os solos transportados, por terem sofrido um processo de transporte e deposição ao seu atual local por algum agente, suas propriedades são função deste agente de transporte (PINTO, 2006). Segundo Chioffi, (2013), os solos transportados formam depósitos mais inconsistentes e fofos que os residuais. De acordo com a capacidade do agente de transporte, pode haver grandes variações na sua composição. Os solos transportados estão divididos conforme o agente transportador, se destacando no Brasil os seguintes: aluvionares, eólicos e coluvionares. No contexto de movimentação de massas, interessa particularmente os solos coluvionares.

Segundo Turner (1996 apud EISENBERGER, 2003), nos solos coluvionares o transporte ocorre devido a ação da gravidade, embora possa haver agentes secundários como o vento e a água. Para a formação de depósitos de colúvio e tálus, ao pé de elevações e encostas naturais, devem ocorrer escorregamentos. Sua composição depende do tipo de rocha de onde se desprende, nas partes mais elevadas, e podem estar misturados com blocos de rochas. A Figura 2 apresenta uma ilustração da localização de tálus ao pé de encostas (MASSAD, 2010; CHIOSSI, 2013).

**Figura 2 - Ilustração da Localização de Tálus**



Fonte: Chioffi, 2013.

Colúvios e tálus são um dos perfis de solo onde ocorrem instabilidades mais frequentes (EISENBERGER, 2003). Em alguns casos, os colúvios movimentados soterram drenagens existentes ou obstruem nascentes de água, acarretando o aprisionamento da água dentro da massa de tálus. Dessa forma, essas massas sofrem movimentos lentos, que são intensificados em períodos de precipitação elevada (PINHEIRO, 2000). Eisenberger (2003) acrescenta que em taludes de colúvio podem ocorrer variadas formas de movimentos, como rastejo, escorregamento translacional do tipo talude infinito, escorregamento rotacional, corridas ou movimentos complexos, que são associações das formas já citadas.

## 2.2 Movimentos de Massas de Solo

Caputo e Caputo (2015a), definem talude como uma superfície inclinada que limita um maciço de terra, de rocha ou ambos, podendo ser natural como encostas ou vertentes, ou artificial, no caso de cortes e aterros. A estabilidade de taludes está relacionada com a natureza dos materiais e de agentes perturbadores e, quando as forças resistentes do talude são superadas pelas forças cisalhantes, ocorrem os movimentos de massa. Fiori e Carmignani (2009) destacam que as condições que favorecem os movimentos de massa dependem da geomorfologia, das características do solo e das rochas, clima, cobertura vegetal e ação antrópica.

Esse processo dinâmico é responsável pela evolução geomorfológica e, é mais frequente na região sul, sudeste e nordeste do Brasil (TOMINAGA, 2009). Na literatura, existem diversos autores que propuseram classificações, pois os movimentos envolvem uma grande variedade de materiais, processos e fatores condicionantes.

### 2.2.1 Classificação dos Movimentos de Massa

Como mencionado anteriormente, existem diversas propostas de classificação, e a classificação compreendida no Quadro 2 é a mais aceita internacionalmente (Varnes, 1978 apud Gerscovich, 2016, p.16). Seu sistema possui aplicabilidade tanto para solos quanto para rochas e baseia-se no tipo de movimento e no tipo de material transportado (GERSCOVICH, 2016). Segundo Nummer e Pinheiro (2013), essa é uma classificação geomorfológica mais detalhada.

**Quadro 2 - Classificação de Movimentos de Encosta segundo Varnes (1978)**

TIPO DE MOVIMENTO	TIPO DE MATERIAL		
	Rocha	Solo (engenharia)	
		Grossoiro	Fino
Quedas	De rocha	De detritos	De terra
Tombamentos	De rocha	De detritos	De terra
Escorregamento	Poucas unidades	Abatimento de rocha	Abatimento de terra
	Rotacional	De blocos rochosos	De blocos de terra
	Muitas unidades	De rocha	De terra
Expansões laterais	De rocha	De detritos	De terra
Corridas/escoamentos	De rocha (rastejo profundo)	De detritos	De terra
		(Rastejo de solo)	
Complexos: combinação de dois ou mais dos principais tipos de movimentos			

Fonte: Varnes, 1978 apud Gerscovich, 2016, p. 16.

No Brasil, destaca-se a classificação apresentada no Quadro 3 (Augusto Filho, 1992 apud Gerscovich, 2016, p.17), sendo uma revisão da classificação de Varnes (1978) ajustada às características dos principais grupos de processos de escorregamento em condições climáticas e geológicas brasileiras (GEORIO, 1999 apud GERSCOVICH, 2016). Em sua versão são considerados o comportamento, geometria e material compreendidos em cada tipo de movimento.

**Quadro 3 - Classificação dos Tipos de Movimento de Massa de Augusto Filho (1992)**

<b>PROCESSOS</b>	<b>CARACTERÍSTICAS DO MOVIMENTO, MATERIAL E GEOMETRIA</b>
<b>Rastejo ou fluência</b>	Vários planos de deslocamento (internos) Velocidades muito baixas (cm/ano) a baixas e decrescentes com a profundidade Movimentos constantes, sazonais ou intermitentes Solo, depósitos, rocha alterada/fraturada Geometria indefinida
<b>Escorregamento</b>	Poucos planos de deslocamento (externos) Velocidades médias (km/hora) a altas (m/s) Pequenos a grandes volumes de material Geometria e materiais variáveis Planares – solos pouco espessos, solos e rochas com um plano de fraqueza Circulares – solos espessos homogêneos e rochas muito fraturadas Em cunha – solos e rochas com dois planos de fraqueza
<b>Queda</b>	Sem planos de deslocamento Movimentos tipo queda livre ou em plano inclinado Velocidades muito altas (vários m/s) Material rochoso Pequenos à médios volumes Geometria variável: lascas, placas, blocos, etc. Rolamento de matacão Tombamento
<b>Corrida</b>	Muitas superfícies de deslocamento (internas e externas à massa em movimentação) Movimento semelhante ao de um líquido viscoso Desenvolvimento ao longo das drenagens Velocidades médias a altas Mobilização de solo, rocha, detritos e água Grandes volumes de material Extenso raio de alcance, mesmo em áreas planas

Fonte: Augusto Filho, 1992 apud Gerscovich, 2016, p. 17.

Highland (2004), baseado na classificação apresentada no Quadro 2, descreveu os tipos de movimentos ilustrados na Figura 3, conforme exposto na sequência.

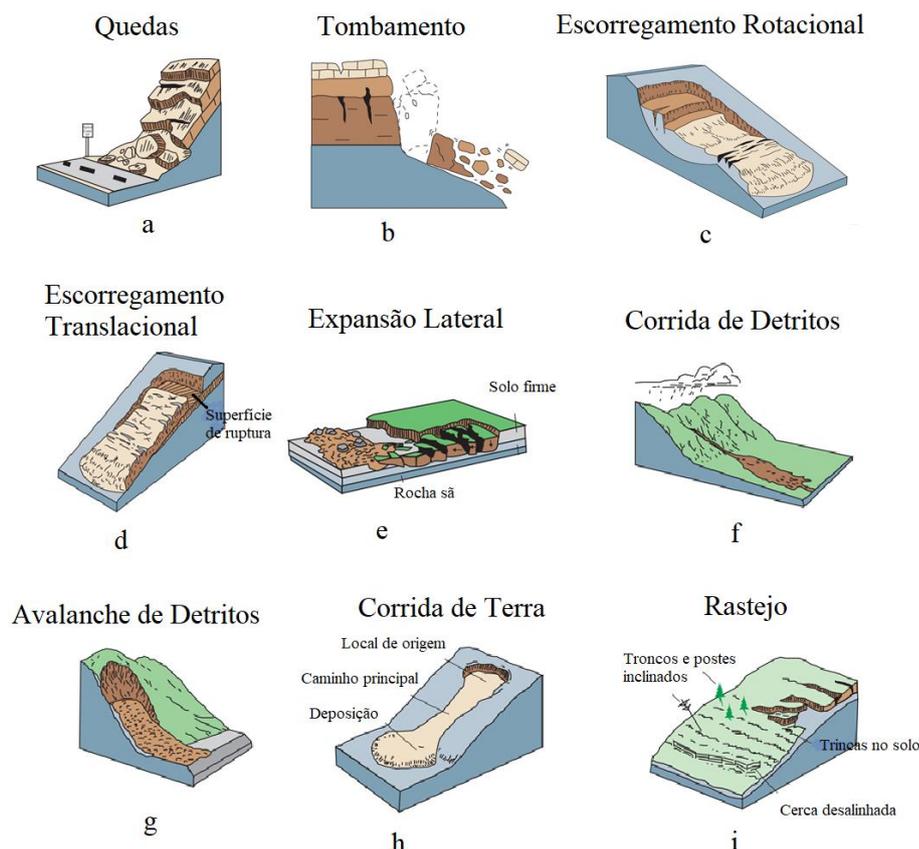
- As quedas (Figura 3a) são descritas como movimentos bruscos de massas de rochas ou pedregulhos, em alta velocidade e queda livre, que desprendem de declives ou falésias íngremes. Esse desprendimento ocorre ao longo de fraturas presentes no maciço, que podem estar sofrendo ação do intemperismo e pressões hidrostáticas.
- Os tombamentos (Figura 3b) destacam-se pela rotação direta de uma ou mais unidades de rochas. Eles ocorrem sob ação da gravidade, podendo haver ação de fluídos em rachaduras ou forças exercidas por unidades adjacentes.
- Escorregamento refere-se ao movimento de massa, onde uma zona distinta de fraqueza separa o material “deslizante” do material estável subjacente. Existem dois tipos de escorregamento, sendo eles o rotacional e o translacional. Em um escorregamento rotacional a superfície de ruptura possui geometria de uma curva côncava, e o movimento é rotacional sobre um eixo paralelo à superfície do solo e transversal ao longo da lâmina (Figura 3c). No escorregamento translacional o material se move ao longo da superfície com pouca rotação. Ocorre quando existem descontinuidades separando o material resistente do material de baixa resistência (Figura 3d).
- As expansões laterais ocorrem geralmente em declives suaves ou terrenos mais planos. O movimento é uma expansão lateral acompanhada de fraturas de cisalhamento ou tração. É ocasionado pela liquefação, onde o solo saturado, solto e sem coesão (geralmente siltes e areias), vai do estado sólido ao liquefeito (Figura 3e).
- Os escoamentos estão divididos em cinco categorias, sendo elas: corrida de detritos, avalanche de terra, corrida de terra, corrida de lama e rastejo. A corrida de detritos (Figura 3f) trata-se de uma forma de movimento rápido de uma massa contendo solo, rocha, matéria orgânica, ar e água. É causado por intensos fluxos de água, podendo ser devido à precipitação ou derretimento de neve. Na avalanche de detritos ocorre a corrida rápida à extremamente rápida de detritos (Figura 3g). Já a corrida de terra possui um formato que assemelha-se a uma ampulheta. O material liquefeito é escoado e desce a encosta, formando uma depressão no topo, e abaixo, o material se deposita. O formato deste movimento é alongado e geralmente ocorre sob condições saturadas em declives moderados contendo materiais de granulometria fina ou rochas com argila (Figura 3h).

A corrida de lama assemelha-se à corrida de terra, porém, o material está saturado o suficiente para fluir rapidamente. Deve conter ao menos 50% de partículas do tamanho de areia, silte e argila.

O movimento de Rastejo ou *creep* é um movimento imperceptivelmente lento e constante. É causado por tensão cisalhante suficiente para produzir deformação permanente, porém insuficiente para produzir cisalhamento. Existem três tipos de rastejo: sazonal, quando o movimento é afetado por mudanças na umidade e temperatura, devido a sazonalidade; contínuo, quando a tensão cisalhante excede a resistência do material; progressivo, quando as inclinações atingem o ponto de falha assim como outros tipos de movimentos de massa. É possível verificar a ocorrência de rastejo quando troncos de árvores estão curvos, quando há cercas, muros de contenção ou postes dobrados ou inclinados, além de pequenas ondulações ou cristas no solo. (Figura 3i).

Além destes, há os movimentos combinados entre dois ou mais dos descritos acima, sendo denominados de Complexos.

**Figura 3 - Esquemas dos Tipos de Movimentos de Massa**



Fonte: Adaptado de Highland, 2004.

### 2.2.2 Agentes e Causas de Movimentos de Massa

Os fatores deflagradores de movimentos de massa são classificados por diversos autores, alguns abrangendo variáveis mais amplas, e outros mais detalhadas.

Guidicini e Nieble (1984) destacam que os fatores que influem na análise do problema são de grande complexidade e o estudo requer o máximo de informações possíveis e bom senso em seu uso. Para Broms e Wong (1991), os mecanismos que podem afetar a estabilidade de encostas são as condições geológicas, hidrológicas e fatores topográficos e climáticos. Cruden e Varnes (1996) separaram os processos naqueles que (1) aumentam as tensões cisalhantes, (2) contribuem para baixa resistência, e (3) diminuem a resistência ao cisalhamento, como a ação do intemperismo. Segundo Highland e Bobrowsky (2008), as causas e mecanismos para desencadear movimentos de massas são divididos em causas físicas (chuvas e intemperismo), causas naturais (condições geológicas e morfológicas das encostas), e as causas antrópicas.

Fiori e Carmignani (2009) destacam que os fatores causadores de movimentos de massa são a forma e inclinação das encostas (geomorfologia), características do solo e das rochas (pedologia e litologia), clima, cobertura vegetal e ação antrópica, fatores estes, que serão apresentados a seguir:

- a) Geomorfológicos: envolvem as formas do relevo, as declividades, orientação das encostas, área de contribuição e elevação (FERNANDES e AMARAL, 1996).
- b) Pedológicos: influenciam e sofrem ação dos fatores erosivos em razão da textura, permeabilidade, estrutura e densidade (FIORI e CARMIGNANI, 2009).
- c) Geológicos: a composição litológica também interfere no desencadeamento de movimentos de massa (PINTO, PASSOS e CANEPARO, 2013). Os traços lito-estruturais, a composição física e química das rochas e as propriedades mecânicas são os condicionantes geológicos de movimentos de massa (FERNANDES, *et al.*, 2001; PINTO, PASSOS e CANEPARO, 2013). A massa rochosa pode ser enfraquecida por discontinuidades, como falhas, folheações, juntas, fissuras (CRUDEN e VARNES, 1996), que se tornam caminhos para o fluxo de água, favorecendo a erosão e diminuindo a resistência da rocha.
- d) Climáticos: incluem a precipitação e as diferenças de temperatura. Fiori e Carmignani (2009) afirmam que o aumento do grau de saturação do solo conduz a perda de coesão aparente, aumento da poropressão e redução da pressão efetiva, incrementa peso ao solo e força de percolação, entre outros elementos que levam a instabilidade. Outro fator importante é a umidade, segundo Cruden e Varnes (1996),

em locais onde é muito seco podem ocorrer rachaduras por dessecação ou intemperismo ao longo de discontinuidades pré-existentes. Já em locais muito úmidos, os cimentos das rochas, responsáveis por manter partículas unidas, podem se dissolver. Por fim, as variações de temperatura causadas pelo clima severo também podem desintegrar maciços devido as expansões e contrações térmicas. Conforme Guidicini e Nieble (1984), as oscilações térmicas diárias ou sazonais provocam variações volumétricas podendo conduzir a destaque de blocos. A variação diurna de temperatura é considerada como uma das causas principais de processos de rastejo.

- e) Cobertura Vegetal: a cobertura vegetal desempenha um papel importante para o equilíbrio de taludes. A presença de florestas controla o impacto no solo causado por precipitações, além de promover a estruturação e resistência do solo. Porém, em algumas situações, a cobertura vegetal pode se tornar agente causador de movimentos de massa, pelo acréscimo de peso e transmissão de esforços ao solo devido a força do vento exercida sobre as copas (FIORI e CARMIGNANI, 2009).
- f) Antrópicos: alterar padrões de drenagem, desestabilizar declives, remover vegetação, sobrecarregar o topo de encostas, lançar lixo e águas servidas, implantar sistemas de irrigações, de drenagem ou de reservatórios são fatores induzidos pelo homem que podem iniciar movimentos de massa (HIGHLAND e BOBROWSKY, 2008). Outras atividades que podem provocar deslizamentos são escavações para rodovias, ferrovias, canais, pedreiras e poços e, atividades como a mineração (BROMS e WONG, 1991).

### 2.3 O Modelo SHALSTAB

Muitas metodologias vêm sendo desenvolvidas para avaliar o risco de escorregamentos de terra em diversos locais, e dentre eles destaca-se o modelo SHALSTAB, que, segundo Listo (2016), foi elaborado a partir de trabalhos de Dietrich e Montgomery (1998), Montgomery e Dietrich (1994) e Dietrich *et al.* (1993). É um modelo matemático que permite mapear a suscetibilidade a escorregamentos rasos, a partir da combinação de um modelo de estabilidade de encostas baseado no método do talude infinito (Lei de ruptura de Mohr-Coulomb) e de um modelo hidrológico de estado uniforme.

Os parâmetros de entrada são topográficos (declividade e área de contribuição hidrográfica) e geotécnicos (coesão, ângulo de atrito interno, densidade saturada e profundidade

do solo). Segundo Vieira e Ramos (2015), a partir da aplicação do modelo, é possível definir a quantidade de chuva necessária para deflagrar um rompimento de equilíbrio da encosta.

No Brasil, este modelo começou a ser utilizado a partir do ano 2000 e vem apresentando resultados satisfatórios (RAMOS *et al.*, 2002; SBROGLIA *et al.*, 2017). Segundo alguns estudos, o modelo matemático SHALSTAB apresentou resultados mais realistas em relação a modelos probabilísticos utilizados para comparação (MICHEL, 2013).

### 2.3.1 Critério de Ruptura de Mohr-Coulomb

O modelo SHALSTAB é baseado no critério de ruptura para taludes infinitos. Em 1900, Mohr apresentou sua teoria para ruptura em materiais, onde afirma que um material se rompe devido à combinação entre as forças normal e de cisalhamento ( $\sigma, \tau$ ), e não em razão da máxima tensão normal ou de cisalhamento separadamente. A relação entre as tensões em um plano de ruptura se dá pela Equação 1 (DAS, 2011).

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

A envoltória de ruptura definida pela Equação 1 é uma linha curva, e circunscreve os círculos correspondentes à ruptura. Para simplificar sua aplicação, a função foi transformada em função linear, e chamada de critério de ruptura de Mohr-Coulomb (Equação 2) (DAS, 2011).

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad (2)$$

Onde:

$\tau$  = resistência ao cisalhamento na ruptura (kPa);

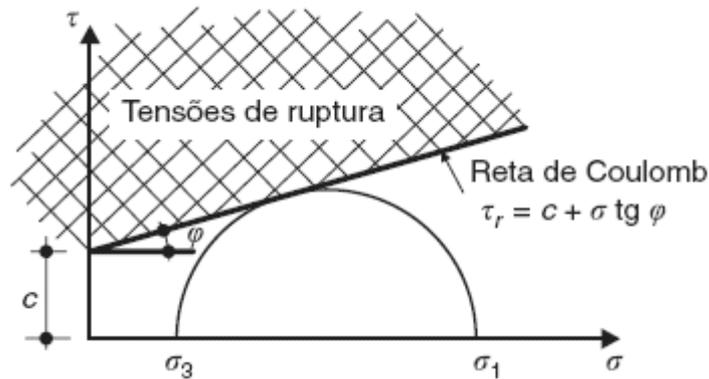
$c$  = intercepto de coesão (kPa);

$\sigma$  = tensão normal na ruptura (kPa);

$\phi$  = ângulo de atrito ( $^{\circ}$ ).

A Figura 4 representa o diagrama de critério de ruptura de Mohr-Coulomb, onde  $\sigma$  e  $\tau$  estão em um plano de coordenadas, a abscissa do centro do círculo é  $(\sigma_1 + \sigma_3)/2$  e o raio do círculo  $(\sigma_1 - \sigma_3)/2$ .

**Figura 4 - Diagrama do Critério de Ruptura de Mohr-Coulomb**



Fonte: Caputo e Caputo, 2015b.

“A resistência ao cisalhamento de uma massa de solo é a resistência interna por área unitária que essa massa pode oferecer para resistir a rupturas e deslizamentos ao longo de qualquer plano em seu interior” (DAS, 2011, p.331). É necessário compreender a resistência ao cisalhamento para que se possa avaliar os problemas de estabilidade do solo. Existem vários ensaios de laboratório disponíveis para determinar os parâmetros de resistência ao cisalhamento (intercepto de coesão e ângulo de atrito interno), sendo os mais utilizados o ensaio de cisalhamento direto e o ensaio triaxial (DAS, 2011).

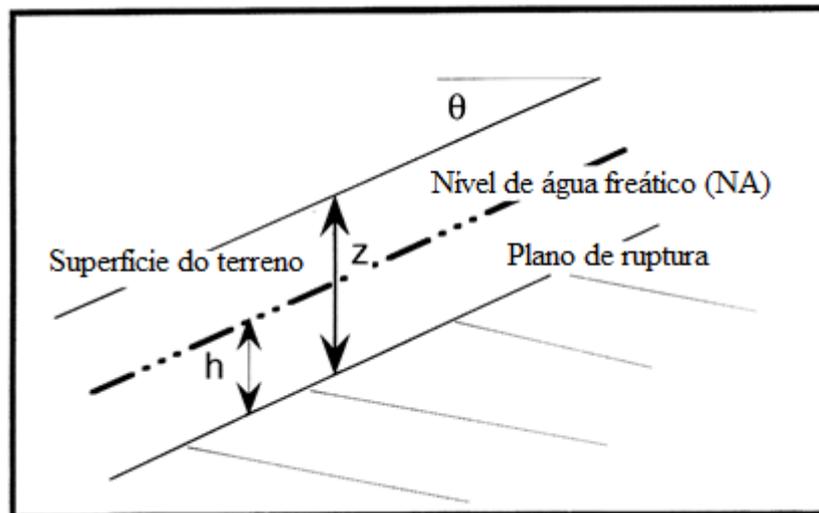
O equipamento utilizado para realização do ensaio de cisalhamento direto consiste em uma caixa metálica de cisalhamento, onde é colocado o corpo de prova, podendo ser quadrado ou circular. O equipamento promove o deslizamento das duas metades do corpo-de-prova entre si. Inicialmente aplica-se uma força  $\sigma$  constante (Tensão Normal ao corpo de prova) e após, uma força  $\tau$  crescente (Tensão Cisalhante), que move uma metade da caixa sobre a outra, provocando a ruptura. Mede-se a tensão cisalhante correspondente a cada deformação horizontal aplicada ao corpo-de-prova, obtendo a curva tensão-deformação. Deve-se repetir a ruptura em diversas amostras para obtenção de diferentes pares de tensões, que traçados no diagrama de Mohr, definirão os valores de ângulo de atrito ( $\phi$ ) e intercepto de coesão ( $c$ ) (DAS, 2011).

No ensaio do tipo triaxial, um corpo de prova cilíndrico é envolvido por uma membrana de borracha e inserido em uma câmara triaxial preenchida com água ou glicerina, onde se aplica uma pressão de confinamento por pressão ( $\sigma_c'$ ) do fluido no corpo de prova. Após, para provocar a ruptura por cisalhamento, deve-se aplicar uma tensão axial ( $\sigma_d'$ ) por meio de uma haste de carregamento vertical, carregamento este que pode ser através da aplicação de pesos ou pressão hidráulica até a ruptura (a deformação do corpo de prova é medida por extensômetro), ou por meio de uma prensa de carregamento mecânica ou hidráulica. Fixado a

haste de carregamento há um anel dinamométrico ou uma célula de carga, responsável por medir a carga axial correspondente a uma dada deformação axial do corpo de prova. Além disso, o equipamento que realiza o ensaio dispõe de conexões que medem drenagem interna ou externa, ou poropressão do corpo de prova (DAS, 2011), de acordo com as condições de drenagem que o ensaio é conduzido. A partir dos resultados do ensaio é possível traçar o círculo de Mohr correspondente ilustrado na Figura 4 ( $\sigma_3 = \sigma_c'$  e  $\sigma_1 = \sigma_c' + \sigma_d'$ ). É necessário repetir o ensaio em diversas amostras na faixa de tensões de interesse para obtenção de vários círculos de Mohr e então traçar a envoltória de ruptura de Mohr-Coulomb.

A Equação 2 pode ser reescrita, e baseada no modelo físico apresentado na Figura 5, pode ser resolvida para a relação  $h/z$ , que estabelece uma proporção da coluna de solo que se apresenta saturada no momento da ruptura (DIETRICH e MONTGOMERY, 1998) como mostra a Equação 3 (MICHEL, 2013).

**Figura 5 - Modelo Físico de Referência para Implementação do SHALSTAB**



Fonte: Adaptado de Dietrich e Montgomery, 1998.

$$\frac{h}{z} = \frac{\rho_s}{\rho_w} \left( 1 - \frac{\tan\theta}{\tan\phi} \right) + \frac{c'}{\cos^2\theta \tan\phi \rho_w g z} \quad (3)$$

Onde:

$h$  = coluna de solo saturada (m);

$z$  = espessura do solo (m);

$c'$  = intercepto de coesão efetiva do solo (N/m<sup>2</sup>);

$\rho_s$  = densidade do solo saturado (kg/m<sup>3</sup>);

$\rho_w$  = densidade da água (kg/m<sup>3</sup>);

$\theta$  = inclinação do talude (°);

$\phi$  = ângulo de atrito interno do solo (°);

$g$  = gravidade (m/s<sup>2</sup>).

Deste modo, através da Equação 3, é possível conhecer a altura da coluna d'água presente na camada de solo necessária para desestabilizar a encosta. É possível, também, definir duas condições extremas, sendo a primeira a condição em o que o solo está completamente seco ( $h/z=0$ ) e a segunda, onde o solo está completamente saturado ( $h/z=1$ ). Para a primeira condição existe um ângulo de inclinação do talude ( $\theta$ ) limite, acima do qual, mesmo que esteja completamente seco, não existe estabilidade (incondicionalmente instável). O ângulo limite é dado pela Equação 4. Em relação a segunda condição, pode-se estabelecer um ângulo de inclinação do talude ( $\theta$ ) limite, abaixo do qual, mesmo que o solo esteja completamente saturado, não há possibilidade de ruptura (incondicionalmente estável). A condição é descrita pela Equação 5 (MICHEL, 2013).

$$\tan\theta \geq \tan\phi + \left( \frac{c'}{\cos^2\theta\rho_s g z} \right) \quad (4)$$

$$\tan\theta < \tan\phi \left( 1 - \frac{\rho_w}{\rho_s} \right) + \left( \frac{c'}{\cos^2\theta\rho_s g z} \right) \quad (5)$$

### 2.3.2 Modelo Hidrológico de Estado Uniforme

Para situações em que uma encosta não apresente declividades tão acentuadas para ser incondicionalmente instável ou tão suaves para ser incondicionalmente estável, existirá uma coluna d'água capaz de ocasionar sua ruptura (MICHEL, 2013).

Para estes casos, o modelo SHALSTAB baseia-se em um modelo hidrológico de estado uniforme. Em 1986, O'Loughlin elaborou um modelo hidrológico que estabeleceu um padrão de equilíbrio de saturação do solo a partir da análise da declividade das encostas, da transmissividade do solo e da área de contribuição a montante. Este modelo considera que o fluxo infiltra-se até um ponto de baixa condutividade, geralmente, no contato solo-rocha, e assim, direciona-se conforme a topografia (GUIMARÃES *et al.*, 2003).

O modelo indica o nível de saturação do solo de acordo com a Equação 6. A Figura 6 ilustra o modelo hidrológico, onde é representada a área de contribuição a montante (a), o

comprimento de contorno da fronteira inferior (b) e a recarga de chuva (q). A transmissividade do solo é o produto entre a condutividade hidráulica e a espessura da camada (MICHEL, 2013).

$$W = \left(\frac{h}{z}\right) = \left(\frac{q}{t}\right) \frac{a}{b \sin \theta} \quad (6)$$

Onde,

W = nível de saturação;

q = recarga de chuva (precipitação em m/dia);

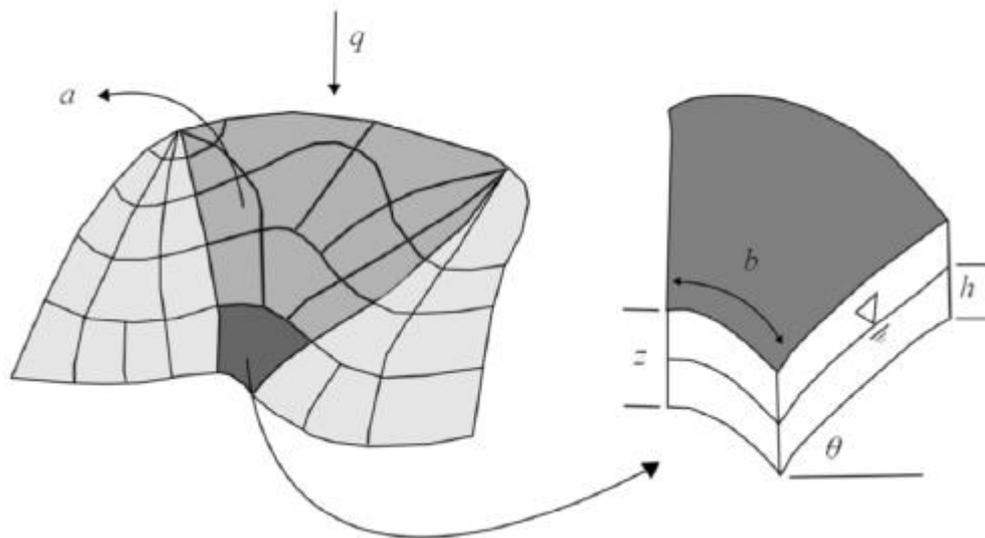
t = transmissividade do solo (m<sup>2</sup>/dia);

a = área de contribuição a montante (m<sup>2</sup>);

b = comprimento do contorno (m);

θ = inclinação do talude (°).

**Figura 6 - Representação do Modelo Hidrológico**



Fonte: Montgomery e Dietrich, 1994 apud Michel, 2013.

### 2.3.3 Equação de Estabilidade Hidrológica da Encosta

Ao combinar o modelo de estabilidade de taludes da Equação 3 ao modelo de O' Loughlin da Equação 6, obtêm-se a equação de estabilidade hidrológica da encosta (Equação 7) (PACHECO, 2018). A aplicação desses cálculos para cada célula dentro de um grid de um modelo digital de elevação, em SIG – Sistema de Informações Geográficas, permite classificar

a suscetibilidade da área a sofrer movimentos de massa (FERNANDES *et al.*, 2001 apud TABALIPA, 2019).

$$\log\left(\frac{q}{t}\right) = \frac{\text{sen}\theta}{\frac{a}{b}} \left[ \left( \frac{c'}{\rho_w g z \cos^2 \theta \tan(\phi)} \right) + \frac{\rho_s}{\rho_w} \left( 1 - \left( \frac{\tan\theta}{\tan\phi} \right) \right) \right] \quad (7)$$

Onde:

q = recarga de chuva (precipitação em m/dia);

t = transmissividade do solo (m<sup>2</sup>/dia);

θ = inclinação do talude (°);

a = área de contribuição a montante (m<sup>2</sup>);

b = comprimento do contorno (m);

c' = intercepto de coesão efetiva do solo (N/m<sup>2</sup>);

ρ<sub>s</sub> = densidade do solo saturado (kg/m<sup>3</sup>);

ρ<sub>w</sub> = densidade da água (kg/m<sup>3</sup>);

g = gravidade (m/s<sup>2</sup>);

z = espessura do solo (m);

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

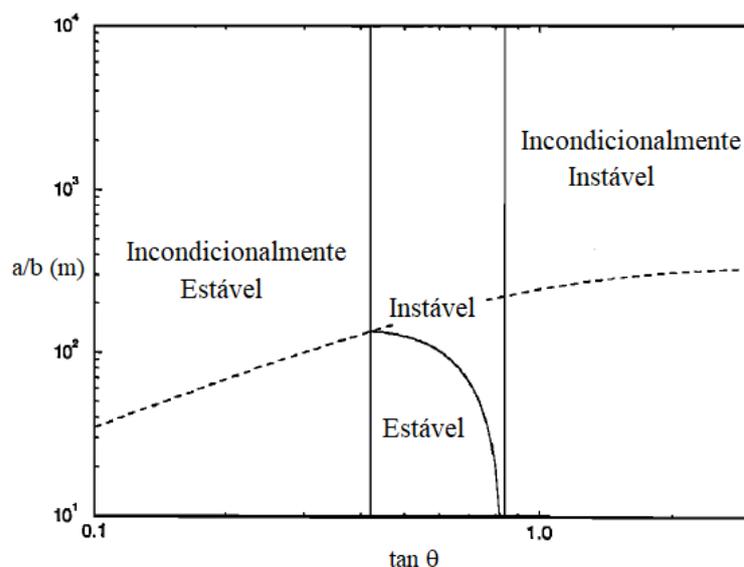
Foram definidas sete classes de estabilidade que se encontram na Tabela 1 (PACHECO, 2018). Observando-se o gráfico apresentado na Figura 7, elaborado por Montgomery e Dietrich (1994), a linha pontilhada representa a Equação 7, sendo o limite de saturação. A linha contínua é o limite entre os campos estável e instável. O gráfico é representado pelos eixos da razão a/b e da declividade (ilustrada para um ângulo de atrito interno do solo particular), assim, por exemplo, para um determinado log (q/t) e para determinada inclinação, um local com valor a/b acima da linha de saturação será saturado, e abaixo, insaturado (DIETRICH e MONTGOMERY, 1998).

**Tabela 1 - Classes de Estabilidade do Modelo de Dietrich e Montgomery (1998)**

CLASSE	INTERPRETAÇÃO
Incondicionalmente Estável	Incondicionalmente Estável Saturado
log q/t > -2,2	Incondicionalmente Estável Insaturado
-2,5 < log q/t ≤ -2,2	Estável Insaturado
-2,8 < log q/t ≤ -2,5	Instável Insaturado
-3,1 < log q/t ≤ -2,8	Instável Saturado
log q/t ≤ -3,1	Incondicionalmente Instável Saturado
Incondicionalmente Instável	Incondicionalmente Instável Insaturado

Fonte: Dietrich e Montgomery, 1998 apud Pacheco, 2018.

**Figura 7- Definição dos Campos de Estabilidade**



Fonte: Adaptado de Montgomery e Dietrich, 1994.

#### 2.4 Modelo SHALSTAB Modificado por Michel (2013)

A versão original do modelo SHALSTAB (DIETRICH e MONTGOMERY, 1998), foi desenvolvida para ser adicionada como extensão no software ArcView 3.2, software que era produzido pela ESRI (Environmental Systems Research Institute). Porém, com o passar dos anos a versão sofreu atualizações e portanto, não está mais disponível no mercado. O modelo SHALSTAB modificado proposto por Michel (2013) para identificar áreas suscetíveis a escorregamentos translacionais se tornou interessante para uso neste trabalho, pois foi desenvolvida uma ferramenta compatível com as versões mais recentes do software ArcGis.

A metodologia foi desenvolvida por Michel (2013) aplicando equações na calculadora *raster* do ArcGis, porém, para facilitar a execução do modelo, os autores Sbroglia *et al.* (2017) desenvolveram uma ferramenta que automatiza os cálculos do modelo, necessitando apenas a criação de um *Workspace* para o desenvolvimento dos cálculos, um Modelo Digital de Elevação (MDE) em formato *raster* e um polígono da área em estudo em formato *shapefile* contendo os valores dos parâmetros do solo, inseridos nos locais indicados da ferramenta *Automatic Shalstab Analysis (ASA)*.

O MDE representa a superfície real do terreno sem elementos que influenciam na reflectância do pixel (EGG, 2012), e para rodar o modelo SHALSTAB, ele deve estar inserido em uma bacia hidrográfica.

Para o modelo modificado, Michel (2013) reescreveu os algoritmos utilizados, inserindo parâmetros de coesão das raízes e sobrecarga devida à vegetação. Desta maneira, a classificação da estabilidade onde não são observadas classes extremas é obtida através da Equação 8.

$$\log\left(\frac{q}{t}\right) = \frac{\text{sen}\theta}{\frac{a}{b}} \left[ \left( \frac{c' + cr}{\rho_w g z \cos^2 \theta \tan(\emptyset)} \right) + \left( \frac{\rho_s}{\rho_w} + \frac{S_w}{\rho_w g z \cos \theta} \right) \left( 1 - \left( \frac{\tan \theta}{\tan \emptyset} \right) \right) \right] \quad (8)$$

Onde,

$q$  = recarga de chuva (precipitação em m/dia);

$t$  = transmissividade do solo (m<sup>2</sup>/dia);

$\theta$  = inclinação (°);

$a$  = área de contribuição a montante (m<sup>2</sup>);

$b$  = comprimento do contorno (m);

$c'$  = intercepto de coesão efetiva do solo (N/m<sup>2</sup>);

$cr$  = coesão das raízes (N/m<sup>2</sup>);

$\rho_s$  = densidade do solo saturado (kg/m<sup>3</sup>);

$\rho_w$  = densidade da água (kg/m<sup>3</sup>);

$g$  = gravidade (m/s<sup>2</sup>);

$z$  = espessura do solo (m);

$\emptyset$  = ângulo de atrito interno do solo (°);

$S_w$  = Sobrecarga devida a vegetação (N/m<sup>2</sup>).

Para as classes extremas Incondicionalmente Instável e Incondicionalmente Estável, têm-se a Equação 9 e a Equação 10, respectivamente.

$$\tan \theta \geq \tan \emptyset + \left( \frac{c' + cr}{\cos^2 \theta \rho_s g z \left( 1 + \frac{S_w}{\rho_s g z \cos \theta} \right)} \right) \quad (9)$$

$$\tan \theta < \left( 1 - \frac{1}{\frac{S_w}{\rho_w g z \cos \theta} + \frac{\rho_s}{\rho_w}} \right) \tan \emptyset + \left( \frac{c' + cr}{\cos^2 \theta \rho_s g z \left( 1 + \frac{S_w}{\rho_s g z \cos \theta} \right)} \right) \quad (10)$$

Além da inserção de novos parâmetros para análise da estabilidade, referentes a presença de vegetação, com este modelo é possível usar diversos valores para cada parâmetro de entrada, distribuídos conforme ocorrem na área de estudo. Caso não se possua informações

especialmente distribuídas, pode-se usar um valor constante conhecido, da mesma forma, caso não seja considerado algum parâmetro relacionado a vegetação, deve-se usar valor zero para estes parâmetros (MICHEL, 2013).

## **2.5 A Problemática dos Movimentos de Massa em Santa Cruz do Sul**

A cidade de Santa Cruz do Sul apresenta problemas de instabilidade de encostas conforme indicam diversos estudos realizados por geólogos e engenheiros. Todos estudos são importantes, pois fornecem informações para dar continuidade a investigações geotécnicas referentes a este tema. Para contextualizar a problemática dos movimentos de massa neste trabalho, segue uma breve descrição sobre alguns dos trabalhos já realizados, sendo eles de Grehs (1976), Wenzel (1996), Eisenberger (2003), Alves (2004) e Noronha, Mizusaki e Bressani (2012).

O geólogo Sandor Grehs, em 1976, realizou um mapeamento geológico onde delimitou zonas nas quais observou escorregamentos de terra e seus indícios. Grehs (1976) analisou a estrutura das rochas e sua caracterização geotécnica a partir da identificação das Formações Santa Maria, Botucatu, Serra Geral, Diques de Diabásio e depósitos atuais. As áreas em que observou deslizamentos ou seus indícios coincidem com a área do Cinturão Verde e com uma porção na região sudoeste da cidade (WENZEL, 2013). Com esse estudo, a cidade foi uma das primeiras do país a contar com um estudo geológico-geotécnico com propósito de aplicação ao planejamento urbano (NORONHA, MIZUSAKI e BRESSANI, 2012).

O também geólogo Wenzel, em 1996, contribuiu com outro mapeamento geológico estrutural do município, onde identificou zonas frágeis como os depósitos provenientes das rochas basálticas, alertando para atenção especial à construções nestas áreas, devido as condições de estabilidade. Esse estudo somado ao estudo de Grehs (1976), contribuíram para delimitação de áreas de risco pelo Plano Diretor do município (SANTA CRUZ DO SUL (RS), 2019).

Eisenberger (2003) realizou um estudo do comportamento de um talude coluvionar na zona urbana do município, devido às patologias apresentadas em moradias próximas a área de estudo. Através de sua investigação, ele relacionou os deslocamentos ocorridos na encosta com picos no nível piezométrico, que ocorriam devido as precipitações excederem um certo limite. A mesma encosta foi estudada anteriormente por Pinheiro *et al.* (2002) e, posteriormente por Pinheiro, Nummer e Bressani (2012), onde foi realizada uma investigação geotécnica e constatadas evidências de instabilidade.

Outro trabalho em destaque é de Alves (2004), que avaliou a susceptibilidade a movimentos de massa e inundações também na zona urbana, por meio do uso de Sistemas de Informações Geográficas (SIG). Através de seu trabalho foram constatados graus moderados à elevados de risco de movimentos de massa concentrados na região do Cinturão Verde e suas proximidades, além de outras porções a sudeste e sudoeste da cidade.

Mais um trabalho importante para a cidade é o mapeamento geotécnico realizado por Noronha, Mizusaki e Bressani (2012), que foi definido com base em parâmetros geológicos e geomorfológicos da cidade. Através do mapeamento realizado pelos autores é possível identificar as tipologias mais suscetíveis a movimentos de massa, pois cada unidade é descrita por suas características de solo e formas de relevo. As tipologias mais suscetíveis são aquelas formadas por argilominerais expansivos, que na presença de água se tornam instáveis, e também aquelas de alto gradiente de declividade, o que favorece a dinâmica de transporte de materiais.

Os tipos de movimentos relatados no trabalho de Noronha, Mizusaki e Bressani (2012) são principalmente os de rastejo e escorregamentos. Os autores elaboraram um Mapa de Unidades Geotécnicas, que retrata as características do meio físico, os comportamentos frente às diferentes formas de uso do solo, processos naturais e induzidos. O Mapa de Unidades Geotécnicas encontra-se no Anexo A, e possibilitou a delimitação de uma área de estudo mais crítica para o presente trabalho. O método utilizado pelos autores foi a sobreposição de mapas geológicos e mapas geomorfológicos, os quais também foram por eles detalhados.

Ao observar a localização das unidades geotécnicas que apresentam as tipologias citadas acima, elas coincidem com as áreas de risco encontradas pelos autores já citados, concentrando-se na região do Cinturão Verde, e em áreas nas porções sudeste e sudoeste do município.

### **2.5.1 Breve Registro de Ocorrências de Movimentos de Massa em Santa Cruz do Sul**

A seguir constam alguns exemplos de situações de movimentos de massa ocorridas na zona urbana do Município de Santa Cruz do Sul, organizadas em ordem cronológica. A localização dos movimentos ocorre em bairros próximos às áreas descritas como sensíveis à movimentos, além de ocorrerem inseridas nessas áreas.

Pelas imagens é possível observar diferentes tipos de movimentos, desde corridas de terra, onde ocorre o transporte de materiais mais fofos até quedas de blocos, onde ocorre o deslocamento de fragmentos de rocha maciça. Dessa forma, é possível perceber que ocorrem diferentes tipologias geológicas, diferentes graus de intemperização, além de outras

propriedades, o que torna os estudos acerca do tema complexos, e a maioria das metodologias não abrange todo tipo de ocorrências.

A Figura 8 e a Figura 9 correspondem a imagens de 2002 e apresentam movimentos ocorridos há algum tempo nas proximidades da Rua Dr. Álvaro Correa da Silva, no Bairro Santo Inácio. A Figura 10, Figura 11 e Figura 12 apresentam movimentos ocorridos no bairro Belvedere em abril de 2011 e agosto e setembro de 2013, respectivamente. A Figura 13 apresenta um movimento de terra ocorrido no Bairro Margarida em julho de 2019.

**Figura 8 - Ruptura Rotacional no Bairro Santo Inácio - SCS**



Fonte: Eisenberger, 2003.

**Figura 9 - Deslizamento do Tipo Corrida no Bairro Santo Inácio - SCS**



Fonte: Eisenberger, 2003.

**Figura 10 - Deslizamento no Bairro Belvedere - SCS**



Fonte: Santa Cruz do Sul, 2011.

**Figura 11 - Queda de Bloco no Bairro Belvedere - SCS**



Fonte: Santa Cruz do Sul, 2013a.

**Figura 12 - Movimento de Terra no Bairro Belvedere - SCS**



Fonte: Adaptado de Santa Cruz do Sul, 2013b.

**Figura 13 - Deslizamento de Encosta no Bairro Margarida - SCS**



Fonte: Leandro Porto (2019, [http://www.gaz.com.br/conteudos/regional/2019/07/25/150593-vIdeo\\_familias\\_ficam\\_desabrigadas\\_apos\\_deslizamento\\_de\\_encosta.html.php](http://www.gaz.com.br/conteudos/regional/2019/07/25/150593-vIdeo_familias_ficam_desabrigadas_apos_deslizamento_de_encosta.html.php)) (autoria da foto: Defesa Civil).

## **2.5.2 Zoneamento de Índices de Uso no Município**

O município de Santa Cruz do Sul conta com estudos geológicos que auxiliaram na elaboração do Mapa IV – ZOC5, contendo as áreas identificadas como Áreas Ditas de Suscetibilidade e Risco a Movimento de Massa na Área Urbana do Município. Os estudos que auxiliaram na demarcação destas áreas são principalmente de Grehs (1976) e Wenzel (1996), de acordo com o Art. 47 da Lei Complementar nº 741, de 12 de Abril de 2019, que rege o Plano Diretor do município (SANTA CRUZ DO SUL (RS), 2019).

De acordo com o referido artigo, serão permitidas edificações nas áreas delimitadas no Mapa IV – ZOC5 como áreas ditas de suscetibilidade e risco a movimento de massa, que (SANTA CRUZ DO SUL (RS), 2019):

- a) em caso de loteamentos e condomínios de lotes, a área total a ser parcelada, deve possuir laudo geológico e estudo hidrológico, sondagem geotécnica e Anotação de Responsabilidade Técnica de profissional devidamente habilitado;
- b) em caso de edificação, deve possuir projeto de fundações e sondagem geotécnica com as devidas ARTs de profissional habilitado, podendo, à critério da Secretaria Municipal de Planejamento, Orçamento e Gestão, a sondagem ser referente ao lote específico ou área total do loteamento.

O referido artigo determina, ainda, em seus três parágrafos que (SANTA CRUZ DO SUL (RS), 2019, p. 16):

§ 1º A apresentação de sondagem geotécnica poderá ser dispensada a pedido dos autores dos projetos de fundação, devidamente fundamentado;

§ 2º A apresentação de sondagem geotécnica e estudo hidrológico poderão ser dispensados nos casos em que integrarem a documentação do processo de licenciamento do loteamento que deu origem ao lote da construção;

§ 3º Todas as solicitações de aprovação e licença de construção nas áreas de que trata o *caput* deste artigo serão objeto de avaliação por parte de profissional da Geotecnia devidamente habilitado, integrante do Órgão Ambiental Municipal, com o objetivo de verificar a viabilidade da proposta de ocupação para o local, bem como a necessidade de complementação na documentação apresentada.

De acordo com a NBR 6122 (ABNT, 2019), para toda edificação deve ser realizada uma campanha de investigação geotécnica preliminar, executando, no mínimo, sondagens a percussão, através do ensaio *Standard Penetration Test* (SPT). A NBR 6484 (ABNT, 2020) prescreve o método de execução de sondagens com SPT. O ensaio tem a finalidade de realizar um reconhecimento do solo, determinando o tipo e suas respectivas profundidades de ocorrência, a posição do nível d'água e os índices de resistência à penetração ( $N_{SPT}$ ) a cada metro.

Dessa forma, a sondagem por si só não identifica indícios de instabilidade em taludes, ela apenas fornece as informações necessárias para dimensionar corretamente um elemento de fundação. Em áreas consideradas instáveis, é necessário verificar também a existência de esforços horizontais, pois, se o projeto contemplar apenas as cargas verticais que atuarão na fundação, haverá a manifestação de problemas na edificação. Este fato justifica os parágrafos do referido artigo, que permitem a dispensa da sondagem, se devidamente fundamentada, além de permitir a solicitação de documentos complementares por parte do órgão avaliador.

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 Localização e Definição da Área de Estudo

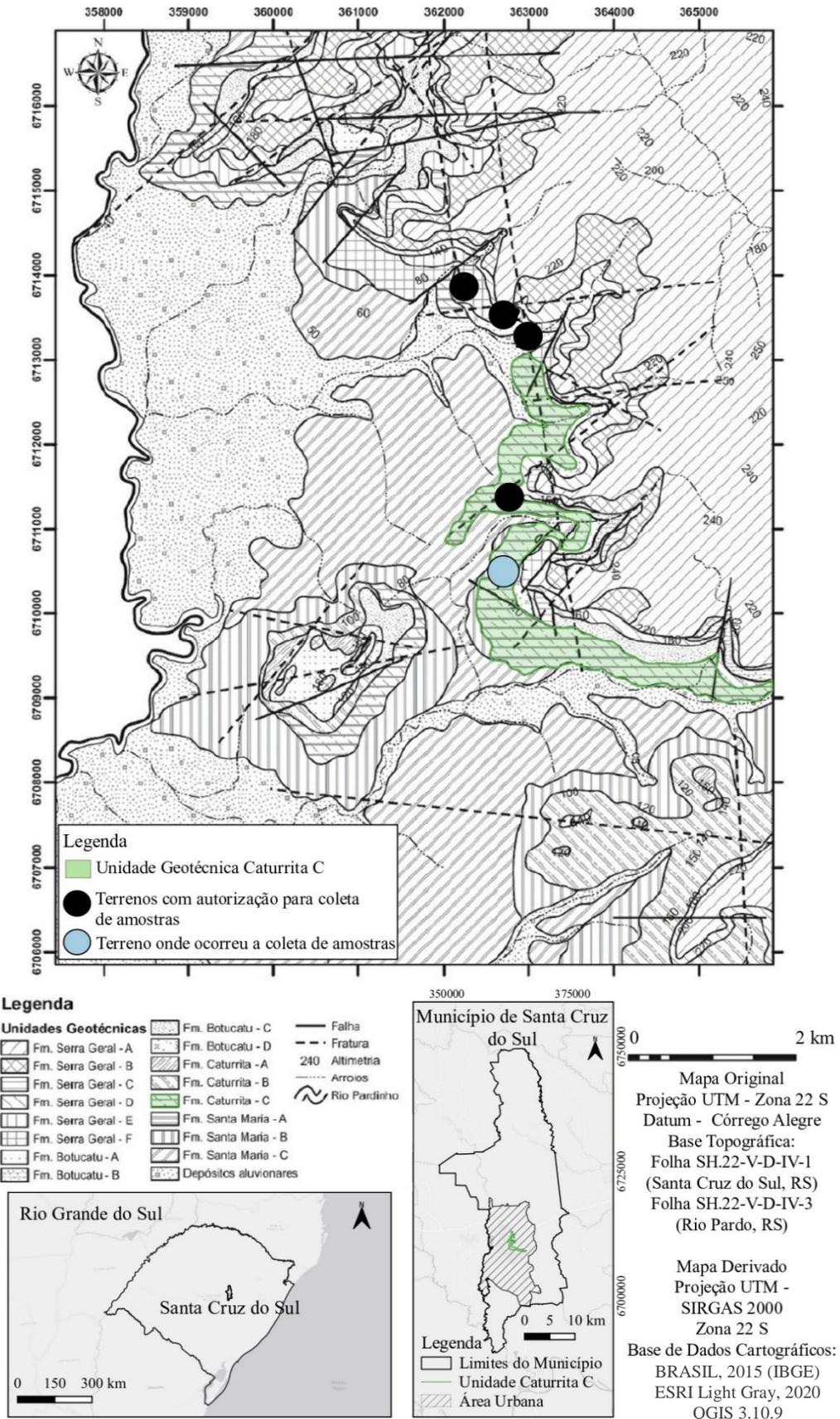
O município de Santa Cruz do Sul localiza-se na região central do estado do Rio Grande do Sul, no Vale do Rio Pardo. Os principais acessos são através da RSC 287 e BR471 e suas coordenadas geográficas são 29°43'59" de Latitude Sul e 52°24'52" de Longitude Oeste (SANTA CRUZ DO SUL, 2017). Possui população estimada de 131.365 pessoas (BRASIL, 2020).

A partir dos estudos já existentes, os quais apontam a região do cinturão verde e arredores como a mais crítica no contexto de movimentações de terra, buscou-se a autorização junto a Prefeitura e a proprietários de terrenos que estivessem situados próximos ou inseridos nesta zona, para concretizar a coleta de amostras para caracterização do solo e obtenção dos parâmetros requeridos pelo modelo SHALSTAB. No Apêndice A são apresentadas as localizações de cinco terrenos com possibilidade de coleta de amostras de solo, a partir da autorização dos seus proprietários.

A partir dos pontos propícios para coleta e da análise das características geotécnicas da cidade, selecionou-se uma área de estudo delimitada por uma mesma classificação geotécnica, permitindo assim, de maneira simplificada, a admissão como hipótese que os parâmetros geotécnicos fossem considerados os mesmos para toda área. Para isso, foi utilizado o Mapa de Unidades Geotécnicas elaborado por Noronha, Mizusaki e Bressani (2012), comentado no item 2.5 e apresentado no Anexo A.

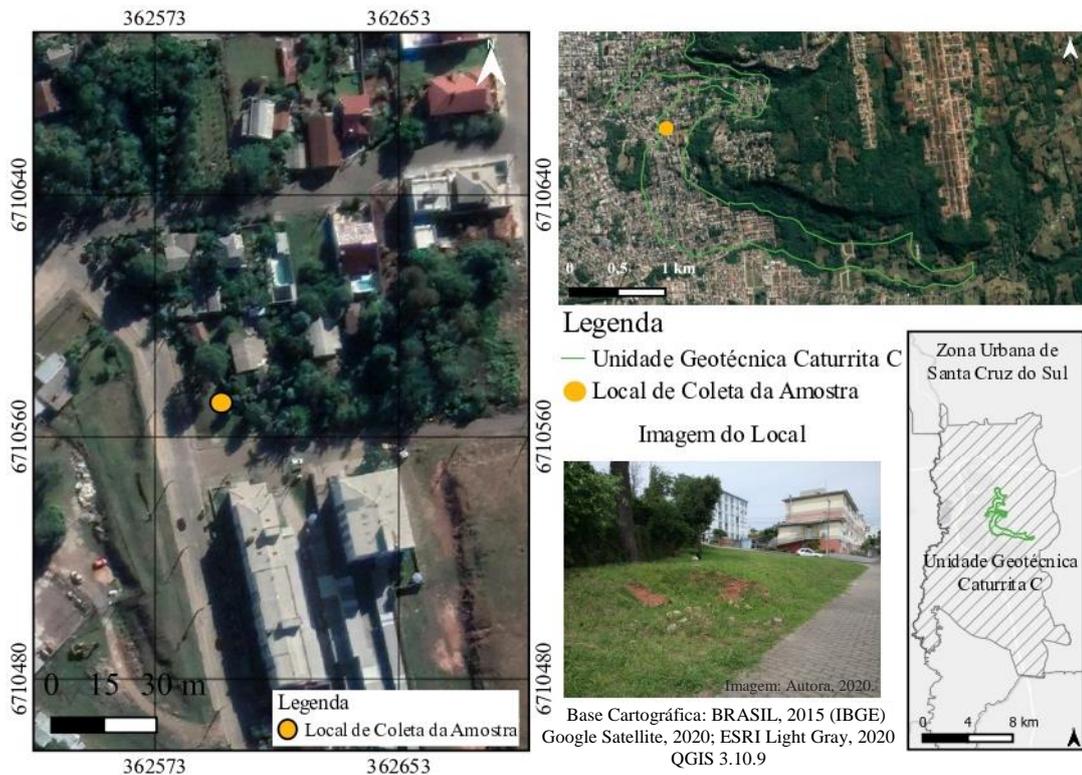
A Figura 14 apresenta a compartimentação das Unidades Geotécnicas e a geoespacialização dos terrenos disponíveis para coleta de amostras, onde pode-se observar sobre quais unidades os mesmos recaem e, a partir das descrições das unidades realizada por Noronha, Mizusaki e Bressani (2012), optou-se por estudar aquela como suscetível a movimentos de massa e que apresentasse mais dados e informações disponíveis. Dessa forma, a unidade escolhida para o presente estudo foi aquela em destaque na Figura 14, a qual pertence à Unidade Caturrita C, sendo coletadas amostras de solo no ponto destacado em azul, que está detalhado na Figura 15.

Figura 14 - Localização da Área de Estudo



Fonte: Elaborado pela autora, adaptado de Noronha, Mizusaki e Bressani, 2012.

**Figura 15 - Localização do Terreno de Coleta das Amostras**



Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

## 3.2 Descrição da Área de Estudo

### 3.2.1 Geologia, Geomorfologia e Classificação Geotécnica

Quanto à geologia, a área de estudo pertence à Formação Caturrita. Essa formação aflora como uma sequência composta por camadas tabulares de siltitos e arenitos, além de lamitos, sendo estes últimos extremamente plásticos quando úmidos. Essas camadas podem condicionar fortemente a estabilidade de taludes em razão de sua baixa resistência ao cisalhamento e baixa permeabilidade (NORONHA, MIZUSAKI e BRESSANI, 2012).

Além disso, a unidade descrita pode encontrar-se recoberta de sedimentos transportados, constituindo os colúvios originados das cotas mais altas (intemperismo das rochas basálticas situadas na unidade Serra Geral). Geralmente são compostos por materiais areno-siltosos ou argilo-siltosos, de coloração marrom (NORONHA, MIZUSAKI e BRESSANI, 2012).

Tais depósitos são alvo do presente estudo, pois o modelo de encostas infinitas considera uma possível superfície de ruptura, sendo que a profundidade dessa superfície é relativamente pequena comparada ao comprimento da encosta. Essa superfície de ruptura se forma em locais

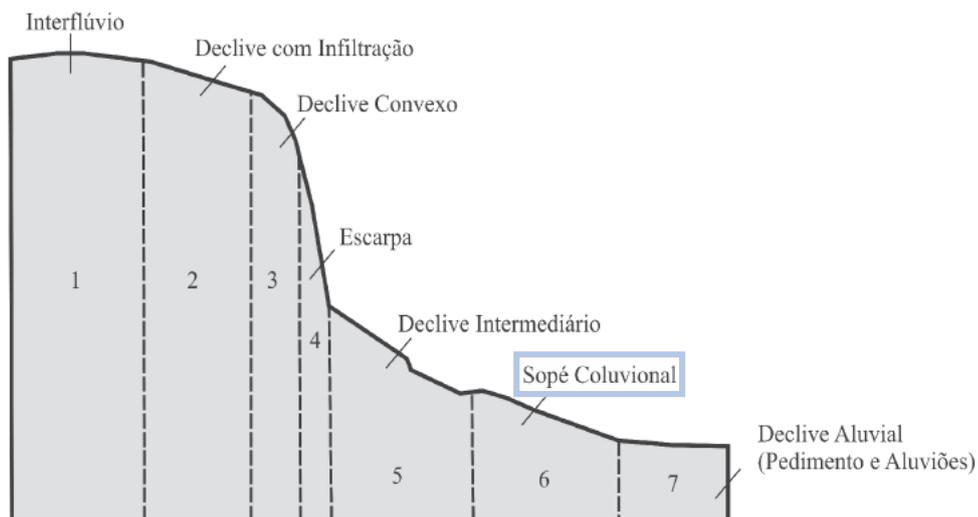
de contraste de diferentes camadas de solos, ou entre o contato solo-rocha. Portanto, a camada de colúvio, que recobre o solo residual da Formação Caturrita, contrasta com o material residual e suas características mecânicas.

Segundo Wenzel (1996), esse material é suscetível a escorregamentos, sendo considerado como merecedor de cuidados especiais quando de sua ocupação por construções, pois apresenta evidências de instabilidade. Os colúvios movimentados também podem soterrar drenagens existentes ou obstruir nascentes de água, aprisionando água dentro de sua massa e, assim, essas massas sofrem movimentos lentos de rastejo, que são intensificados em períodos de precipitação elevada (PINHEIRO, 2000).

Em relação as características geomorfológicas, que são resultado de diferentes processos de intemperismo, formação e movimento dos solos (NORONHA, MIZUSAKI e BRESSANI, 2012) a área de estudo é formada pelo sopé coluvional, apresentando declividades mais suaves, como ilustrado pela compartimentação em destaque na Figura 16.

Combinando as características geomorfológicas e geológicas, a área de estudo é definida como Unidade Geotécnica Caturrita C. Essa unidade representa uma região com suscetibilidade a movimentos de massa, sendo esperado principalmente o rastejo, devido as declividades mais suaves (NORONHA, MIZUSAKI e BRESSANI, 2012). Porém, segundo Eisenberger (2003), o rastejo pode evoluir para escorregamentos translacionais do tipo talude infinito quando ocorrem precipitações elevadas.

**Figura 16 - Perfil Geomorfológico**



Fonte: Adaptado de Noronha, Mizusaki e Bressani, 2012.

### 3.2.2 Vegetação

Segundo alguns autores, a vegetação pode ser uma aliada no equilíbrio de taludes e, para outros, pode ser um agente causador de movimentos de massa.

A região que possui boa cobertura vegetal dentro da zona urbana do município é definida pelo Cinturão Verde. Segundo Wenzel (2013), a porção de vegetação a leste da cidade oferecia-se como um limitador ao crescimento urbano, porém, recentemente houve significativa expansão urbana em direção ao Cinturão Verde, o que levou a novas construções, realização de cortes e escavações e a retirada da cobertura vegetal, que são alguns dos fatores que influenciam na estabilidade das encostas, como já mencionado.

Dentro da área de estudo existem pequenas áreas com cobertura vegetal, sendo a maior parte urbanizada.

### 3.2.3 Clima

A cidade localiza-se em uma região de transição entre o Planalto Meridional e a Depressão Central, e, segundo Moreno (1961), o clima é subtropical com verões quentes e úmidos (Cfa).

Em relação às precipitações, é típico as chuvas serem bem distribuídas ao longo do ano. Nos meses mais frios, as chuvas são mais prolongadas e de intensidade média a fraca. Já em meses mais quentes, as chuvas são de curta duração e grande intensidade (MORENO, 1961). Na Tabela 2 são apresentadas as normais climáticas provisórias da cidade, com dados compreendidos entre 2004 e 2019. Nota-se que as precipitações (P) ao longo do ano são bem distribuídas, havendo maiores precipitações durante o mês de outubro.

Conforme Guidicini e Nieble (1984), as oscilações diárias ou sazonais provocam variações volumétricas que podem conduzir a destaque de blocos. Além disso, a variação diurna de temperatura é considerada como uma das causas principais de processos de rastejo. A partir da Tabela 2, nota-se grande variação de temperatura num mesmo mês, como o mês de novembro, apresentado uma diferença de 11,2°C, além das variações sazonais, com invernos muito frios e verões muito quentes. Essa amplitude acaba por contribuir no processo de intemperismo de maciços.

**Tabela 2 - Dados Climatológicos de Santa Cruz do Sul**

Normais climáticas provisórias de Santa Cruz do Sul (2004-2019)				
Mês	T <sub>med</sub>	T <sub>max</sub>	T <sub>min</sub>	P
Janeiro	25,5	31,2	20,7	151,4
Fevereiro	25,1	30,7	20,4	119,6
Março	23,3	28,7	18,7	126,1
Abril	20,7	26,2	16,2	123,1
Mai	16,9	21,6	12,7	122,7
Junho	14,9	19,9	10,6	115,5
Julho	14,4	19,5	9,9	158,4
Agosto	16,1	21,7	11,2	117,7
Setembro	17,6	22,7	13,2	182,6
Outubro	20,1	25,2	15,3	200,7
Novembro	22,2	28	16,8	152,4
Dezembro	24,5	30,3	19,3	130,6
Ano	20,1	25,5	15,4	1.709,20

Fonte: Hoppe, 2020.

### 3.3 Levantamento de Dados Disponíveis sobre a Área de Estudo

O levantamento de dados disponíveis sobre a área de estudo é um ponto importante, pois a partir da interpretação desses dados obtêm-se informações necessárias para dar sequência ao trabalho. Para o presente trabalho foram cedidos arquivos de sondagens SPT pela empresa Estacas Brasil, de Santa Cruz do Sul, que foram fundamentais para caracterizar criteriosamente a área alvo do presente estudo. Além das sondagens, o setor de Geoprocessamento da Prefeitura Municipal de Santa Cruz do Sul disponibilizou arquivos vetoriais do tipo *shapefile* contendo as curvas de níveis da zona urbana do município em intervalos de 0,5 m para auxiliar na elaboração do presente trabalho.

### 3.4 Processamento e Interpretação dos Dados

#### 3.4.1 Ambiente SIG

O sistema de informações geográficas (SIG) é um sistema formado por um conjunto de informações computacionais, integrando dados, com a finalidade de analisar, manipular e gerar dados georreferenciados. São tecnologias de auxílio significativo para ações de planejamento, gestão, manejo e outros aspectos relacionado à estrutura do espaço geográfico (FITZ, 2008).

Para o presente estudo as ferramentas utilizadas foram QGis 3.10.9 versão livre e ArcGis Pro licença *Free 21-Day Trial*. O Qgis é uma ferramenta livre produzida pela QGIS *Development Team* e foi utilizada para auxiliar na elaboração de mapas e na organização dos

dados. O Arcgis Pro é produzido pela *Environmetal Systems Research Institute* (ESRI) e é a ferramenta compatível para rodar o plugin *ASA Shalstab*. Além disso, foi utilizada para gerar mapas complementares ao modelo. Ambas as ferramentas armazenam os dados espaciais nos mesmos formatos, podendo ser do tipo vetoriais – pontos, linhas e polígonos, e do tipo *raster*, - *pixels*/células, que representam propriedades específicas, como por exemplo, elevações, tonalidades de paisagem, etc para distinguir e classificar o espaço.

### **3.4.2 Criação de MDE e Delimitação da Bacia Hidrográfica a partir das Curvas de Nível**

Os arquivos contendo as curvas de nível foram manipulados em ambiente SIG para obter-se o contorno das bacias hidrográficas e um Modelo Digital de Elevação (MDE). Esses dados são necessários para rodar o modelo SHALSTAB, pois fornecem os dados de declividade e área de contribuição da bacia hidrográfica. A delimitação de uma bacia hidrográfica foi necessária pois não haviam arquivos digitais contendo essas informações, sendo empregada a metodologia que utiliza a ferramenta *Spatial Analyst – Hydrology* disponível no ArcGis Pro.

A metodologia utilizada para gerar um MDE consiste na triangulação dos dados das curvas de nível utilizando a ferramenta *3D Analyst – create TIN*. Como os passos para criação de MDE e Bacia Hidrográfica estão interligados, o procedimento está descrito no Apêndice B.

### **3.4.3 Geração de Perfil Estratigráfico Típico da Unidade Geotécnica a partir das Sondagens**

A partir dos laudos de sondagens disponibilizados, foi realizada a geoespacialização dos furos sobre o Mapa de Unidades Geotécnicas, conforme o Apêndice C. Foram localizados 11 boletins de sondagem inseridos na área de estudo. Além da geoespacialização das sondagens, foi realizada a interpretação das mesmas para definir um perfil estratigráfico típico para a unidade em estudo, a partir do qual foi possível estimar uma espessura para a camada de solo além de orientar a profundidade na qual foi realizada a coleta de amostras para os ensaios de laboratório.

As sondagens que recaem sobre a Unidade Caturrita C foram analisadas, sendo que as que continham mais de um furo no mesmo terreno, foram esquematizadas considerando uma variação nas espessuras, valores de  $N_{spt}$  e nível d'água, conforme o Apêndice D. A descrição da cor, granulometria e resistência nos boletins permitiu diferenciar solo residual de solo coluvionar presente nos perfis.

O critério utilizado para definir um perfil típico foi a estatística, que, segundo Triola (2017), consiste em preparação, análise e conclusão dos dados. A preparação envolve a consideração de dados, seguida da análise dos mesmos através de exploração e cálculos, chegando a resultados e conclusões.

Os dados coletados para definir um perfil estratigráfico típico da Unidade Caturrita C foram as sondagens. Elas constituíram uma amostra da unidade geotécnica, sendo que a partir dela pode-se chegar a uma conclusão representativa sobre a unidade. O método da inferência estatística envolve o uso de dados amostrais para serem feitas generalizações, e assim estimar valores de parâmetros sobre o que se está a estudar (TRIOLA, 2017).

Das camadas de colúvio foram calculadas as médias dos valores de  $N_{spt}$ , espessuras e profundidades do nível da água. Uma medida de centro é um valor no meio de um conjunto de dados, e uma das maneiras de se determinar o centro é através da média aritmética, encontrada pela adição dos valores e divisão do total pelo número de valores (TRIOLA, 2017), conforme a Equação 11.

$$m\acute{e}dia = \frac{\sum x}{n} \quad (11)$$

Segundo Triola (2017), uma desvantagem da média é que um valor extremo (atípico) pode afetá-la consideravelmente. Para isso, os estatísticos desenvolveram o intervalo de confiança, que consiste em uma faixa de valores usada para se estimar o verdadeiro valor de um parâmetro. O nível de confiança é a probabilidade de que o intervalo de confiança realmente contenha o parâmetro populacional, ele determina a taxa de sucesso do procedimento usado para construção do intervalo de confiança (TRIOLA, 2017). Para este trabalho o nível de confiança usado foi de 95%, sendo o intervalo calculado a partir das Equações 12 e 13. A parcela dentro do parênteses nas duas equações seguintes também é conhecida como erro padrão.

$$limite inferior = \bar{x} - 1,96 \left( \frac{\delta}{\sqrt{n}} \right) \quad (12)$$

$$limite superior = \bar{x} + 1,96 \left( \frac{\delta}{\sqrt{n}} \right) \quad (13)$$

Onde:

$\bar{x}$  = média aritmética

$\delta$  = desvio padrão

n = número de valores

O desvio-padrão é uma medida de quanto os valores de dados se afastam da média, ele é utilizado no cálculo do intervalo de confiança. Pode ser obtido a partir da Equação 14.

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum(x-\bar{x})^2}{n-1}} \quad (14)$$

Onde:

$\bar{x}$  = média aritmética

$x$  = cada valor amostral

n = número de valores

Após a realização destas etapas, foi definido um perfil estratigráfico típico de ocorrência nesta unidade.

### 3.5 Coleta de Amostras de Campo

Para aplicação do modelo, foram necessários alguns parâmetros do solo, os quais foram obtidos através da coleta de amostras em campo e posteriores ensaios de laboratório. A profundidade de extração da amostra foi definida a partir da análise do perfil típico obtido da interpretação das sondagens, apresentando camada média de colúvio de 1,97 m de espessura. As sondagens mais próximas ao local (sondagens 5 e 6), localizadas em terrenos adjacentes ao terreno da coleta, apresentavam uma espessura da camada de colúvio de 0,50 a 1,90 m.

Segundo a NBR 9604 (ABNT, 2016a), a amostra indeformada deve ser extraída com o mínimo de perturbação, objetivando manter sua estrutura e características naturais. Para isso, foi realizada uma escavação com picareta e pá, para a retirada de um bloco 0,30 m de aresta, a uma profundidade de 0,70 m na base da amostra, e 0,40 m no topo (Figura 17). Após, a superfície do bloco foi marcada, as faces expostas foram envolvidas com talagarça e foi aplicada uma camada de parafina líquida. A base do bloco foi seccionada, tombando-o cuidadosamente e regularizando-a. Após estes procedimentos, o bloco foi transportado ao laboratório. O bloco

de 0,30 m de aresta abrangeu aproximadamente 7 cm da camada superficial mais orgânica, que foi descartado para não comprometer os resultados dos ensaios. O objetivo da coleta de bloco indeformado é a extração de corpos de prova para realização de ensaio de cisalhamento direto.

A amostra deformada, de aproximadamente 30 kg, foi extraída do material escavado para o bloco, acondicionada em saco plástico resistente, identificada e transportada ao laboratório, sendo disposta em bandejas para secagem ao ar para ser utilizada nos ensaios de caracterização do solo.

**Figura 17 - Amostra Indeformada**



Fonte: Autora, 2020.

### **3.6 Ensaios de Laboratório**

A partir da coleta de amostras em campo, foram realizados ensaios de caracterização do solo no Laboratório de Solos da Universidade de Santa Cruz do Sul – UNISC (granulometria, limite de liquidez e limite de plasticidade). Para obtenção dos parâmetros de coesão, ângulo de atrito e densidade do solo, foi realizado o ensaio de cisalhamento direto no Laboratório de Solos da Universidade do Vale do Taquari – UNIVATES.

#### **3.6.1 Ensaio de Análise Granulométrica**

O presente ensaio é normatizado pela NBR 7181 (ABNT, 2016b), utilizado para obter uma curva granulométrica para determinar as dimensões das partículas e as proporções correspondentes de cada fração granulométrica. Existem etapas distintas, conforme a dimensão das partículas. Para partículas maiores que 0,075 mm, a separação é feita por peneiramento e,

para as partículas menores é realizada a sedimentação em água destilada. Para esse ensaio realizou-se o destorroamento da amostra deformada, seguido da homogeneização, quarteamto e o material foi passado na peneira de 2mm, sendo o material retido lavado e transferido para uma cápsula para o processo de secagem em estufa até a constância da massa. Procedeu-se o peneiramento do material seco nas peneiras de 50; 38; 25; 19; 9,5; 4,8 e 2,0 mm, anotando-se as massas retidas acumuladas em cada peneira (peneiramento grosso).

Para o processo de sedimentação, que determina o diâmetro das partículas inferiores a 0,075 mm, utilizou-se 120 gramas do material passado na peneira de 2,0 mm, e procedeu-se às etapas seguintes que a norma especifica. A Figura 18 apresenta a realização do ensaio. O método da suspensão de grãos baseia-se na Lei de Stokes, que estabelece uma relação entre o diâmetro da partícula e sua velocidade de sedimentação em um meio líquido de peso específico e viscosidade conhecidos. Ao finalizar a etapa de suspensão, o material foi vertido na peneira 0,075 mm e lavado com água potável para seguir à etapa de peneiramento fino.

Depois de secar o material retido na peneira 0,075 mm na estufa, foi passado nas peneiras 1,2; 0,6; 0,42; 0,25; 0,15 mm, anotando-se as massas retidas acumuladas em cada peneira. Em posse dessas informações, procederam-se os cálculos conforme a NBR 7181 (ABNT, 2016b) para obter a porcentagem correspondente de cada material em relação a massa total da amostra seca e os diâmetros das partículas.

**Figura 18 - Processo de Sedimentação**



Fonte: Autora, 2020.

Para auxiliar na determinação da curva granulométrica faz-se necessário o valor do peso específico dos grãos, pois é utilizado nos cálculos do processo de sedimentação. No presente trabalho não foi realizado o ensaio de determinação do peso específico dos grãos, adotando-se um valor referencial de  $27\text{KN/m}^3$ , sugerido por Pinto (2006) para o tipo de solo em questão.

Com os dados resultantes desses processos, foi plotado um gráfico que apresenta a curva granulométrica do solo, onde o eixo das abcissas contém os diâmetros das partículas, em escala logarítmica, e o eixo das ordenadas contém as porcentagens passantes em cada peneira.

### 3.6.2 Ensaio de Determinação do Limite de Liquidez (LL)

Esse ensaio, normatizado pela NBR 6459 (ABNT, 2016c), tem o objetivo de medir indiretamente a resistência ao cisalhamento do solo, para um determinado teor de umidade, através do número de golpes necessários para o deslizamento dos taludes da amostra. O Limite de Liquidez (LL) separa o estado de consistência do solo líquido do plástico. Havendo um teor de umidade acima do LL, o solo admite o comportamento de um líquido.

Foram separados da amostra deformada 100 gramas de material passado na peneira 0,42 mm, e adicionada água até a formação de uma pasta uniforme. Uma porção desta pasta foi colocada no aparelho de Casagrande, nivelando-a e retirando o excesso. Após, com o cinzel do aparelho foi realizada uma ranhura para dividir a amostra em duas partes. A partir daí a pasta foi submetida a uma sequência de golpes até que os bordos do corte se tocassem novamente e anotado o registro.

O ensaio foi repetido cinco vezes, com diferentes umidades. Em um gráfico plotaram-se os valores do número de golpes verificados em cada repetição (abscissas) e os valores das umidades gravimétricas correspondentes (ordenadas), sendo então traçada uma reta de melhor ajuste e para o valor de 25 golpes determina-se a umidade gravimétrica encontrando o Limite de Liquidez do solo estudado. A Figura 19 apresenta a porção da amostra no aparelho de Casagrande, onde realizou-se uma ranhura e seguiu-se para as etapas seguintes.

**Figura 19 - Ensaio de Limite de Liquidez**



Fonte: Autora, 2020.

### 3.6.3 Ensaio de Determinação do Limite de Plasticidade (LP)

Normatizado pela NBR 7180 (ABNT, 2016d), o Limite de Plasticidade (LP) corresponde ao teor de umidade mínimo, onde a coesão é pequena para permitir deformação, mas alta o suficiente para garantir a manutenção do formato adquirido. A preparação da amostra segue os mesmos procedimentos do ensaio de LL. Umedeceu-se 100 gramas da amostra e sobre uma placa de vidro, com a palma da mão, a amostra foi rolada até formar um cilindro padrão de 3 mm de diâmetro e simultaneamente apresentasse fissuras - limite de plasticidade (Figura 20).

O ensaio foi repetido cinco vezes e a partir da obtenção das características nos rolinhos de solo, retirou-se uma amostra de cada repetição para obter a massa de água presente (massa de solo úmido – massa de solo seco) e foi determinada a umidade gravimétrica (massa da água / massa solo seco) pelas médias dos valores encontrados, sendo o valor encontrado o limite de plasticidade.

**Figura 20 - Ensaio de Limite de Plasticidade**



Fonte: Autora, 2020.

### 3.6.4 Ensaio de Cisalhamento Direto

Através do Ensaio de cisalhamento direto, o qual segue as diretrizes da *American Society for Testing and Materials* D3080 (ASTM, 2004), obtém-se os valores de coesão e ângulo de atrito. Os ensaios foram realizados na condição inundada, em que os Corpos de Prova (CPs) foram submersos por um período de 24 horas antecedendo o ensaio.

A moldagem do corpo de prova foi realizada com um molde quadrado de aresta de 5 cm e altura de 2 cm, possuindo um volume de 50 cm<sup>3</sup>. As tensões normais que foram aplicadas nos corpos de prova para obter as coordenadas Tensão Normal e Tensão Cisalhante foram de 20, 40 e 60 kPa, definidas de acordo com o nível de tensões compatível com o perfil típico obtido

e sempre acima daquele em que a amostra se encontrava a campo para evitar uma condição pré-adensada. A velocidade do ensaio foi definida a partir da classificação do material e prescrições da norma americana, que resultou em 0,05mm/min.

Os CPs foram posicionados na caixa bipartida que sofre um deslocamento durante o ensaio, cisalhando a amostra, conforme ilustrado na Figura 21.

**Figura 21 - Ensaio de Cisalhamento Direto**



Fonte: Autora, 2020.

### 3.7 Aplicação do Modelo SHALSTAB

A partir dos ensaios de laboratório foi possível obter todos os parâmetros necessários para inserção no modelo SHALSTAB (intercepto de coesão efetiva do solo (kPa), densidade do solo saturada ( $\text{kg/m}^3$ ), ângulo de atrito interno do solo ( $^\circ$ )). Do MDE foram obtidas as declividades e área de contribuição da bacia.

Da análise das sondagens foi possível estabelecer um perfil típico que forneceu valores médios das características do solo estudado (espessuras e  $N_{\text{spt}}$ ), sendo de maior interesse a espessura da camada do colúvio, pois é um parâmetro de entrada do modelo. Além dos valores médios, obteve-se, dentro de um intervalo de confiança, um valor limite inferior e limite superior das espessuras da camada de colúvio.

Com essas informações, foi utilizada a metodologia SHALSTAB proposta por Michel (2013), atualizada para as versões mais recentes do ArcGis por Sbroglia *et al.* (2017), em forma de um *plugin* que executa automaticamente o modelo, a partir da criação de um *Workspace* para desenvolvimento dos cálculos, inserção de um MDE em formato matricial (*raster*) e de um mapa no formato vetorial em extensão *shapefile* contendo os valores dos parâmetros citados anteriormente, resultando em um mapa de suscetibilidade a escorregamentos na área de estudo.

A ferramenta *Automatic Shalstab Analysis* (ASA) dispõe de dois caminhos para rodar os cálculos, referentes a direção e escoamento da água e contribuição da bacia. O método D-Infinito, que necessita a adição do *plugin TauDEM*, atribui um sentido de fluxo baseado na inclinação mais íngreme onde o fluxo pode abastecer mais de uma célula adjacente e dividir-se entre elas. Realizou-se a tentativa, porém não foi bem sucedida. Optou-se então pelo método D-8, que utiliza o valor de altitude dos pixels vizinhos para obter a direção de fluxo de cada célula do Modelo Digital de Elevação. Existem oito variações de direção que indicam para qual das 8 células vizinhas a água escoar (CARVALHO, 2007 apud TABALIPA, 2019).

O modelo foi rodado em três combinações, usando os parâmetros do solo fixos e variando a espessura da camada de colúvio entre os (i) limite inferior e (ii) limite superior do intervalo de confiança e o (iii) valor da média encontrados a partir da definição do perfil estratigráfico típico que ocorre na Unidade Geotécnica Caturrita C. Esse procedimento foi realizado devido à variação que uma mesma unidade geotécnica pode apresentar em toda sua abrangência. Além da espessura, as características granulométricas e mecânicas do solo podem sofrer variações também. Porém, para o presente trabalho foram considerados os valores obtidos nos ensaios e verificada a semelhança dos índices físicos e propriedades mecânicas entre colúvios de outras partes da cidade já estudados.

O modelo permite adicionar os valores referentes a vegetação como coesão das raízes e peso, porém, para este trabalho não foi adicionado, tendo em vista que, conforme mencionado anteriormente, praticamente toda a região se encontra desmatada. Os procedimentos para executar o modelo dentro do ArcGis Pro encontram-se no Apêndice E.

A partir do parâmetro de condutividade hidráulica para o solo de colúvio, adotando-se um valor referencial de  $3,9 \times 10^{-4}$  m/s, plotado no gráfico Permeabilidade x Índice de Vazios (Vargas, 1977 apud Ortigão, 2007), é possível estimar a quantidade de chuva necessária para desencadear a instabilidade das classes intermediárias do modelo. Dessa forma, iguala-se a parcela  $\log\left(\frac{q}{t}\right)$  aos intervalos de cada classe intermediária (-3,1 - - 2,8; -2,8 - -2,5; -2,5 - -2,2), sendo (q) a quantidade de chuva necessária e (t) a transmissividade do solo, produto da condutividade hidráulica e da espessura da camada. Esse cálculo foi realizado para o Perfil Estratigráfico Típico.

Sabendo-se que instabilidade do colúvio é causada pela subida no Nível d'água em função das chuvas e, levando em consideração que a camada de colúvio contrasta com uma camada de solo residual que não é impermeável, e que existe um nível d'água a certa profundidade da camada residual, o valor calculado refere-se somente a coluna de água necessária para o

colúvio, desta forma, é possível que a quantidade de chuva necessária para a instabilidade seja maior do que a calculada. Não foram realizados cálculos para estimar a elevação do nível d'água na camada residual devido não se ter conhecimento do seu comportamento de condutividade e a partir dos dados disponíveis não serem suficientes para tal.

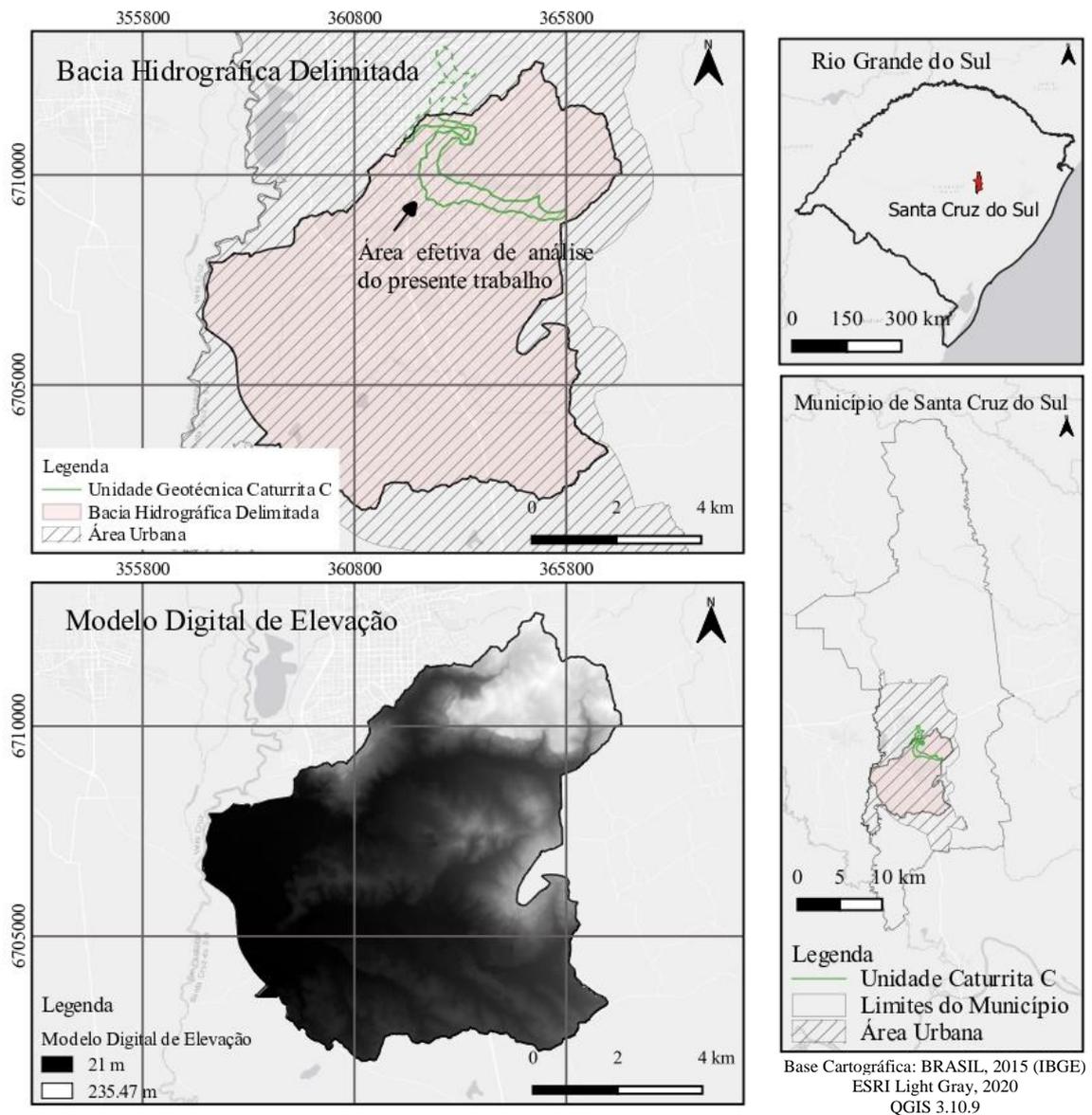
Também foi gerado um Mapa de Declividades, conforme procedimentos do Apêndice F, para verificar as áreas mais declivosas e com quais classes elas coincidem. Além disso, foi analisada a influência do parâmetro de profundidade no fator de segurança. O mapa de suscetibilidade também foi comparado com o Mapa IV – ZOC5 do Plano Diretor, contendo as áreas identificadas como Áreas Ditas de Suscetibilidade e Risco a Movimento de Massa na Área Urbana do Município.

## 4 APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 4.1 MDE e Bacia Hidrográfica Delimitada

A partir dos procedimentos que constam no Apêndice B, foi obtida a delimitação da Bacia Hidrográfica e o MDE (Figura 22), e também destacada a área da Unidade Geotécnica Caturrita C inserida na bacia, para a qual os resultados foram analisados. A delimitação de uma bacia hidrográfica pelo método digital é confiável segundo Torres *et al.* (2004) apud Ramme e Krüger (2007).

**Figura 22 - Bacia Hidrográfica Delimitada e MDE Gerado**



Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

As cotas mais altas estão a leste e norte da bacia, sendo que a oeste estão as cotas mais baixas. A área de estudo está em uma região de cotas intermediárias. Essas informações são fundamentais para o modelo, pois a partir do MDE são utilizados os dados de declividade e área de contribuição da bacia.

## 4.2 Perfil Estratigráfico Típico da Unidade Geotécnica

Dos onze perfis esquemáticos apresentados no Apêndice D, apenas sete apresentavam camada de colúvio. Os demais podem ter sofrido ação antrópica como retirada de material por cortes ou mesmo os depósitos de colúvio não tenham ocorrido sobre estas áreas, pois não é um processo homogêneo. Na Tabela 3 encontram-se os valores das grandezas correspondentes a cada um dos sete perfis mencionados e na Tabela 4 é apresentado o resultado das análises estatísticas dos dados. Na Figura 23 é apresentado o Perfil Estratigráfico Típico obtido.

**Tabela 3 - Dados para Obter um Perfil Estratigráfico Típico**

Características	Perfil 1	Perfil 2	Perfil 3	Perfil 4	Perfil 5	Perfil 6	Perfil 9
Valores de $N_{spt}$ da camada de colúvio	12	7	4	2	2	5	4
	17	11	4	5	9	-	9
	19	16	-	19	-	-	-
	19	4	-	18	-	-	-
	-	7	-	-	-	-	-
Espessuras da camada de colúvio (m)	5,18	2,74	1,00	0,60	1,70	1,50	1,30
	-	4,75	1,90	4,80	1,90	-	1,60
Prof. N.A (m)	0,95	2,65	0,80	0,80	0,20	5,00	3,00
	-	3,70	1,15	1,15	1,50	-	7,00

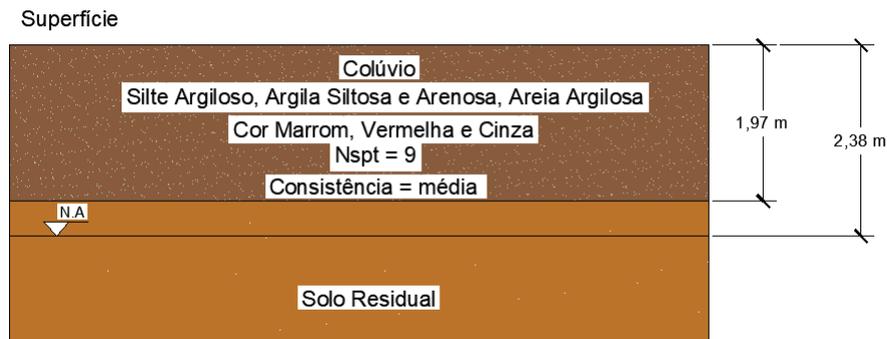
Fonte: Autora, 2020.

**Tabela 4 - Resultados das Análises Estatísticas Realizadas para Obtenção de um Perfil Estratigráfico Típico**

Dados	$N_{spt}$ do Colúvio	Espessura do Colúvio	Prof. do Nível d'água
Média (m)	9,650	2,414	2,325
Desvio Padrão	6,226	1,595	2,044
Erro padrão	1,392	0,460	0,590
Intervalo de 95% de Confiança	Lim. Inferior (m)	6,921	1,168
	Lim. Superior (m)	12,379	3,482
Nova Média (m)	9,17	1,97	2,38

Fonte: Autora, 2020.

**Figura 23 - Perfil Estratigráfico Típico**



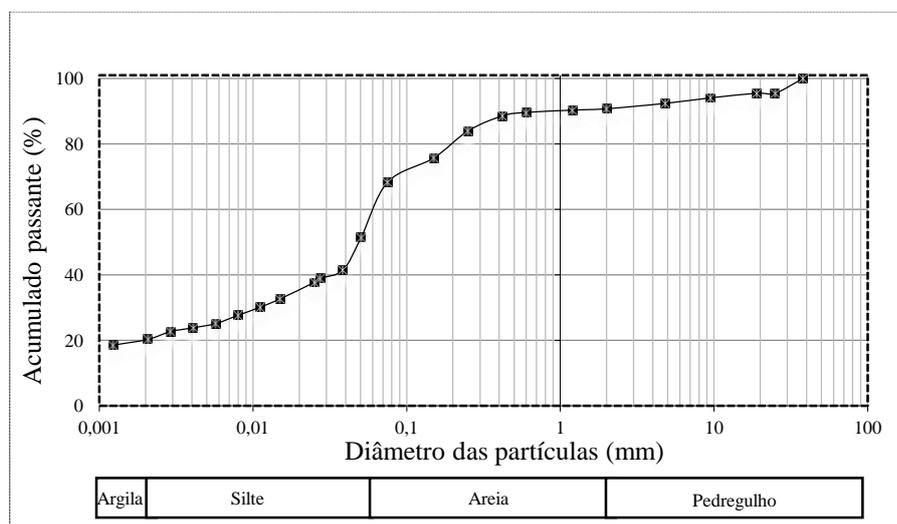
Fonte: Autora, 2020.

O perfil ilustrado apresenta solo coluvionar de matriz variando entre silte, areia e argila, compatível com a descrição feita por Noronha, Mizusaki e Bressani (2012), descrevendo o material com matriz areno-siltosa ou argilo-siltosa de tonalidades marrom-avermelhado. Além disso, apresentou  $N_{spt}$  médio de 9 golpes. Pinheiro, Nummer e Bressani (2012) reuniram os parâmetros encontrados por Pinheiro *et al.* (2002) para o solo coluvionar de uma encosta urbana do município, que apresentou  $N_{spt}$  de 5 a 10 golpes, textura siltosa a arenosa, além de espessuras variando de 2 metros a 10 metros. Parâmetros semelhantes aos encontrados neste trabalho.

#### 4.3 Caracterização do Solo de Colúvio

A curva granulométrica do solo, sua caracterização e classificação geotécnica estão representados na Figura 24 e Tabela 5.

**Figura 24 - Curva Granulométrica do Solo Coluvionar**



Fonte: Autora, 2020.

**Tabela 5 - Caracterização do Solo Coluvionar**

Propriedades		Valores/Descrição
Granulometria	Pedregulho ( $2\text{mm} < \Phi \leq 60\text{mm}$ )	8%
	Areia ( $0,06\text{mm} < \Phi \leq 2\text{mm}$ )	32%
	Silte ( $0,02\text{mm} < \Phi \leq 0,06\text{mm}$ )	41%
	Argila ( $\Phi \leq 0,02\text{mm}$ )	19%
Classificação Granulométrica segundo a NBR 6502 (ABNT, 1995)		Silte Arenoso
Plasticidade	Limite de Liquidez - LL	33%
	Limite de Plasticidade - LP	23%
	Índice de Plasticidade - IP	10%
	Classificação segundo Burmister (1949) apud Das (2011)	Solo de Baixa Plasticidade
Classificação SUCS		ML Silte Arenoso
Classificação da AASHTO		A - 4 Solo Siltoso

Fonte: Autora, 2020.

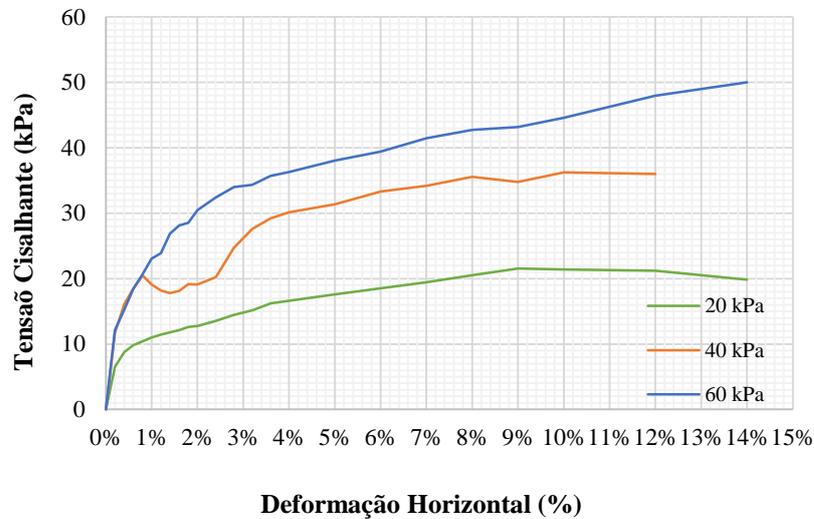
Ao analisar a curva granulométrica do solo estudado observa-se uma maior porcentagem de finos, sendo a maior fração de silte. Os diferentes sistemas convergem para uma mesma classificação do solo, que também é compatível com a descrição geológica de Noronha, Mizusaki e Bressani (2012) para o solo coluvionar e com a caracterização táctil visual das sondagens. Pinheiro, Nummer e Bressani (2012) reuniram os resultados dos ensaios de caracterização do solo coluvionar da encosta estudada por Pinheiro *et al.* (2002) e Eisenberger (2003), indicando um solo coluvionar de textura siltosa a arenosa, com fração argila inferior a 30% e de média a baixa plasticidade ( $LL < 50\%$ ), muito semelhante aos valores encontrados para o solo coluvionar estudado no presente trabalho.

#### 4.4 Resistência ao Cisalhamento do Solo de Colúvio

A Figura 25 apresenta a curva de Tensão Cisalhante x Deformação Horizontal dos corpos de prova ensaiados, e a Figura 26 apresenta a envoltória de Mohr-Coloumb, traçada a partir do resultados dos ensaios. O critério de ruptura adotado foi em função da inflexão da curva Tensão

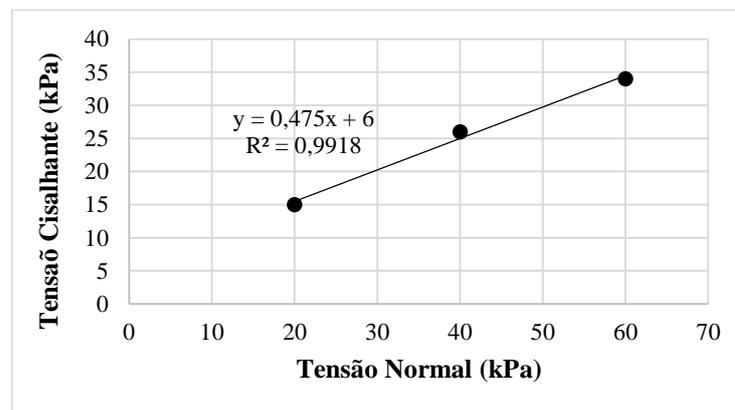
x Deformação. Os índices físicos dos corpos de prova ensaiados e os parâmetros de resistência estão na Tabela 6.

**Figura 25 - Tensão Cisalhante x Deformação Horizontal**



Fonte: Autora, 2020.

**Figura 26 - Envoltória de Ruptura (Tensão cisalhante x Tensão normal)**



Fonte: Autora, 2020.

**Tabela 6 - Índices Físicos**

CP	Tensão Normal (kPa)	Peso Específico (kN/m <sup>3</sup> )	Peso Específico Sat. (kN/m <sup>3</sup> )	Umidade Moldagem (%)	Umidade Pós-Ensaio (%)	Índice de vazios	Grau de Saturação de Campo (%)	Grau de Saturação Pós-Ensaio (%)
1	20	17,38	19,10	20,60	32,51	0,92	58,42	97,65
2	40	17,63	19,03	20,96	32,45	0,90	58,13	99,89
3	60	17,37	19,16	20,37	32,70	0,92	57,32	98,45
Médias		17,46	19,10	20,64	32,55	0,91	57,96	98,66

Fonte: Autora, 2020.

Conforme a envoltória de ruptura, o valor de intercepto de coesão para o solo de colúvio é de 6 kPa e seu ângulo de atrito é de 25°. Pinheiro, Nummer e Bressani (2012) realizaram ensaios de resistência ao cisalhamento para o solo coluvionar da mesma encosta estudada por Pinheiro *et al.* (2002) e Eisenberger (2003), encontrando valores entre 25° e 34° para ângulo de atrito e valores de intercepto de coesão entre 0 e 6,5 kPa. Além disso, os ensaios não evidenciaram ocorrência de pico de ruptura ou perda de resistência após o pico, mantendo um nível de tensões para vários níveis de deslocamento da caixa. O mesmo ocorreu para o solo do presente estudo, sendo a ruptura definida na deformação limite de 3%.

Os valores encontrados para os parâmetros de resistência foram semelhantes aos encontrados por Pinheiro, Nummer e Bressani (2012), referentes ao solo coluvionar da encosta estudada pelos mesmos autores, e são o foco do ensaio para o presente trabalho, sendo dados de entrada para o modelo SHALSTAB. O processo de inundação produziu saturação muito próxima de 100% e o peso específico do solo sofreu um importante acréscimo. Em campo, na época da coleta, o solo encontrou-se com um grau de saturação de aproximadamente 57,96%, e devido ao elevado índice de vazios (muito próximo de 1), o solo pode saturar facilmente, não apenas pela subida do nível d'água, mas também pela chuva, principalmente nas camadas mais superficiais. O solo apresentou baixa resistência quando saturado.

#### 4.5 Mapa de Suscetibilidade a Escorregamentos Translacionais

Na Tabela 7 são apresentados os parâmetros empregados nas análises para as diferentes combinações. O valor médio de 1,97 m foi arredondado para 2,0 m, os valores do limite inferior e superior do intervalo de confiança de 1,512 m e 3,316, foram arredondados para 1,5 m e 3,3 m respectivamente.

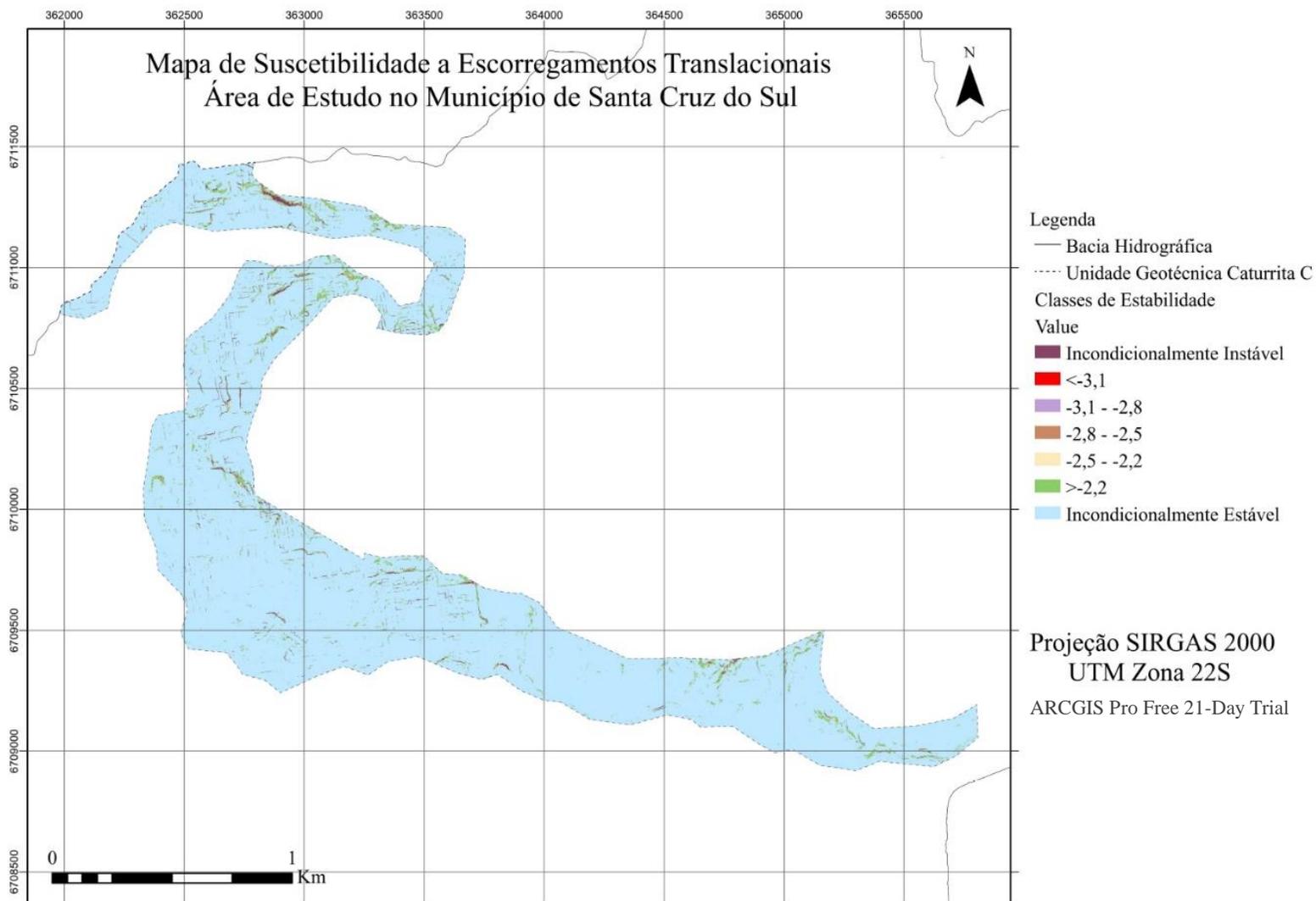
**Tabela 7 - Combinações dos Parâmetros de Entrada**

Parâmetros	Coesão do solo N/m <sup>2</sup>	Densidade Sat. (Kg/m <sup>3</sup> )	Ângulo de Atrito (°)	Profundidade da camada (m)	Declividade e Área de Contribuição
Combinação 1	6000	1910	25	2,0	
Combinação 2	6000	1910	25	1,5	A partir do MDE
Combinação 3	6000	1910	25	3,3	

Fonte: Autora, 2020.

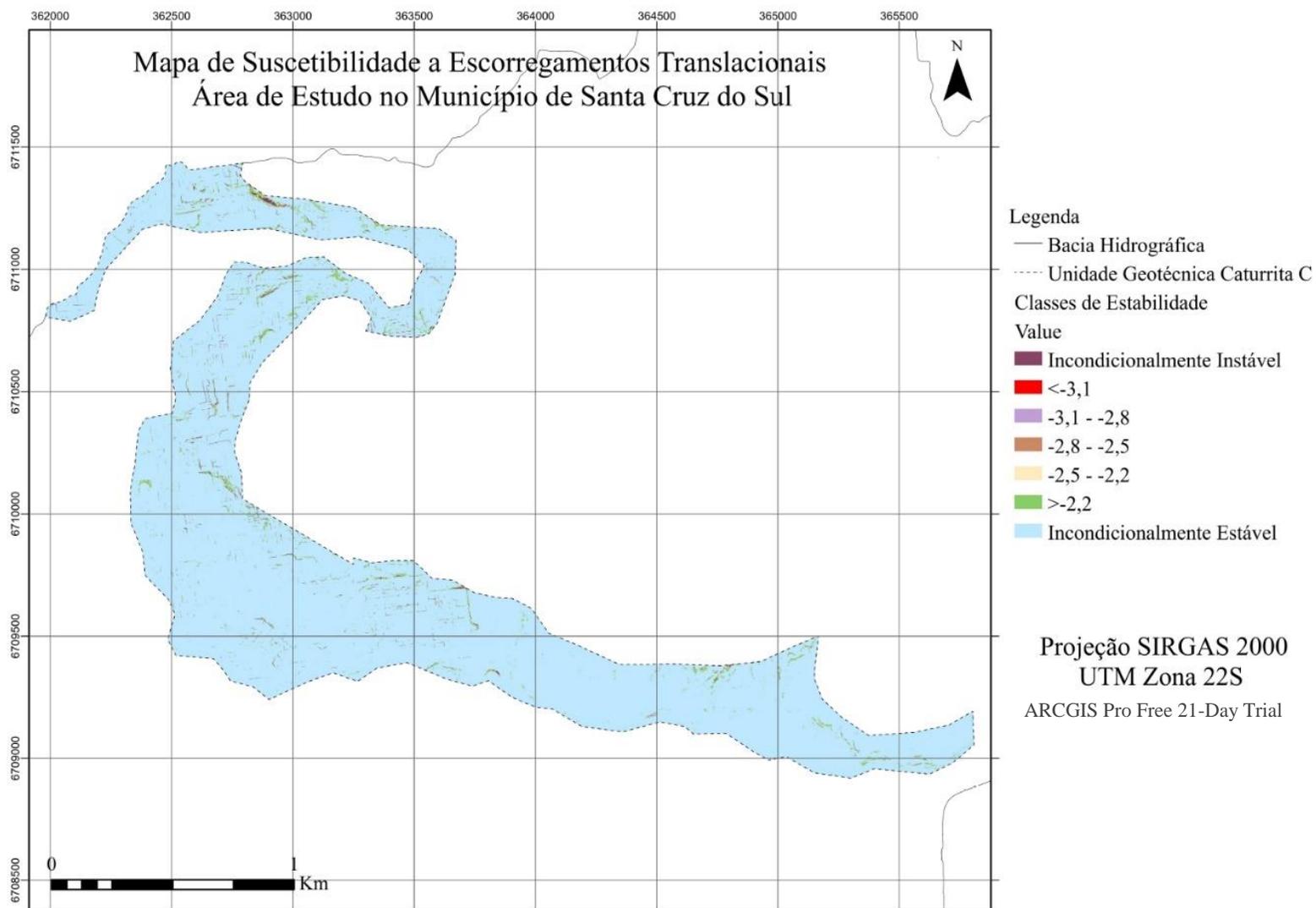
Os resultados de cada combinação são apresentados nas Figuras 27, 28 e 29.

Figura 27 - Combinação 1



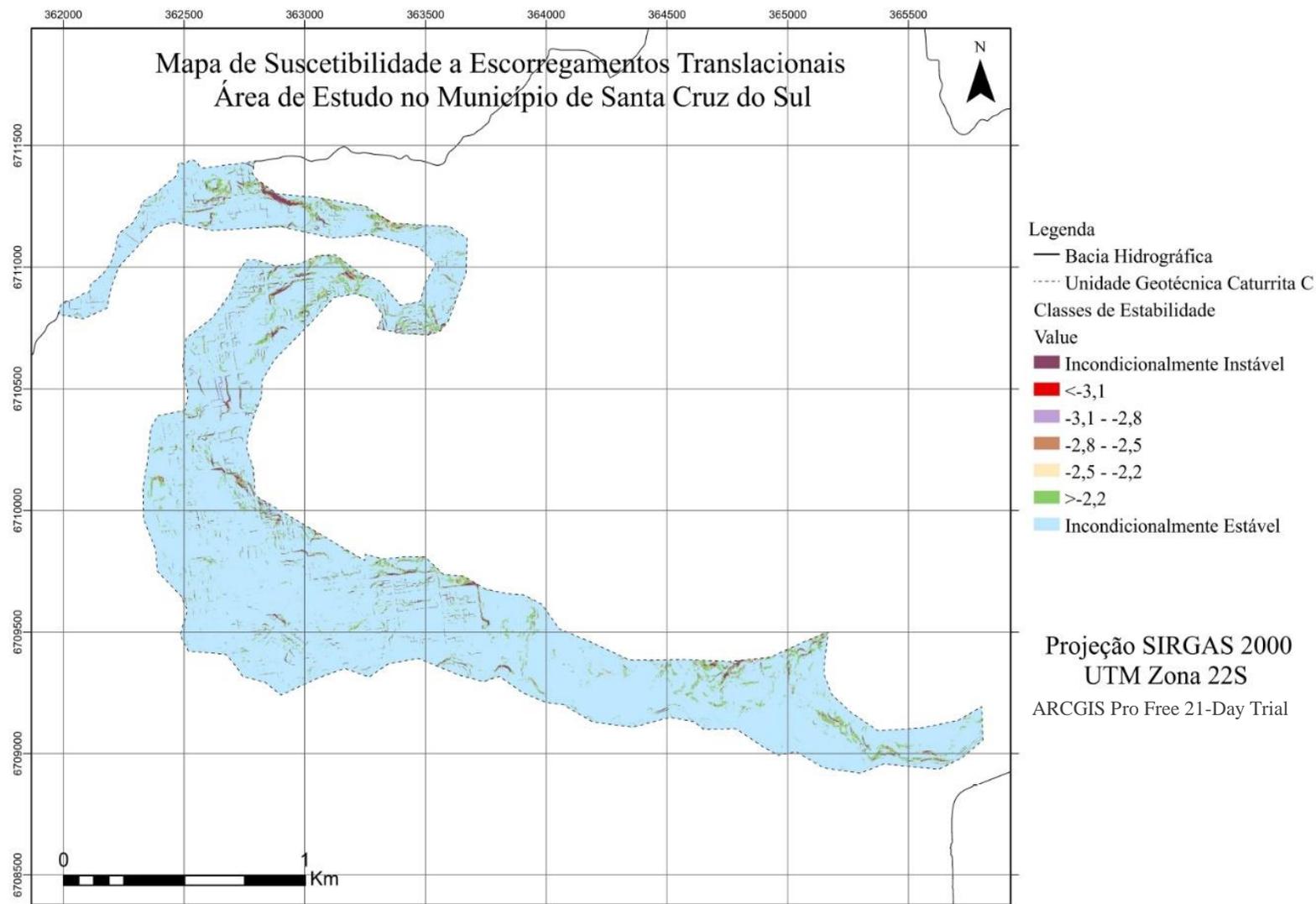
Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

Figura 28 - Combinação 2



Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

Figura 29 – Combinação 3



Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

A partir do da análise dos resultados gerados, foi possível perceber que ao aumentar a espessura do solo, o fator de segurança diminui, aumentando áreas incondicionalmente instáveis, como é possível perceber na Tabela 8. Apesar da variação, a maior área da unidade estudada no presente trabalho retornou com valores de condição estável.

**Tabela 8 - Incidência das Classes nas Três Combinações**

Classe		Legenda	Incidência		
			Combinação 1	Combinação 2	Combinação 3
Estáveis	Incondicionalmente Estável		94,82%	96,70%	91,12%
	$\log q/t > -2,2$		3,28%	2,18%	5,33%
	$-2,5 < \log q/t \leq -2,2$		0,33%	0,18%	0,69%
Instáveis	$-2,8 < \log q/t \leq -2,5$		0,18%	0,10%	0,37%
	$-3,1 < \log q/t \leq -2,8$		0,10%	0,07%	0,21%
	$\log q/t \leq -3,1$		0,16%	0,09%	0,33%
	Incondicionalmente Instável		1,11%	0,68%	1,95%

Fonte: Autora, 2020.

As áreas indicadas como incondicionalmente instáveis apresentaram uma incidência pequena, porém, superior às áreas indicadas nas classes intermediárias como instáveis, ou seja, que necessitam de uma coluna de água para que ocorra uma ruptura.

Cabem considerações especiais sobre essas áreas classificadas como incondicionalmente instáveis, mas que ainda não apresentaram ruptura ou não se tem registros sobre ocorrências de ruptura nesses locais. Existem fatores que podem contribuir para isso, tais como as espessuras de colúvio adotadas nos cálculos serem superiores às que realmente ali ocorrem; a existência de certa imprecisão nos dados topográficos inseridos no modelo; os parâmetros de resistência efetivos do colúvio serem superiores aos empregados nos cálculos e; devido ao modelo considerar o intercepto de coesão real ou efetivo, podendo estar presente na condição não saturada uma parcela de coesão aparente que está contribuindo consideravelmente para a estabilidade em campo.

Porém, mesmo que esses locais não dependam de eventos hidrológicos para ocorrer movimentos de massa, existem outros fatores que podem contribuir para tal, como o acréscimo de carga por construções ou depósitos de materiais, vibrações por tráfego ou construções.

Apesar destas considerações, empregando os parâmetros solicitados, como resultado do modelo, a área de estudo apresentou encostas propícias para a deflagração de movimentos de massa, que merecem atenção. Em períodos de grande pluviosidade já ocorreram eventos deste tipo, em áreas diversas da cidade e incluindo outros tipos de rupturas também.

Das sete classes de estabilidade, que vão desde áreas incondicionalmente estáveis até incondicionalmente instáveis para ruptura do tipo translacional, para as classes intermediárias foram calculadas as precipitações necessárias para provocar a instabilidade (Tabela 9). Foi realizada uma reclassificação em quatro classes para melhor análise. Dietrich e Montgomery (1998) classificaram como incondicionalmente estáveis e instáveis as duas classes de cada extremidade, sendo que independem da pluviosidade. Portanto, foram calculadas as precipitações estimadas para as três classes intermediárias.

**Tabela 9 - Precipitações Necessárias para Desencadear Riscos**

Classe	Quantidade de chuva	Reclassificação
Incondicionalmente Instável	-	Incondicionalmente Instável
$\log q/t \leq -3,1$	-	
$-3,1 < \log q/t \leq -2,8$	50 – 105 mm	Instável
$-2,8 < \log q/t \leq -2,5$	105 - 210 mm	
$-2,5 < \log q/t \leq -2,2$	210 – 425 mm	Estável
$\log q/t > -2,2$	-	Incondicionalmente Estável
Incondicionalmente Estável	-	

Fonte: Autora, 2020.

As áreas estáveis necessitam de precipitações superiores a 210 mm para se tornarem instáveis. As áreas instáveis representam encostas propícias a escorregamentos com precipitações próximas a 50 mm. Esses valores consideram que a camada de colúvio esteja sobre uma camada impermeável, ou seja, é o volume necessário para saturar a coluna d'água dentro do colúvio.

Porém, para Perfil Estratigráfico Típico do presente estudo, existe solo residual abaixo da camada de colúvio e um nível d'água 38 cm abaixo do contraste entre as camadas. Portanto até que o nível d'água se eleve para o nível de ruptura calculado pelo modelo, pode ser necessário um volume de chuva maior, pois a camada inferior também é permeável. Além deste fator, como a área em estudo é urbanizada, ocorre certa impermeabilização superficial do solo, podendo aumentar os valores de precipitação encontrados. De qualquer forma, os valores na Tabela 9 podem ser considerados como alertas em eventos chuvosos, pois estarão ligeiramente a favor da segurança.

Comparando os dados climatológicos da Estação Meteorológica Automática da UNISC fornecidos por Hoppe (2020), com algumas datas em que ocorreram movimentações de massa das quais se encontrou registros, notou-se que a maioria dos eventos ocorreu em datas em que os três ou quatro dias anteriores apresentavam precipitações significativas, que acumuladas

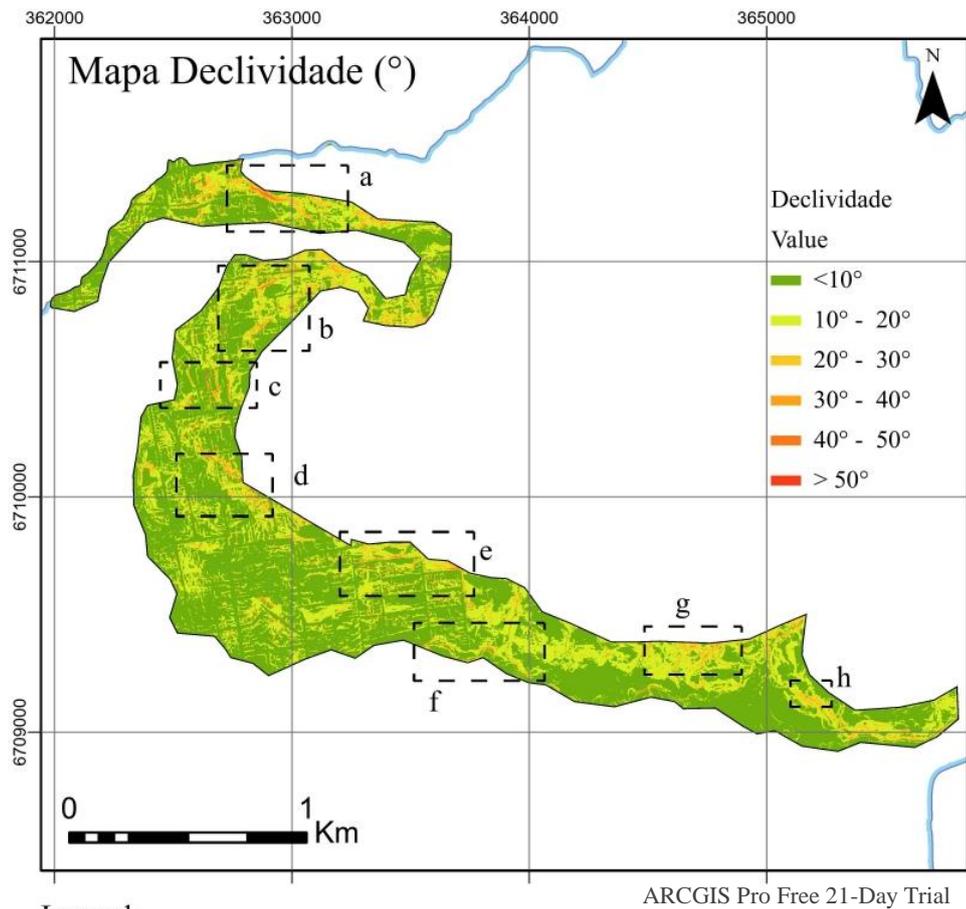
podem ter provocado a ruptura. O menor evento considerando o acumulado foi de 68mm. Um dos eventos sem acumulados significativos, considerando apenas o dia da ocorrência foi de 86 mm.

Ressalta-se que os movimentos registrados foram diversos, não havendo uma classificação específica para eles, além de não se ter sua localização exata, mas a partir dessa análise, verificou-se que as precipitações calculadas para as classes do modelo não minimizam os riscos, pois é alertado que precipitações próximas a 50 mm podem provocar rupturas.

A partir dos dados climatológicos fornecidos pelo mesmo autor, através de uma análise subjetiva desde o ano de 2011 até o ano em curso, os meses que geralmente apresentaram precipitações diárias próximas ou superiores a 50 mm foram os meses de março, abril, julho, agosto, setembro e outubro, que coincidentemente, foram os meses em que ocorreram rupturas das quais se tem registros.

Além das precipitações, foi verificada a influência dos ângulos de inclinação das encostas com as classes de estabilidade geradas no modelo. A Figura 30 apresenta o Mapa de Declividades da área de estudo, que foi elaborado conforme o Apêndice F. Em destaque estão algumas áreas com maiores inclinações.

**Figura 30 - Mapa de Declividades**



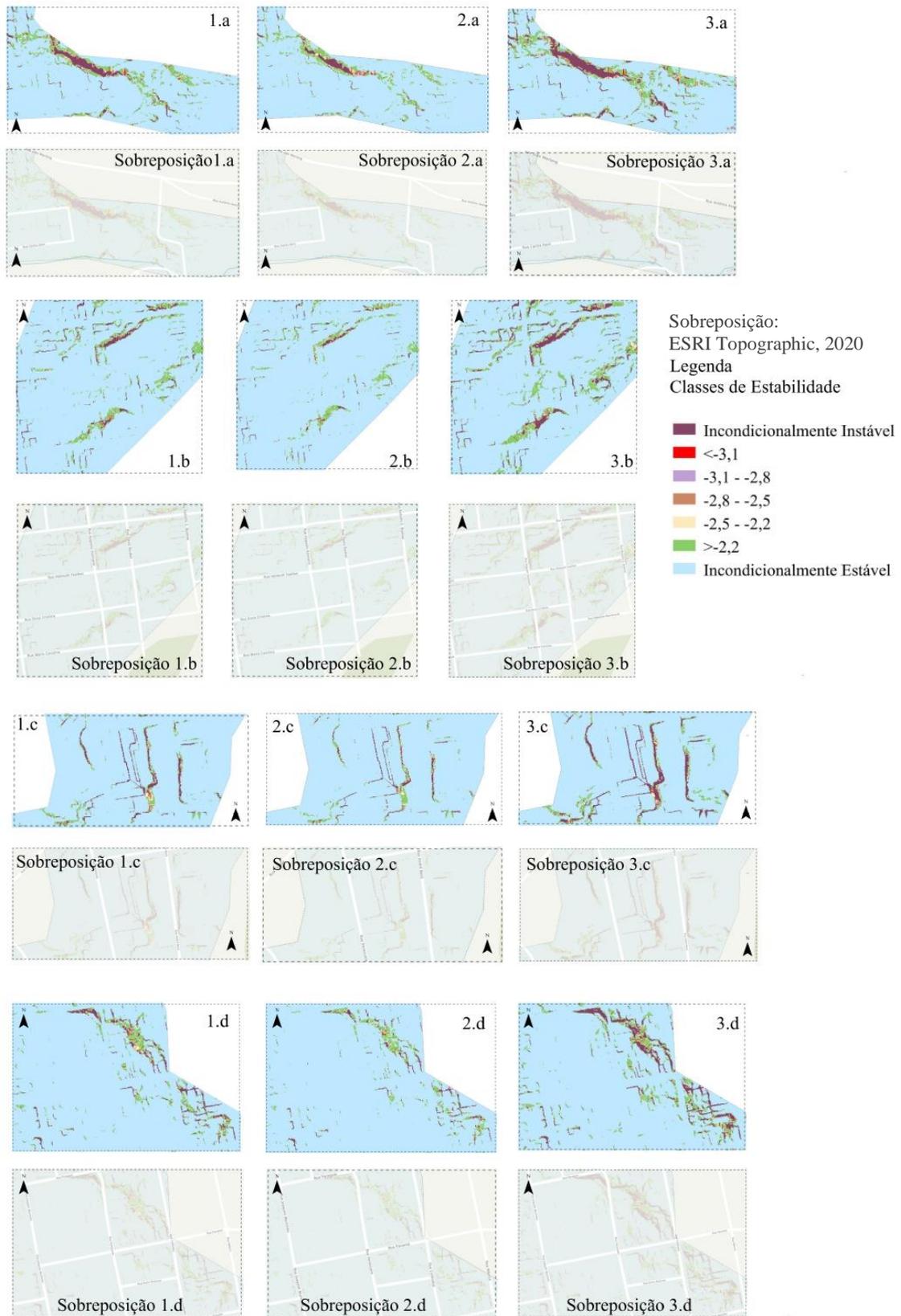
**Legenda**

- Unidade Geotécnica Caturrita C
- Bacia Hidrográfica Delimitada
- ┌─┐ Áreas Críticas

Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

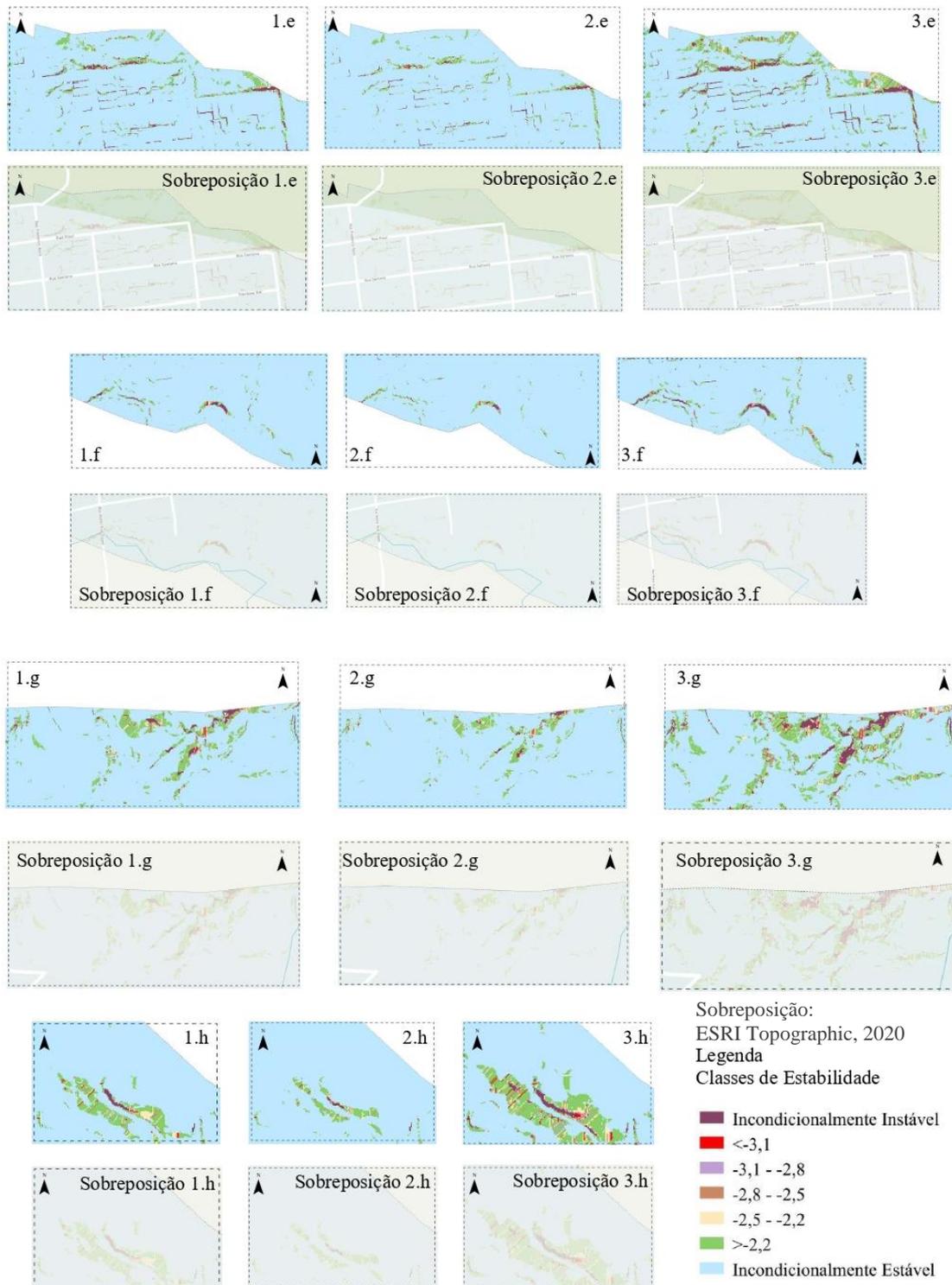
As análises ocorreram para as 3 combinações, além de sobrepor um mapa de vias para auxiliar na visualização do local. Também é possível obter com precisão as coordenadas destas áreas mais críticas. Com essa informação, é possível localizá-las a campo e realizar estudos mais específicos. As Figuras 31 e 32 mostram imagens aproximadas de cada combinação inseridas nas áreas mais críticas (a, b, c, d, f, g e h) destacadas no Mapa de Declividades.

**Figura 31 - Comparações das Combinações nas Declividades mais Acentuadas (a-d)**



Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

**Figura 32 - Comparações das Combinações nas Declividades mais Acentuadas (e-h)**



Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

Ao analisar as imagens, percebe-se que as áreas mais declivosas ( $> 30^\circ$ ) coincidem com as classes de maior instabilidade. Já a classe incondicionalmente estável coincide com as declividades mais suaves.

Comparando as 3 combinações é possível observar a variação da incidência das classes mais críticas. A classe incondicionalmente instável abrange uma área maior na terceira combinação, na qual foi utilizada uma espessura maior para a camada de solo (3,3 m), e uma área menor para a segunda combinação, na qual foi utilizada uma espessura menor para a camada de solo (1,5 m). Na primeira combinação foi utilizada a espessura média obtida (2,0 m). Com essa informação, verifica-se que a espessura da camada ( $z$ ) influencia no fator de segurança, aumentando áreas incondicionalmente instáveis.

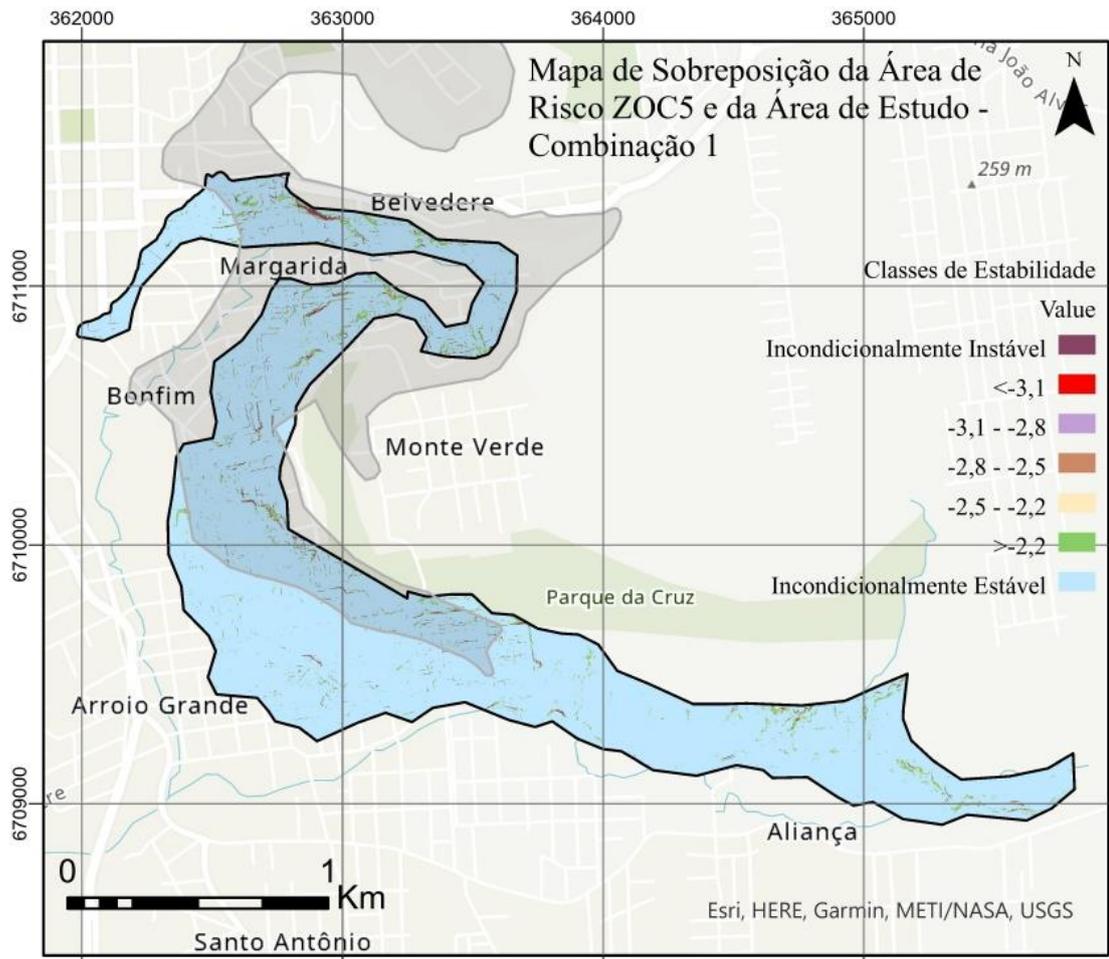
Pelo fato da área de análise estar situada na zona urbana, é possível que algumas das declividades mais acentuadas sejam provenientes de cortes realizados para construções ou abertura de vias. Porém, ao analisar as áreas “g” e “h” da Figura 32, pela sobreposição percebe-se que são áreas sem ocupação por enquanto, com ausência de vias e habitações. A área “a” da Figura 31 também apresenta uma maior incidência da classe incondicionalmente instável em um trecho que aparenta ser uma encosta natural, porém, logo abaixo deste trecho passa uma via e existem residências próximas.

Ressalta-se que as áreas classificadas no modelo como incondicionalmente instáveis, podem ainda não ter apresentado ruptura ou não haver registros sobre ocorrências de ruptura nesses locais, devido aos fatores que envolvem dos dados de entrada do modelo (parâmetros de resistência, espessura da camada e dados topográficos), que podem não ser compatíveis com as condições que ocorrem em campo, além de que pode haver uma parcela de coesão aparente na condição insaturada que está contribuindo para a estabilidade.

O Mapa de Índices que delimita a zona ZOC5, contendo as áreas identificadas como Áreas Ditas de Suscetibilidade e Risco a Movimento de Massa na Área Urbana do Município foi utilizado para comparações com a área de estudo. A Figura 33 contém a sobreposição da área de ocupação controlada do município (ZOC5) e da Unidade Geotécnica Caturrita C, alvo deste estudo, contendo a Combinação 1 dos parâmetros para o Perfil Estratigráfico Típico.

A ZOC5 delimitada pelo Plano Diretor faz referência a movimentos de massa, incluindo o rastejo, que ocorre predominantemente em regiões com declividades mais suaves, e que os autores Noronha, Mizusaki e Bressani (2012) evidenciaram também para a Unidade Caturrita C.

**Figura 33 - Área da ZOC5 sobreposta a Área de Estudo**



#### Legenda

- Zona ZOC5 Escorregamento
- Unidade Geotécnica Caturrita C

ARCGIS Pro Free 21-Day Trial  
Basemap: ESRI Topographic, 2020

Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

O presente trabalho pretendeu mapear áreas com risco de escorregamentos do tipo translacional, que são identificadas pelo modelo SHALSTAB. Dessa forma, mesmo áreas incondicionalmente estáveis para ruptura translacional, podem apresentar problemas de rastejo.

Por outro lado, foram observadas áreas identificadas como instáveis pelo modelo SHALSTAB fora da área ZOC 5, ilustradas na Figura 32. Por não haver um mapa de cicatrizes disponíveis para sobreposição e comparação com o mapa de suscetibilidade gerado, torna-se interessante localizar as áreas mais críticas a campo e realizar novas investigações, acompanhar o comportamento destas áreas e verificar se há necessidade de intervenções.

## 5 CONCLUSÕES

A área localizada em uma região da zona urbana de Santa Cruz do Sul, de acordo com os resultados obtidos no presente estudo, apresentou pequenas áreas de vulnerabilidade a escorregamentos translacionais, sendo a maior porcentagem de área classificada como estável. Apesar dessa classificação pelo modelo SHALSTAB, Noronha, Mizusaki e Bressani (2012) definem essa região como uma área em que predomina o rastejo, tipo de movimento de massa não identificado pelo modelo, mas também problemático.

Os parâmetros geotécnicos de entrada do modelo referentes a camada de solo foram definidos a partir de ensaios de laboratório, visando diminuir a vulnerabilidade dos resultados gerados pelo modelo. Para os parâmetros topográficos obtidos a partir do MDE, foi fundamental utilizar curvas de nível com intervalo de 0,5 m devido a maior precisão e melhor representação da realidade.

Como o modelo aplica-se a deslizamentos rasos, o presente trabalho buscou caracterizar as camadas de colúvio que ocorrem dentro da unidade estudada, em função de contrastar com as camadas residuais, sobre as quais se estabelecem. É possível que dentro da área de estudo a camada de colúvio não se repita homoganeamente sobre toda sua abrangência, porém, por haver registros de instabilidade nestas camadas, descritas por Wenzel (1996) e Noronha, Mizusaki e Bressani (2012), optou-se por estudá-la. Para caracterizá-la foi fundamental a análise de perfis de sondagens inseridos na área de estudo, os quais permitiram diferenciar as camadas de colúvio da camada residual da Formação Caturrita.

A caracterização da camada de colúvio apresentou resultados muito semelhantes aos colúvios estudados por Pinheiro *et al.* (2002), Eisenberger (2003) e Pinheiro, Nummer e Bressani (2012). Através da aquisição de todos os dados para rodar o modelo, obteve-se uma base de informações mais criteriosa para melhorar a confiabilidade dos resultados, visando obter um mapeamento de suscetibilidade que não minimizasse situações de risco e que também não as potencializasse.

Para efeitos de comparação, foram geradas 3 combinações variando a espessura da camada de colúvio em 2,0; 1,5 e 3,3 m, valores encontrados na análise estatística realizada para os perfis de sondagem. A partir das 3 combinações, verificou-se que espessuras maiores tendem a aumentar a incidência de classes de maior instabilidade, em razão do incremento de peso à camada provocado pela maior espessura.

Observando-se os condicionantes de topografia da área de estudo, onde se encontram na maior parte declividades mais suaves à intermediárias ( $<30^\circ$ ) e em menor incidência

declividades altas ( $>30^\circ$ ), explica também o fato de haver maior ocorrência da classe incondicionalmente estável e menor ocorrência da classe incondicionalmente instável. Essas duas classes estão associadas ao critério de que existem limites de inclinações abaixo das quais, o solo, mesmo em condições extremas não sofre ruptura e inclinações acima das quais, mesmo sem interferências externas (chuvas que provoquem o aumento de nível d'água) já se apresenta instável, propício a sofrer ruptura.

Ressalta-se que os locais classificados no modelo como incondicionalmente instáveis, podem ainda não ter apresentado ruptura ou não haver registros sobre ocorrências de ruptura, devido aos fatores que envolvem dos dados de entrada do modelo, tais como os parâmetros de resistência efetivos do colúvio, que podem ser superiores aos empregados nos cálculos; a espessura da camada de colúvio ser menor que a adotada (espessuras menores apresentam menores incidências de áreas incondicionalmente instáveis); certa imprecisão nos dados topográficos inseridos no modelo; além de que pode haver uma parcela de coesão aparente na condição não saturada que está contribuindo para a estabilidade em campo. Portanto, cabem considerações especiais sobre esses locais, sendo interessante visitas a campo para mais investigações, pois mesmo que não dependam da pluviosidade para sofrer rupturas, existem outros fatores que podem contribuir para movimentos de massa.

Para as demais classes existe uma altura de coluna d'água dentro da camada de solo necessária para que se tornem instáveis ou para que ocorra movimentação de massa. Através do modelo foi possível determinar um volume de chuva necessário para elevar o nível de água dentro da camada colúvio até o ponto de instabilidade ou ruptura, porém os valores encontrados podem ser superados em condições de campo, devido a camada abaixo não ser impermeável e devido a impermeabilização causada pela urbanização, que escoará mais água do que infiltrará.

Os valores encontrados são de chuvas próximas a 50 mm para provocar ruptura nos locais mais críticos e superiores a 210 mm para tornar áreas estáveis em áreas instáveis. Os valores estão alertando para uma quantidade de precipitação necessária para saturar apenas a camada de colúvio, portanto, para a condição do Perfil Típico, estes alertas estão a favor da segurança.

O presente trabalho pode ser útil para futuras investigações que venham a ser realizadas nas áreas mais críticas, sendo interessante monitorar o comportamento destas áreas e averiguar a necessidade de intervenções ou não. Apesar da base de dados ter sido criteriosa, os parâmetros podem sofrer variação na área de estudo, alterando o resultado final, como foi possível observar nas 3 combinações com variação do parâmetro de espessura da camada. A principal alteração ocorreu sobre as próprias áreas já consideradas instáveis, que sofreram um incremento de área, não tendo surgido ou surgido muito pouco novas áreas que antes não apresentavam incidência

de classes de instabilidade. Dessa forma, a localização das áreas mais críticas para as 3 combinações permanece a mesma, facilitando trabalhos de campo que possam ser realizados futuramente.

Devido a limitação de dados disponíveis foram consideradas várias hipóteses simplificadoras para utilizar o modelo SHALSTAB, portanto, o presente trabalho trata-se de um estudo preliminar. Estudos amplos requerem uma malha adequadamente densa de pontos amostrais sobre as características e parâmetros geotécnicos e quanto à estratigrafia do terreno, produzindo resultados mais precisos.

Com este estudo, pretendeu-se contribuir com a segurança das pessoas e a gestão territorial do município, pois existe uma constante modificação da morfologia, tanto por processos naturais quanto por processos antrópicos, sendo extremamente importante e interessante realizar e atualizar estudos que envolvem o monitoramento de riscos.

## REFERÊNCIAS

ALVES, E. L. *O uso do SIG em estudo de susceptibilidade e risco a movimento de massa e inundações na Zona Urbana de Santa Cruz do Sul-RS*. 2004. 129 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Geografia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM D 3080: Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions*. Philadelphia, 2004. Janeiro, v.1, p.35-45.

ARCGIS Pro Free 21-Day Trial. Redlands: ESRI Environmental Systems Research Institute, 2020. Disponível em: <https://www.esri.com/en-us/arcgis/trial>. Acesso em: 03 jun. 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6122: Projeto e execução de fundações*. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

. *NBR 6502: Rochas e solo*. Rio de Janeiro: ABNT, 1995.

. *NBR 6484: Solo – Sondagens de simples reconhecimento com SPT – Método de ensaio*. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

. *NBR 9604: Abertura de poço e trincheira de inspeção em solo, com retirada de amostras deformadas e indeformadas — Procedimento*. Rio de Janeiro: ABNT, 2016a.

. *NBR 7181: Versão Corrigida 2:2018: Solo - Análise granulométrica*. Rio de Janeiro: ABNT, 2016b.

. *NBR 6459: Versão Corrigida:2017: Solo – Determinação do limite de liquidez*. Rio de Janeiro: ABNT, 2016c.

. *NBR 7180: Solo — Determinação do limite de plasticidade*. Rio de Janeiro: ABNT, 2016d.

BRASIL. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais - CPRM. *Mapa Geológico do Estado do Rio Grande do Sul*. 2008. Disponível em: [http://www.cprm.gov.br/publique/media/geologia\\_basica/cartografia\\_regional/mapa\\_rio\\_grande\\_sul.pdf](http://www.cprm.gov.br/publique/media/geologia_basica/cartografia_regional/mapa_rio_grande_sul.pdf). Acesso em: 20 jun. 2020.

BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. *Cidades*. 2020. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rs/santa-cruz-do-sul/panorama>. Acesso em: 04 mai. 2020.

BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. *Bases Cartográficas: Malhas Territoriais*. 2015. Disponível em: <https://mapas.ibge.gov.br/bases-e-referenciais/bases-cartograficas/malhas-digitais.html>. Acesso em: 08 jun. 2020.

BROMS, B.B., WONG, K.S. Landslides. In: FANG, H. Y. (eds) *Foundation Engineering Handbook*. Boston: Springer, 1991, p. 410-446.

CAPUTO, H. P.; CAPUTO, A. N. *Mecânica dos solos e suas aplicações: mecânica das rochas, fundações e obras de terra*. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC. Volume 2, 2015a.

CAPUTO, H. P.; CAPUTO, A. N. *Mecânica dos solos e suas aplicações: Fundamentos*. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC. Volume 1, 2015b.

CHIOSSI, N. J. *Geologia de engenharia*. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2013.

CRUDEN, D. M.; VARNES, D. J. Landslides types and processes. In: TURNER, A.K.; SCHUSTER, R. L. (eds.). *Landslides: investigation and mitigation*. Washington: Transportation Research Board Business Office, 1996. p. 36-75. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/269710331\\_CrudenDMVarnes\\_DJ1996\\_Landslide\\_Types\\_and\\_Processes\\_Transportation\\_Research\\_Board\\_US\\_National\\_Academy\\_of\\_Sciences\\_Special\\_Report\\_247\\_36-75](https://www.researchgate.net/publication/269710331_CrudenDMVarnes_DJ1996_Landslide_Types_and_Processes_Transportation_Research_Board_US_National_Academy_of_Sciences_Special_Report_247_36-75) . Acesso em: 03 abr. 2020.

DAS, Braja M. *Fundamentos de engenharia geotécnica*. 7. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2011.

DIETRICH, William E.; MONTGOMERY, David R. *SHALSTAB: a digital terrain model for mapping shallow landslide potential*. *Bekerley Geomorphology Group*, Berkeley, nov. 1998. Disponível em: <http://calm.geo.berkeley.edu/geomorph/shalstab/index.htm>. Acesso em: 12 maio 2020.

EGG, G. C. *Geração de Modelos Digitais de Superfícies Compostas Utilizando Imagens do Sensor PRISM/ALOS*, 2012. 177 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2012.

EISENBERGER, Cícero N. *Estudo do comportamento de um talude coluvionar urbano em Santa Cruz do Sul - RS*. 2003. 129 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/3555>. Acesso em: 04 mai. 2020.

ESRI Light Gray. ESRI - Environmental Systems Research Institute, 2020. Disponível em: <https://www.arcgis.com/home/item.html?id=8a2cba3b0ebf4140b7c0dc5ee149549a>. Acesso em: 23 nov. 2020.

ESRI Streets. ESRI - Environmental Systems Research Institute, 2013. Disponível em: <https://www.arcgis.com/home/item.html?id=e833fc01f447451f93ec0dfdf12eed7>. Acesso em: 12 ago. 2020.

ESRI Topographic. ESRI -Environmental Systems Research Institute, 2020. Disponível em: <https://www.arcgis.com/home/item.html?id=a1dc28de08e6447c8d14085fa15012e1>. Acesso em: 23 nov. 2020.

ESTACAS Brasil. *Laudos de Sondagens*. [Arquivos cedidos a] Andressa Abich. Santa Cruz do Sul, 2020.

FERNANDES, N. F.; AMARAL, C. P. Movimentos de massa: uma abordagem geológico-geomorfológica. In: GUERRA, A. J. T e CUNHA, S. B. (org.) *Geomorfologia e Meio Ambiente*. Rio de Janeiro: Bertrand, 1996, p. 123-194.

FERNANDES, N.F. *et al.* *Condicionantes geomorfológicos dos deslizamentos nas encostas: avaliação de metodologias e aplicação de modelo de previsão de áreas susceptíveis*. Revista Brasileira de Geomorfologia, v.2, n.1, p.51-71, 2001. DOI: 10.20502.

FIORI, A. P.; CARMIGNANI, L. *Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas: aplicação na estabilidade de taludes*. 2. ed. Curitiba: UFPR, 2009.

FITZ, Paulo Roberto. *Geoprocessamento sem Complicação*. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.

GERSCOVICH, Denise. *Estabilidade de taludes*. 2 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2016.

GOOGLE SATELLITE, 2020. Disponível em: <https://www.google.com/maps/search/google+satelite+2020>. Acesso em: 23 nov. 2020.

GOOGLE STREET VIEW, 2011. Disponível em: <https://www.google.com.br/maps/preview>. Acesso em: 09 Junho de 2020.

GREHS, S. A. *Mapeamento Geológico preliminar de Santa Cruz do Sul visando obter informação Básica ao Planejamento Integrado*. Acta Geológica Leopoldensia, São Leopoldo, v.1, n.1, p. 121-176, 1976.

GUIDICINI, G.; NIEBLE, C. M. *Estabilidade de taludes naturais e de Escavação*. 1 ed. São Paulo. Edgard Blucher, 1984.

GUIMARÃES, R. F. *et al.* *Fundamentação teórica do modelo matemático para revisão de escorregamentos rasos Shallow Stability*. Espaço e Geografia, Brasília, v.6, n.2, p.133-150, 07 fev. 2003. Semestral. Disponível em: <http://www.lsie.unb.br/espacoegeografia/index.php/espacoegeografia/article/view/31/30>. Acesso em: 13 jun. 2020.

HIGHLAND, L., *Landslides Types and processes*. U.S. Geological Survey, U.S.A, 2004. Disponível em: <https://pubs.usgs.gov/fs/2004/3072/pdf/fs2004-3072.pdf>. Acesso em: 21 abr. 2020.

HIGHLAND, L. M.; BOBROWSKY, Peter. *The landslide handbook—A guide to understanding landslides*. Reston, Virginia: U.S. Geological Survey Circular 1325, 2008.

HOPPE, Marcelino. *Dados Climatológicos de Santa Cruz do Sul*. Destinatário: Andressa Abich. Santa Cruz do Sul, 30 abr. 2020. 1 mensagem eletrônica.

KOBIYAMA, M. *et al.* *Prevenção de Desastres Naturais: Conceitos Básicos*. 1 ed. Florianópolis: Organic Trading, 2006.

LISTO, F. L. R. *Modelos matemáticos aplicados à previsão de escorregamentos translacionais rasos: exemplos em áreas naturais e de risco*. CLIO. Série Arqueológica (UFPE), v. 31, n. 3, p. 91-114, 2016. DOI: 10.20891.

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

MICHEL, Gean Paulo. *Modelagem de estabilidade de encostas com consideração do efeito da vegetação*. 2013. 159 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/107096>. Acesso em: 06. mai. 2020.

MONTGOMERY, D. R.; DIETRICH, W. E., *A Physically-Based Model for the Topographic Control on Shallow Landsliding*. Water Resources Research, v. 30, 1994. p.1153-1171.

MORENO, J. A. *Clima do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre, RS: Secretaria da Agricultura, 1961. 73p.

NORONHA, Fábio de Lima; MIZUSAKI, Ana Maria; BRESSANI, Luiz Antônio. *O mapeamento geológico-geomorfológico como uma ferramenta para obtenção de informações geotécnicas preliminares: estudo de caso na área urbana de Santa Cruz do Sul (RS)*. Pesquisas em Geociências, Porto Alegre, v. 39, n 02, p. 127-145, mai/ago. 2012.

NUMMER, A. V.; PINHEIRO, R. J. B. Dinâmica de Encosta: movimentos de massa. In: ROBAINA, L. E. S; TRENTIN, R. (org.). *Desastres Naturais no Rio Grande do Sul*. Santa Maria: Editora UFSM, 2013, p. 67-96.

ORTIGÃO, J. A. R. *Introdução à Mecânica dos Solos dos Estados Críticos*. 3 ed. Rio de Janeiro, RJ: Terratek, 2007.

PACHECO, Tèhrrrie Caroline Köning Ferraz. *Identificação e análise de áreas de suscetibilidade a deslizamentos de encostas em Campos do Jordão – SP utilizando o modelo SHALSTAB e imagens do Worldview-2*. 2018. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2018. Disponível em: <http://mtc-m21c.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m21c/2018/03.27.18.54/doc/publicacao.pdf>. Acesso em: 30 abr. 2020.

PINHEIRO, Rinaldo. J.B. *Estudo de alguns casos de instabilidade da encosta da Serra Geral no Estado do Rio Grande do Sul*. 2000. 342 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/118558>. Acesso em: 05 mai. 2020.

PINHEIRO, Rinaldo J. B.; NUMMER, Andréa V.; BRESSANI, Luiz A. *Análise da Instabilidade de uma encosta localizada na área urbana em Santa Cruz do Sul, RS*. Geociências, São Paulo, v. 31, n. 2, p. 159-174, 2012.

PINHEIRO, R.J.B. *et al. Investigação geotécnica de uma encosta na área urbana de Santa Cruz do Sul*. In: COBRAMSEG, 12, 2002, São Paulo. *Anais [...]*. São Paulo, 2002, v. 2, p. 1247-1257.

PINTO, Carlos de Sousa. *Curso Básico de Mecânica dos Solos*. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

PINTO, R.C.; PASSOS, E.; CANEPARO, S.C. *Considerações a respeito dos condicionantes utilizados em pesquisas envolvendo movimentos de massa*. Geoinjá, Maringá, v.5, n.1, p. 102-124, 2013.

PORTO, Leandro. Vídeo: Famílias ficam desabrigadas após deslizamento de encosta. *GAZ [online]*, Santa Cruz do Sul, 25 jul. 2019. Disponível em: [http://www.gaz.com.br/conteudos/regional/2019/07/25/150593-video\\_familias\\_ficam\\_desabrigadas\\_apos\\_deslizamento\\_de\\_encosta.html.php](http://www.gaz.com.br/conteudos/regional/2019/07/25/150593-video_familias_ficam_desabrigadas_apos_deslizamento_de_encosta.html.php). Acesso em: 29 abr. 2020.

QGIS. Versão 3.10.9 Livre. [S.l.]: Quantum Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project, 15 ago. 2020. Disponível em: <https://qgis.org/downloads/>. Acesso em: 03 mai. 2020.

QUEIROZ, Rudney C. *Geologia e Geotecnia básica para Engenharia Civil*. 1. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2016.

RAFFERTY, John P. *Geology: Landforms, Minerals, and Rocks. Minerals*. New York: Britannica Educational Publishing, 2012.

RAMME, E. J.; KRÜGER, C. M. *Delimitação de Bacias Hidrográficas com Auxílio de Geoprocessamento*. In: XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, São Paulo. *Anais [...]*. São Paulo, 2007.

RAMOS, A.M. *et al.* *Anuário Climático do Brasil - 2018*. Ano 01, n.1, 2019. Disponível em: [http://www.inpe.br/noticias/arquivos/pdf/anuarioClima2018\\_Final.pdf](http://www.inpe.br/noticias/arquivos/pdf/anuarioClima2018_Final.pdf). Acesso em: 06 mai. 2020.

RAMOS, V. M. *et al.* *Aplicação do modelo SHALSTAB, em ambiente arcview, para o mapeamento de áreas susceptíveis a escorregamento raso na região do Quadrilátero Ferrífero (MG)*. Espaço e Geografia, Brasília, v.5, n.1, p. 49-67, 22 jan. 2002. Semestral. Disponível em: <http://www.lsie.unb.br/espacoegeografia/index.php/espacoegeografia/article/view/14/13>. Acesso em: 13 jun. 2020.

REBELO, F. *Geografia física e riscos naturais*. Coimbra: Imprensa da Universidade de Coimbra, 2010.

ROBAÍNA, L. E. S.; OLIVEIRA, E. L. A. Bases Conceituais para o Estudo de Áreas de Risco em Ambientes Urbanos. In: ROBAINA, L. E. S; TRENTIN, R. (org.). *Desastres Naturais no Rio Grande do Sul*. Santa Maria: Editora UFSM, 2013, p. 21-35.

SANTA CRUZ DO SUL (RS). Lei Complementar nº 741, de 12 de Abril de 2019. Institui o Plano Diretor de Santa Cruz do Sul e dá outras providências. *Câmara de Vereadores*, Santa Cruz do Sul, RS, 12 de abr. 2019. 2019. Disponível em: <http://www.camarasantacruz.rs.gov.br/documento/lei-complementar-no-741-12-04-2019-40040>. Acesso em 04 mai. 2020.

SANTA CRUZ DO SUL. Deslizamento e queda de árvores que bloqueou a Rua João Werlang, Belvedere - Conjunto de ações preventivas, de socorro, assistenciais e recuperativas destinadas a evitar ou minimizar os desastres, preservar o moral da população e reestabelecer a normalidade social. *Defesa Civil - Santa Cruz do Sul*. Santa Cruz do Sul, RS, abr. 2011. Disponível em: <http://defesacivilsantacruz.blogspot.com/2011/07/deslizamento-e-queda-de-arvores-que.html>. Acesso em: 29 abr. 2020.

SANTA CRUZ DO SUL. Ocorrência de desmoronamento na Rua Antônio Assmann, Bairro Belvedere - Conjunto de ações preventivas, de socorro, assistenciais e recuperativas destinadas a evitar ou minimizar os desastres, preservar o moral da população e reestabelecer a normalidade social. *Defesa Civil - Santa Cruz do Sul*. Santa Cruz do Sul, RS, ago. 2013a. Disponível em: <http://defesacivilsantacruz.blogspot.com/2013/09/ocorrencia-de-desmoronamento-na-rua.html>. Acesso em: 29 abr. 2020.

SANTA CRUZ DO SUL. Ocorrência de desmoronamento no Bairro Belvedere - Conjunto de ações preventivas, de socorro, assistenciais e recuperativas destinadas a evitar ou minimizar os desastres, preservar o moral da população e reestabelecer a normalidade social. *Defesa Civil - Santa Cruz do Sul*. Santa Cruz do Sul, RS, set. 2013b. Disponível em: <http://defesacivilsantacruz.blogspot.com/2013/09/ocorrencia-de-desmoronamento-no-bairro.html>. Acesso em: 29 abr. 2020.

SANTA CRUZ DO SUL. Prefeitura Municipal. Localização, 2017. Disponível em: <https://www.santacruz.rs.gov.br/municipio/localizacao>. Acesso em: 03 mai. 2020.

SANTA CRUZ DO SUL. Prefeitura Municipal. Setor de Geoprocessamento e Topografia: Curvas de Nível. [Arquivos cedidos a] Andressa Abich. Santa Cruz do Sul, 2020.

SBROGLIA, R. M.; *et al.* Mapeamento de Áreas Suscetíveis a Deslizamentos Translacionais com o Uso da Ferramenta ASA - *Automatic Shalstab Analysis*. In: XII Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas, Florianópolis. *Anais [...]*. Florianópolis, 2017.

TABALIPA, L. K. *Aplicação do modelo SHALSTAB para o mapeamento de áreas suscetíveis a deslizamentos translacionais: estudo de caso em Jaraguá do Sul/ SC*. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/204568>. Acesso em: 08 jun. 2020.

TOMINAGA, L. K. Escorregamentos. In: TOMINAGA, L. K. (org.); SANTORO, J. (org.); AMARAL, R. (org.) *Desastres Naturais: conhecer para prevenir*. 1. ed. São Paulo: Instituto Geológico, v.01, 2009.

TRIOLA, Mario F. *Introdução à Estatística*. 12. ed. Rio Janeiro: LTC, 2017.

VIEIRA, B. C.; RAMOS H. *Aplicação do modelo SHALSTAB para mapeamento da suscetibilidade a escorregamentos rasos em Caraguatatuba, Serra do Mar (SP)*. Revista do Departamento de Geografia – USP, São Paulo, v. 29, p. 161-174, 2015.

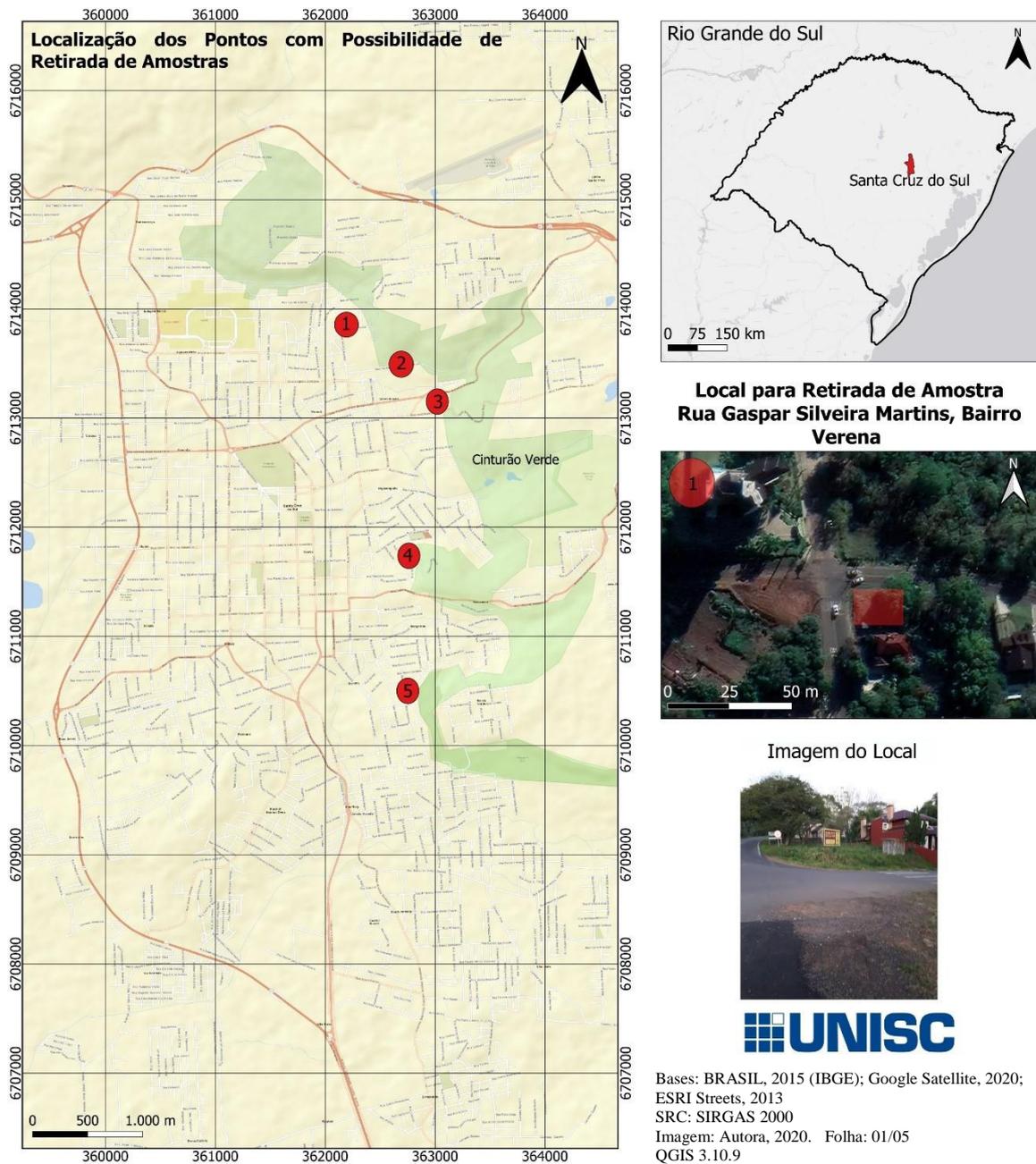
WENZEL, José Alberto. *Cinturão Verde e agora?* Santa Cruz do Sul: Editora Gazeta, 2013.

. *Mapeamento geológico estrutural geotécnico da zona urbana de Santa Cruz do Sul visando obter informação básica ao Planejamento Integrado*. Relatório Técnico. Santa Cruz do Sul: Prefeitura Municipal, 1996.

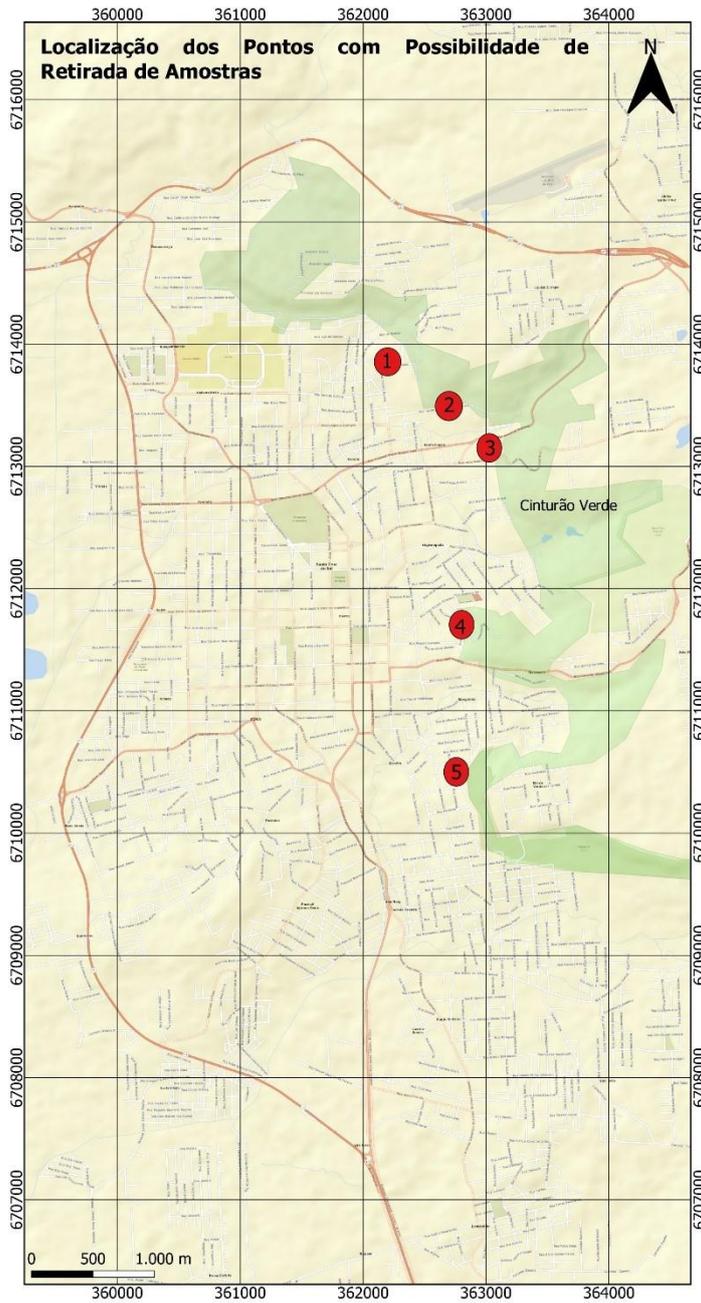
WERNER, Ernest D.; FRIEDMAN, Hugh P. (org.). *LANDSLIDES: Causes, Types and Effects*. New York: Nova Science Publishers, Inc., 2010.

## APÊNDICES

### APÊNDICE A –Localizações dos Pontos com Possibilidade de Retirada de Amostras



Fonte: Elaborado pela autora, 2020.



**Local para Retirada de Amostra  
Rua Dr. Alvaro Corrêa da Silva, Bairro  
Verena**



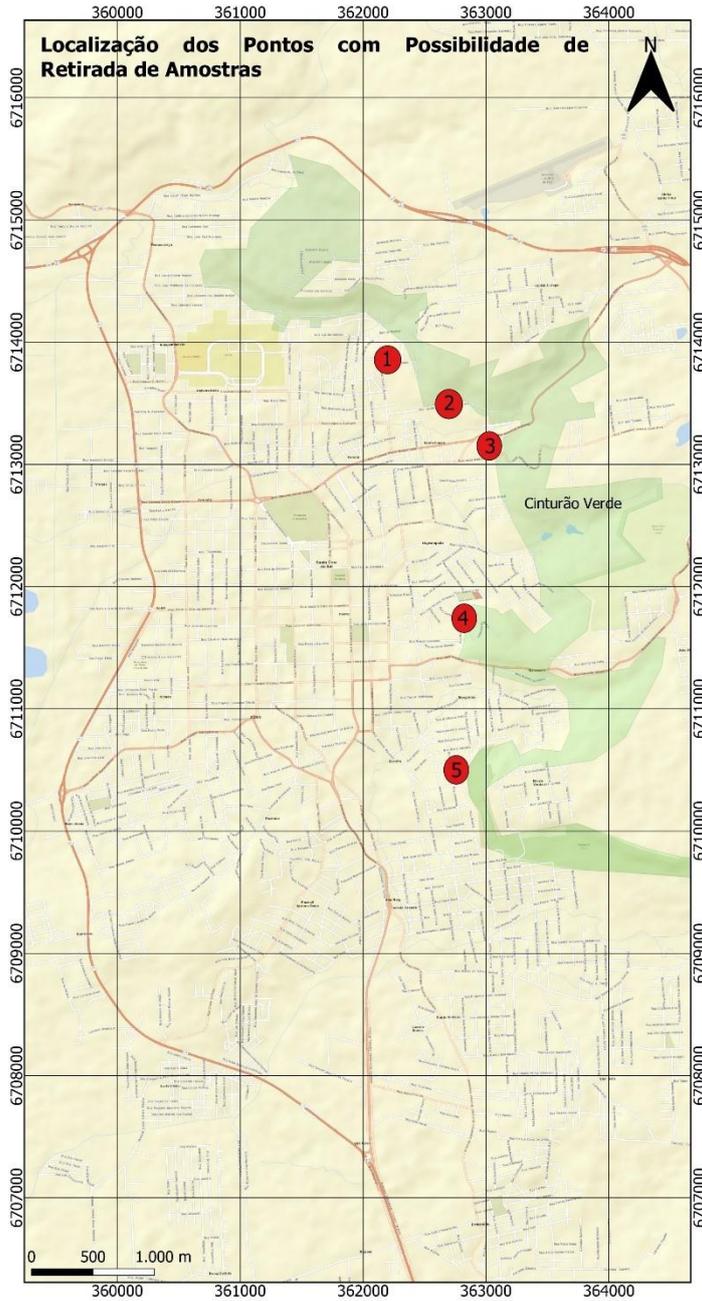
Imagem do Local



**UNISC**

Bases: BRASIL, 2015 (IBGE); Google Satellite, 2020;  
ESRI Streets, 2013  
SRC: SIRGAS 2000  
Imagem: Autora, 2020. Folha: 02/05  
QGIS 3.10.9

Fonte: Elaborado pela autora, 2020.



**Local para Retirada de Amostra  
Travessa Primeiro de Maio, Bairro  
Santo Inácio**

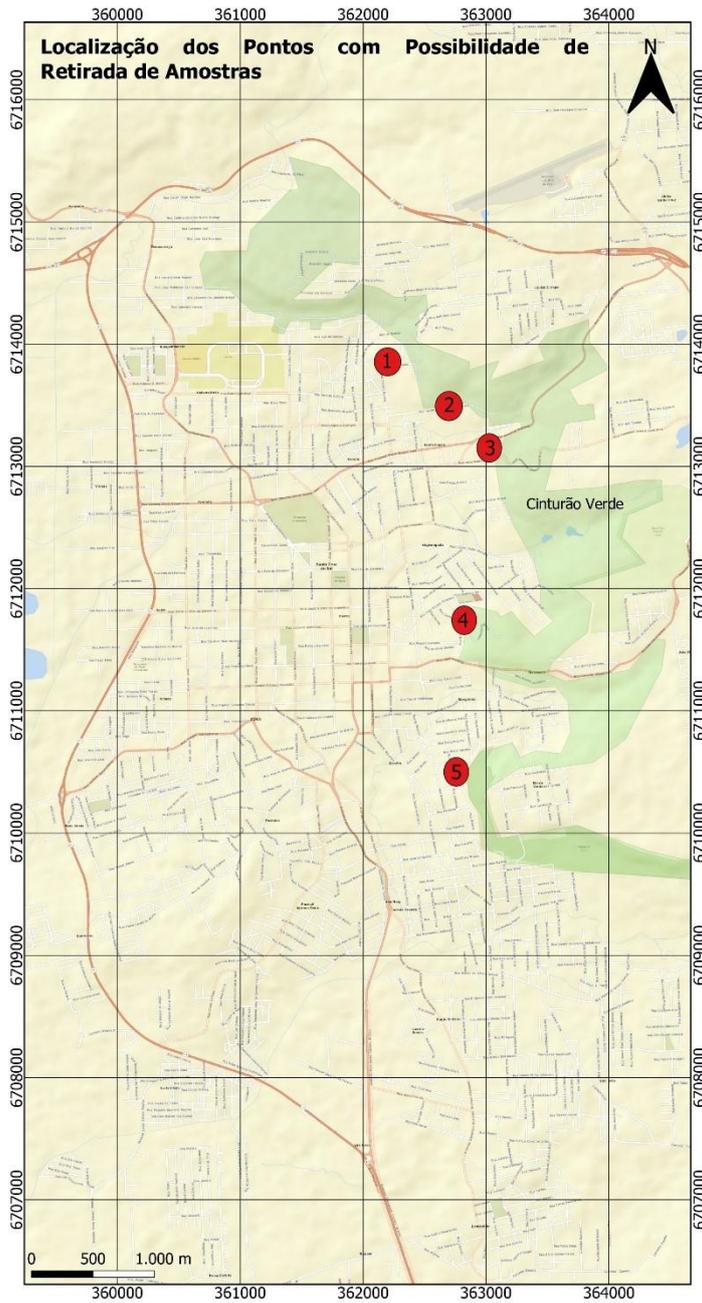


Imagem do Local



Bases: BRASIL, 2015 (IBGE); Google Satellite, 2020;  
ESRI Streets, 2013  
SRC: SIRGAS 2000  
Imagem: Autora, 2020. Folha: 03/05  
QGIS 3.10.9

Fonte: Elaborado pela autora, 2020.



**Local para Retirada de Amostra  
Rua Henrique Ott, Bairro Higienópolis**

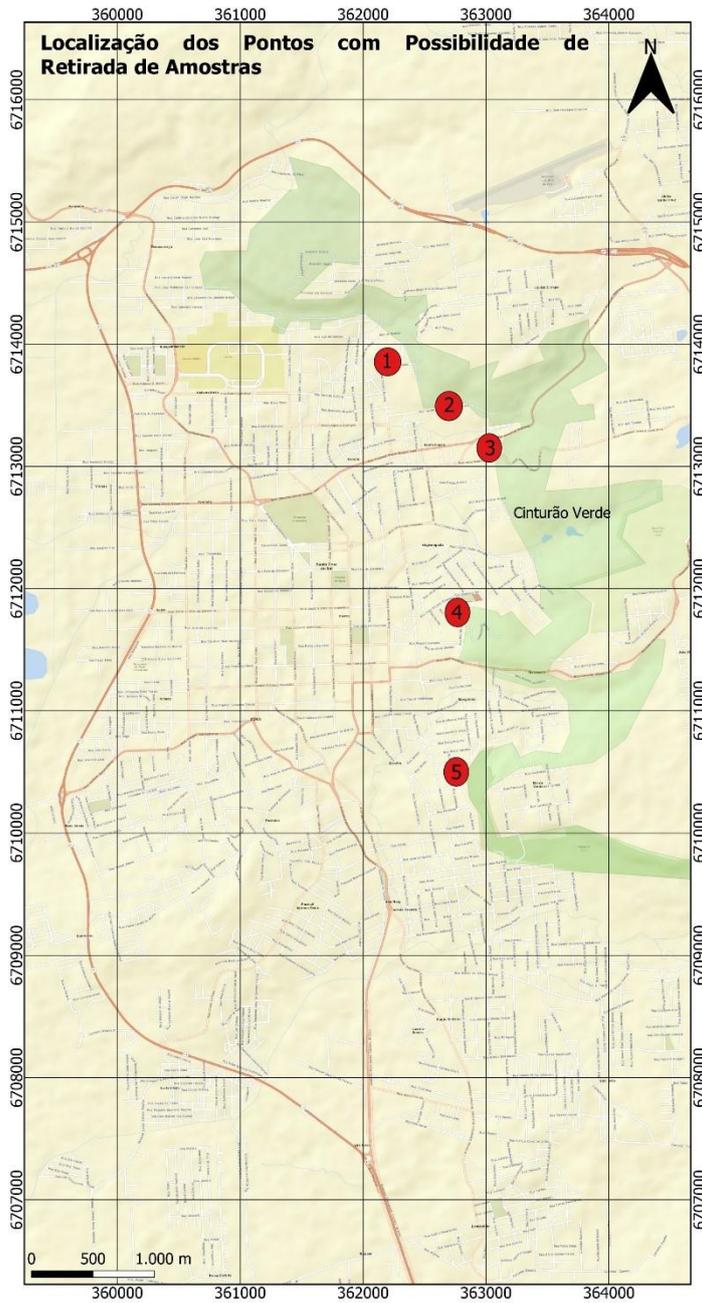


Imagem do Local



Bases: BRASIL, 2015 (IBGE); Google Satellite, 2020;  
ESRI Streets, 2013  
SRC: SIRGAS 2000  
Imagem: Google Street View, 2011. Folha: 04/05  
QGIS 3.10.9

Fonte: Elaborado pela autora, 2020.



**Local para Retirada de Amostra  
Rua do Moinho, Bairro Margarida**



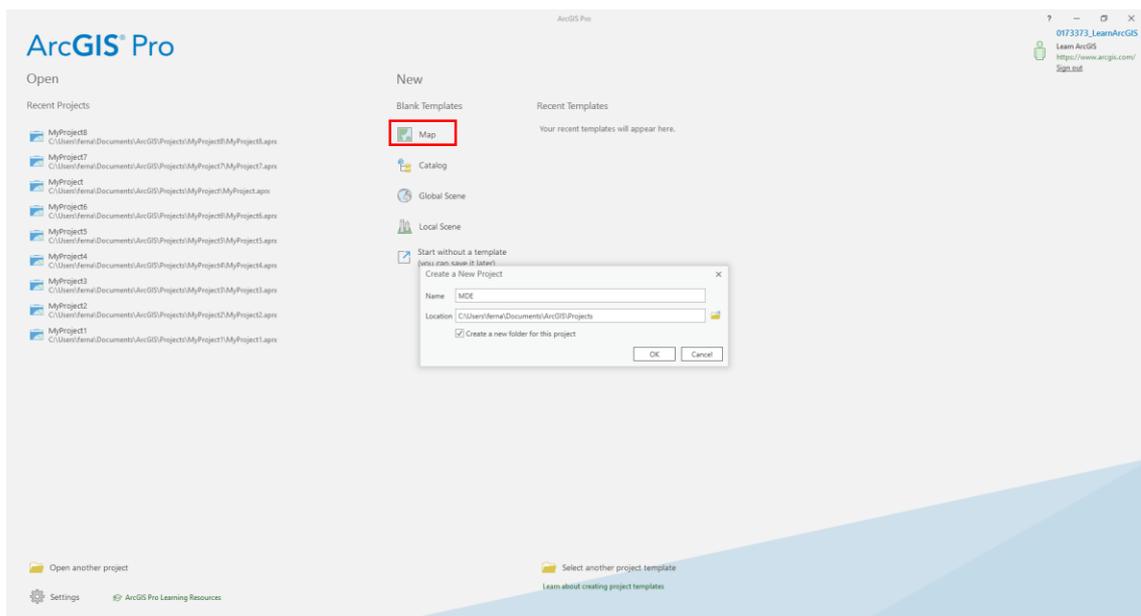
Bases: BRASIL, 2015 (IBGE); Google Satellite, 2020;  
ESRI Streets, 2013  
SRC: SIRGAS 2000  
Imagem: Autora, 2020. Folha: 05/05  
QGIS 3.10.9

Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

## APÊNDICE B – Procedimentos para Obtenção de Bacia Hidrográfica e MDE em SIG

Inicialmente, inicia-se o software ArcGIS Pro licença *Free 21-Day Trial*, disponibilizado no site da empresa ESRI (*Environmental Systems Research Institute*). O primeiro passo foi criar um novo projeto abrindo o *Map* e nomeando o projeto, conforme a Figura 1. A delimitação de uma bacia hidrográfica depende da criação de um MDE, portanto o projeto foi nomeado como MDE.

**Figura 1 - Interface do Programa**

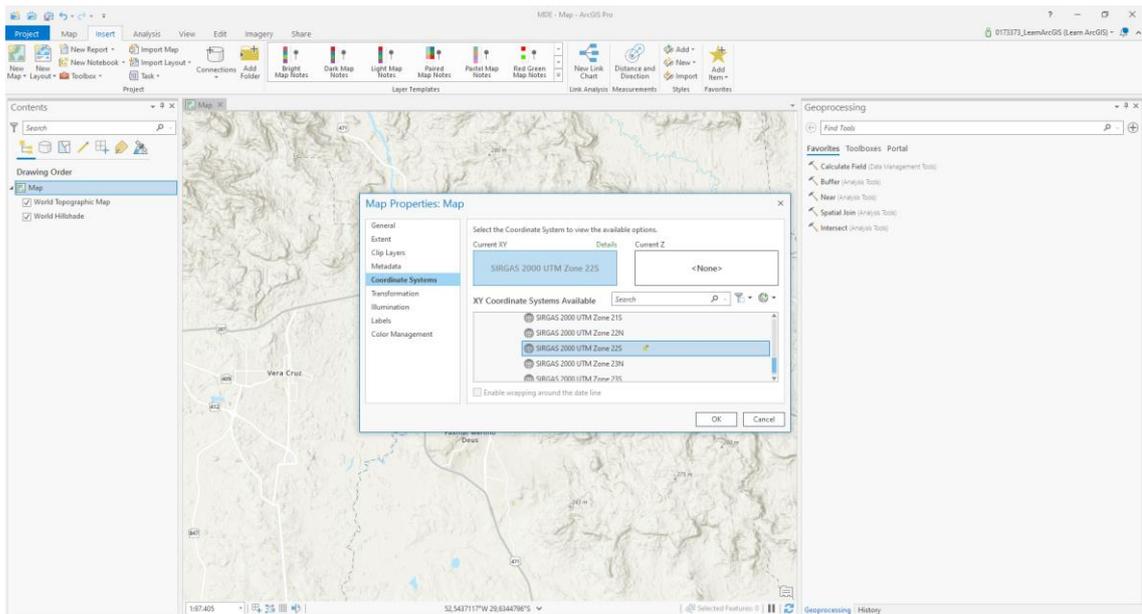


Fonte: ArcGis Pro, 2020.

O projeto abre automaticamente e então foi georreferenciado para o sistema de projeções adequado, neste caso SIRGAS 2000 UTM Zona 22S. Para isso foi necessário apertar com botão direito sobre o *“Map”* >> *“Properties”*. Selecionado o sistema (Figura 2).

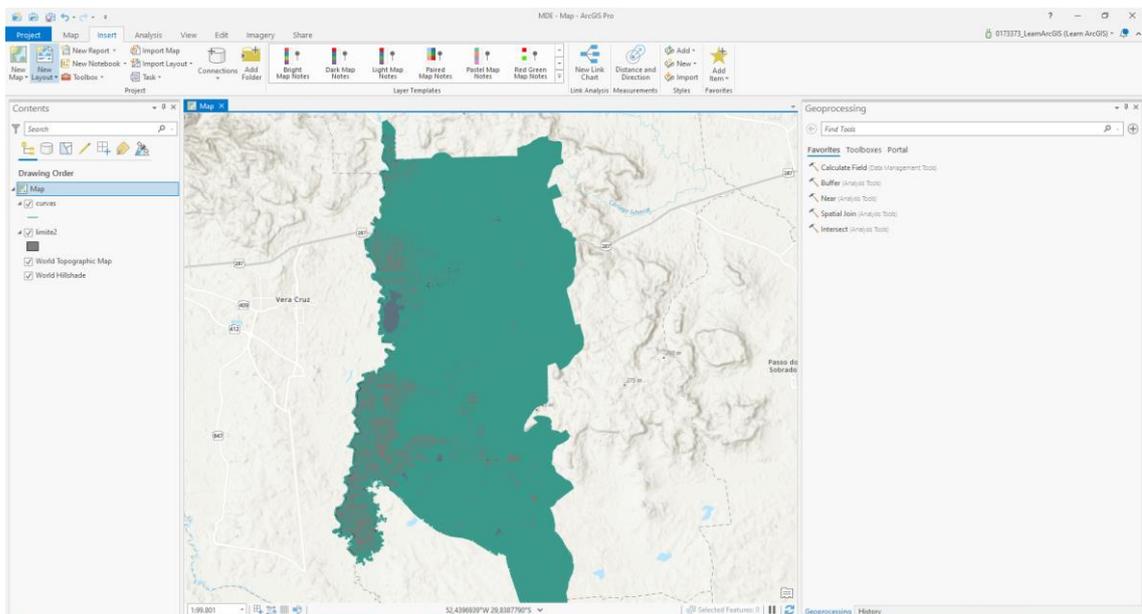
Após, foram adicionadas as camadas *shapefile* das curvas de nível e contorno da zona urbana disponibilizadas pelo Setor de Georreferenciamento da Prefeitura Municipal de Santa Cruz do Sul, ficando visíveis na janela *Contents* (Figura 3).

**Figura 2 - Escolhendo o Sistema de Coordenadas**



Fonte: ArcGis Pro, 2020.

**Figura 3 - Adicionando Camadas *shapefile***

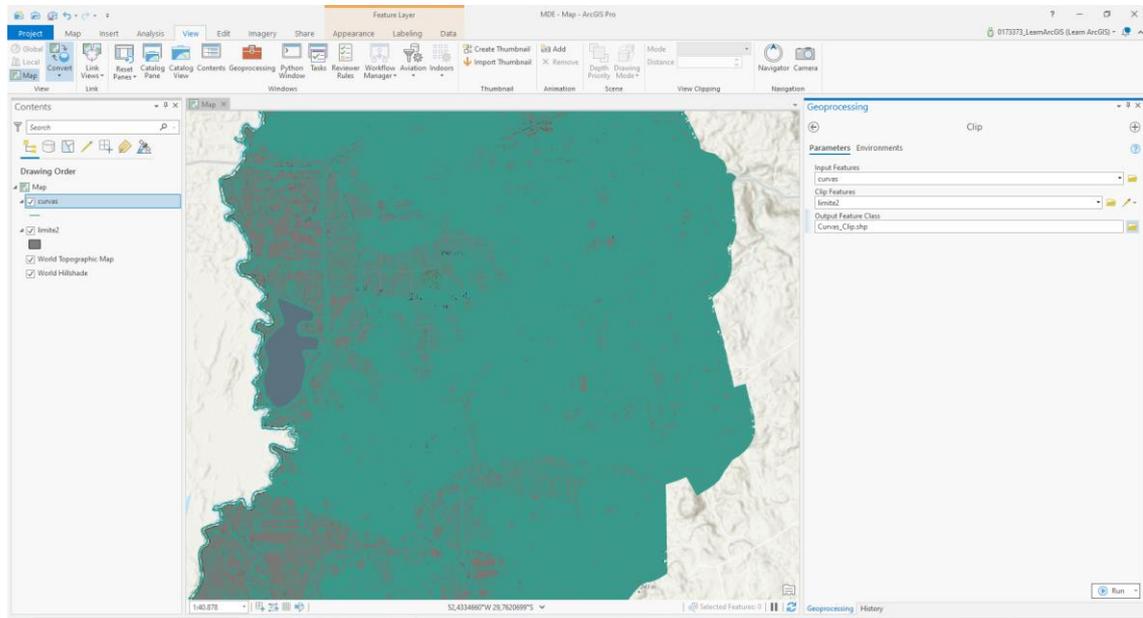


Fonte: ArcGis Pro, 2020.

Após, seguiu-se para a aba “*Analysis*” >> “*Tools*” para abrir a janela de ferramentas, escolhendo-se a ferramenta “*Clip*”. Esse procedimento recorta as curvas de nível dentro do polígono da zona urbana, para combinar os limites e deve ser realizado para que ao gerar o MDE não ocorram erros. Ao abrir a ferramenta, no campo “*Input Features*” deve-se inserir a camada que será recortada e no campo “*Clip Features*” a camada de limite do recorte, neste

caso o polígono da zona urbana do município. Em “*Output Features Class*” deve ser escolhido um local para salvar o resultado do procedimento, e então apertar “*Run*” (Figura 4).

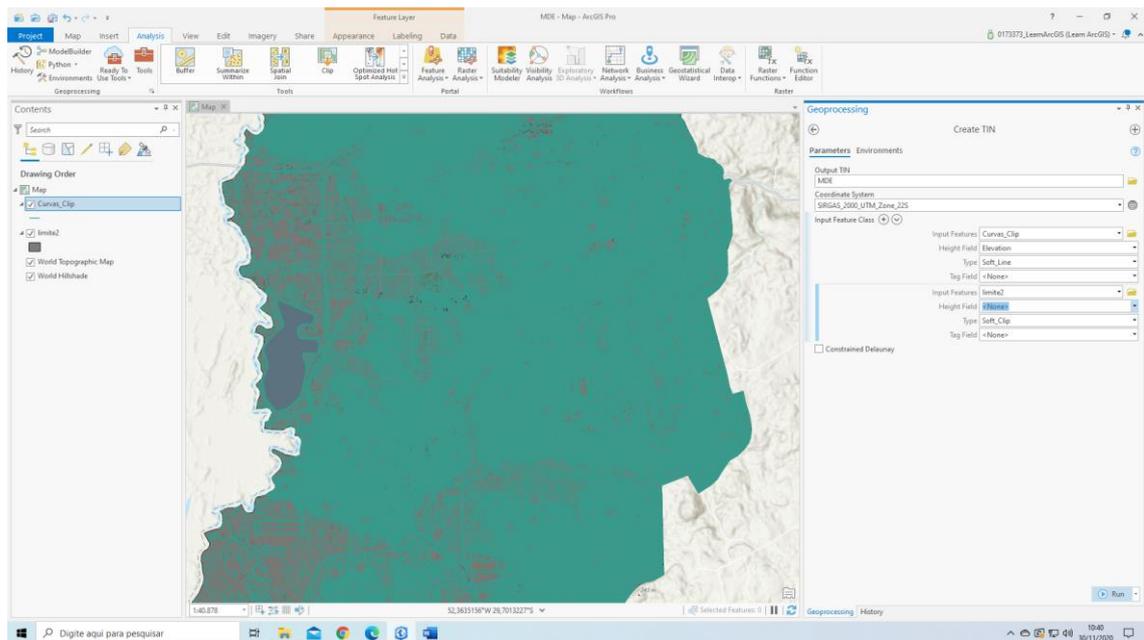
**Figura 4 - Ferramenta *Clip***



Fonte: ArcGis Pro, 2020.

O resultado é adicionado a janela “*Contents*” e já pode ser utilizado para trabalhar. Prosseguiu-se para *Analysis*” >> “*Tools*” >> “*Tin Dataset*” >> “*Create Tin*”. Ao abrir a ferramenta, no campo “*Output TIN*” foi escolhido um local para salvar o resultado. Selecionado o sistema de coordenadas. Em “*Input Features*” foi inserida a camada das curvas recortadas, em “*Height Field*” foi escolhido o campo contendo os dados de altimetria (*Elevation*) da tabela de atributos, e em “*Type*” foi escolhido o padrão para curvas mestras e intermediárias (*Soft Line*), do contrário (somente curvas mestras) *Hard Line*, demais dados conforme o padrão recomendado. Além deste dado de entrada deve ser considerado também o limite do município, seguindo os mesmos passos (Figura 5), pois esta camada delimita o MDE, do contrário, haveriam erros. A ferramenta foi acionada ao clicar “*Run*”.

**Figura 5 - Criação de MDE**

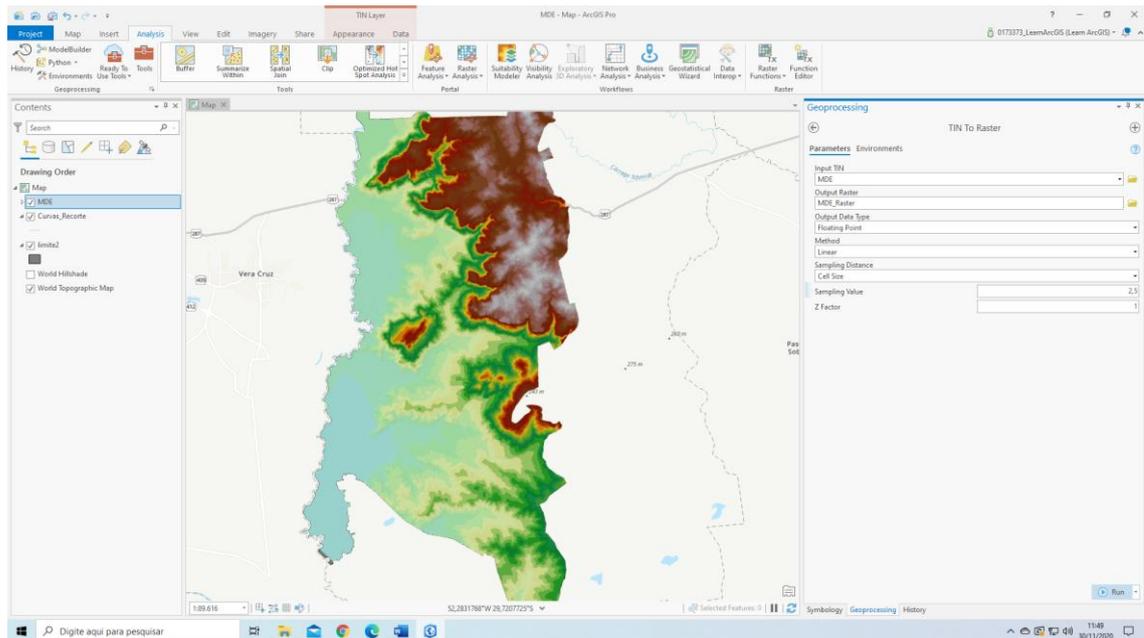


Fonte: ArcGis Pro, 2020.

Após esse passo, um MDE foi gerado e convertido para formato *raster* através da ferramenta *Analysis* >> *Tools* >> *Tin Dataset* >> *TIN to Raster*. Ao abrir a ferramenta, no campo *Input TIN* foi adicionado o MDE criado anteriormente, em *Output Raster* foi escolhido um local para salvar o resultado. Os demais dados seguiram o padrão recomendado. Como o arquivo era pesado, não processou corretamente, então foram refeitos os passos anteriores e escolhidas utilizar somente as curvas de nível de intervalo 2,5 m, em *Cell Size* é definido o tamanho da célula do *pixel* conforme o intervalo das curvas de nível. Selecionado o sistema de coordenadas.

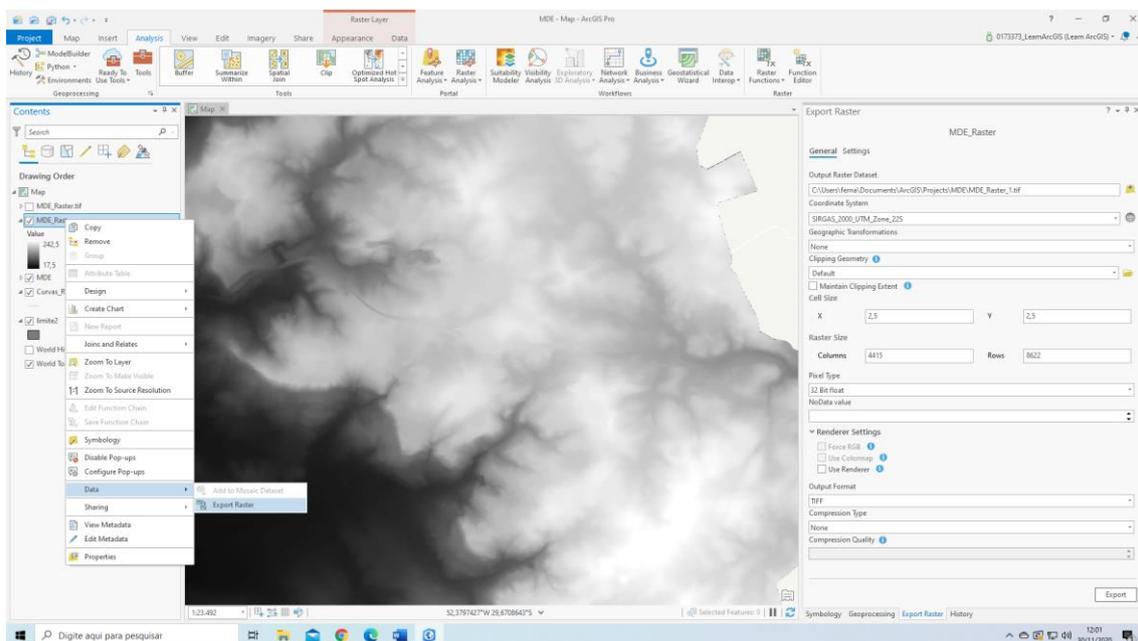
A ferramenta é acionada ao clicar *Run* (Figura 6). Após o resultado foi exportado em extensão *GeoTIFF*, clicando sobre a camada com botão direito >> *Data* >> *Export Data*. Em *Output Raster Dataset* foi escolhido um local para salvar o resultado, selecionado o sistema de coordenadas, em *Output Format* foi escolhido *TIFF* e então acionado o botão *Export* (Figura 7). Assim foi criado um MDE em formato *raster*.

**Figura 6 - Criando Raster**



Fonte: ArcGis Pro, 2020.

**Figura 7 - Exportando para *GeoTIFF***



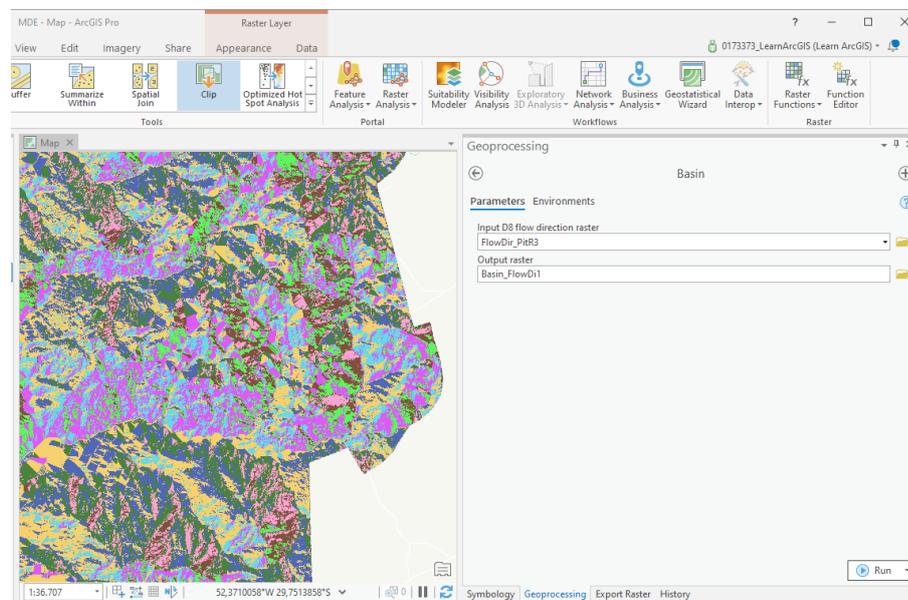
Fonte: ArcGis Pro, 2020.

## Delimitação de Bacia Hidrográfica

Na aba *Analysis* >> *Tools* >> *Spatial Analyst Tools* >> *Hydrology* >> *Fill* é aberta uma ferramenta para correção de possíveis imperfeições. Em *Input surface raster* foi adicionada à camada raster salva em *TIFF* anteriormente. Em *Output surface raster* foi

escolhido um local para salvar o resultado. A ferramenta foi acionada ao clicar “**Run**”. Da camada corrigida seguiu-se para *Analysis*” >> “*Tools*” >> “*Spatial Analyst Tools*” >> “*Hydrology*” >> “*Flow Direction*”, onde em “*Input surface raster*” foi adicionada a camada corrigida, e em “*Output flow direction raster*” foi escolhido um local para salvar o resultado. Em “*Type*” foi escolhido o modo D8 (oito direções de fluxo). A ferramenta foi acionada ao clicar “**Run**”. Após, seguiu-se para *Analysis*” >> “*Tools*” >> “*Spatial Analyst Tools*” >> “*Hydrology*” >> “*Basin*”, onde em “*Input D8 flow direction raster*” foi escolhida a camada criada anteriormente e em “*Output raster*” foi escolhido um local para salvar o resultado. A ferramenta foi acionada ao clicar “**Run**” (Figura 8).

**Figura 8 - Delimitando as Bacias**

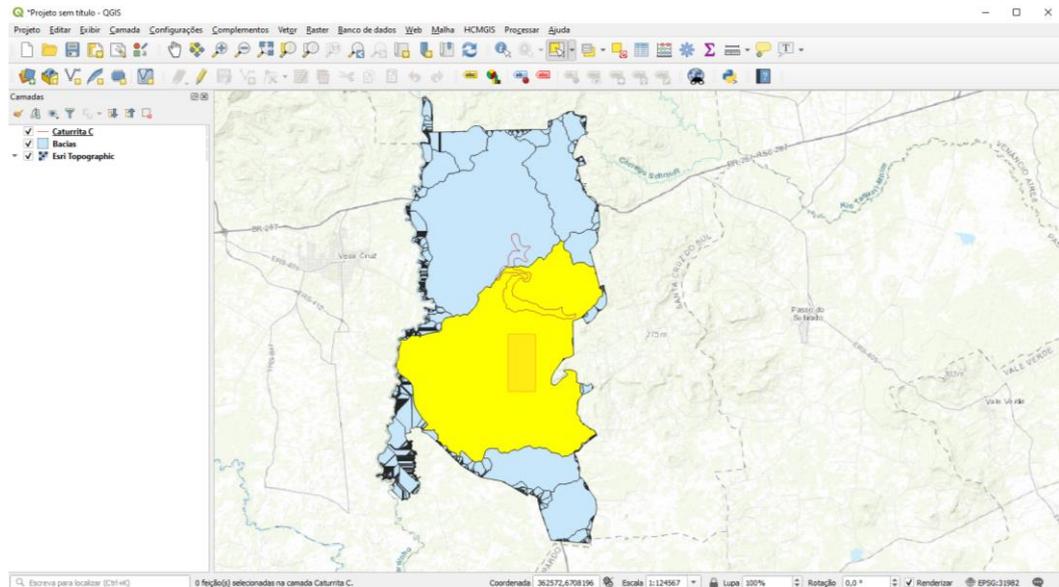


Fonte: ArcGis Pro, 2020.

O resultado é gerado e então o raster da bacia é convertido para o formato vetorial (polígono) através da aba *Analysis*” >> “*Tools*” >> “*Conversion Tools*” >> “*From Raster*” >> “*Raster to Polygon*”. Ao abrir a ferramenta, em “*Input raster*” foi adicionada a camada das bacias criada anteriormente, em “*Field*” foi escolhido o contorno como dado para criar os polígonos (*COUNT*), em “*Output polygon features*” foi escolhido um local para salvar o resultado. Em “**Run**” foi acionada a ferramenta.

O último arquivo gerado foi aberto na ferramenta QGis 3.10.9, versão livre, para criar um arquivo somente da bacia que envolve a área de estudo. Dessa forma o software foi inicializado e adicionada a camada de bacias em formato vetorial criada anteriormente e a camada da área de estudo Unidade Geotécnica Caturrita C (Figura 9).

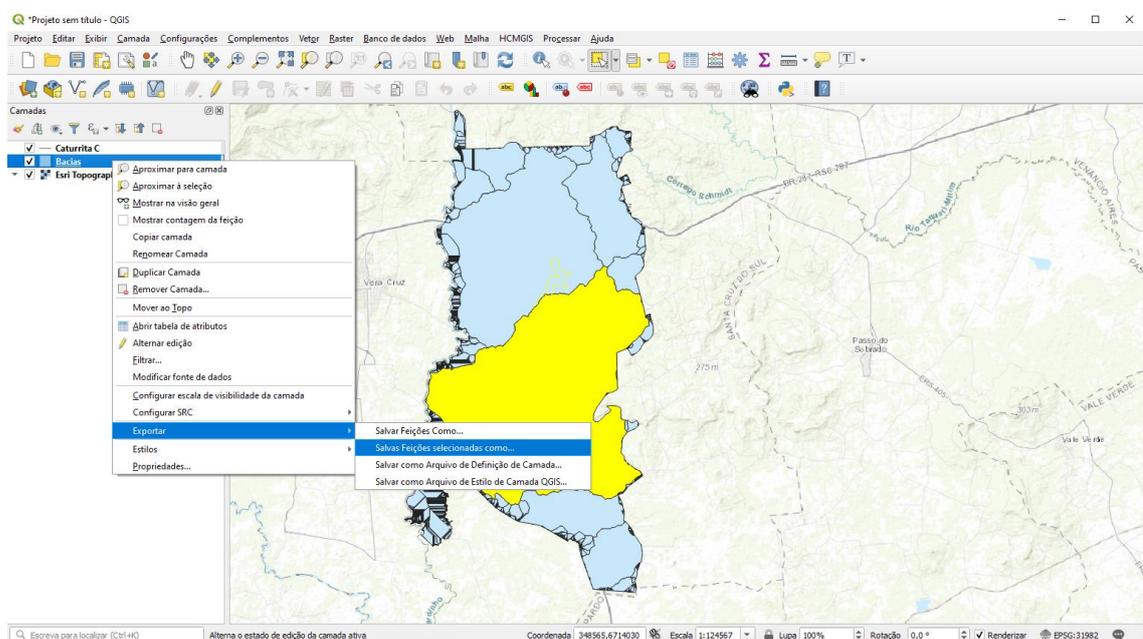
**Figura 9 - Escolhendo a Bacia da Área de Estudo**



Fonte: QGIS 3.10.9, 2020.

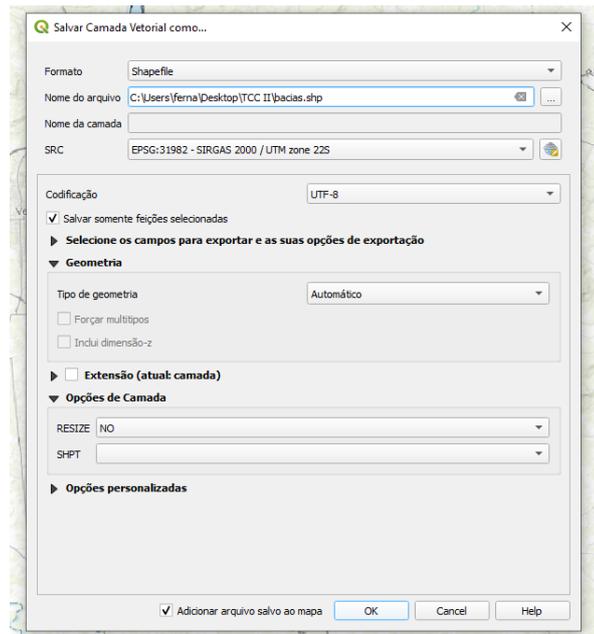
A bacia selecionada que contém a área de estudo foi exportada em *shapefile* clicando com o botão direito sobre a camada de bacias >> “Exportar” >> “Salvar feições selecionadas como” (Figura 10) e então escolhido o formato, dado um nome e um local de destino, selecionado o sistema de coordenadas e selecionado “Ok” para processar (Figura 11).

**Figura 10 – Procedimento para salvar a Bacia de Interesse**



Fonte: : QGIS 3.10.9, 2020.

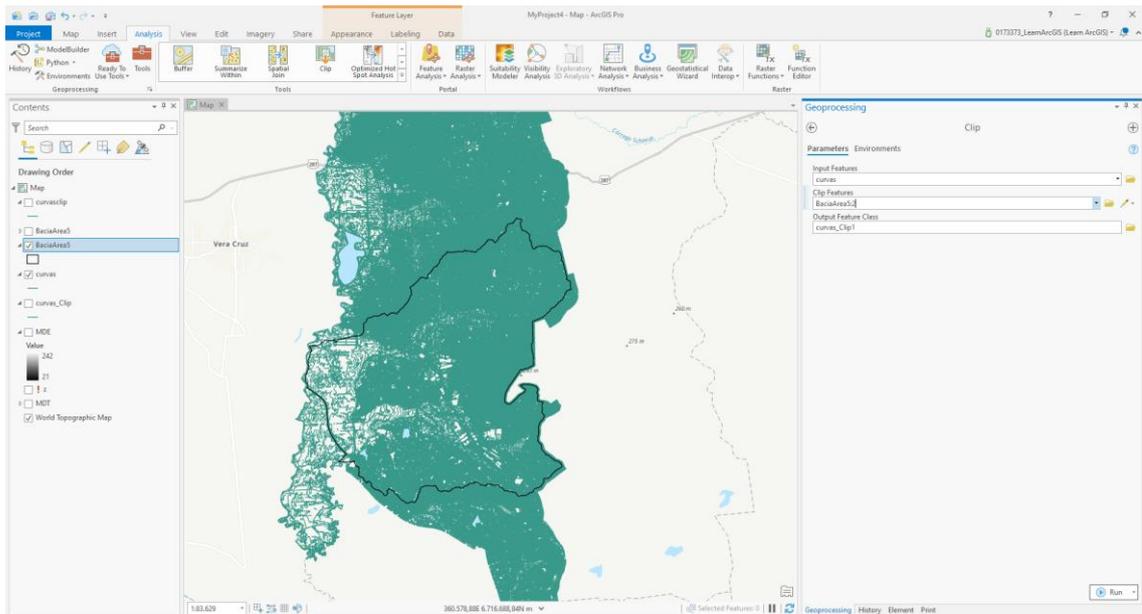
**Figura 11 - Janela para o Procedimento**



Fonte: : QGis 3.10.9, 2020.

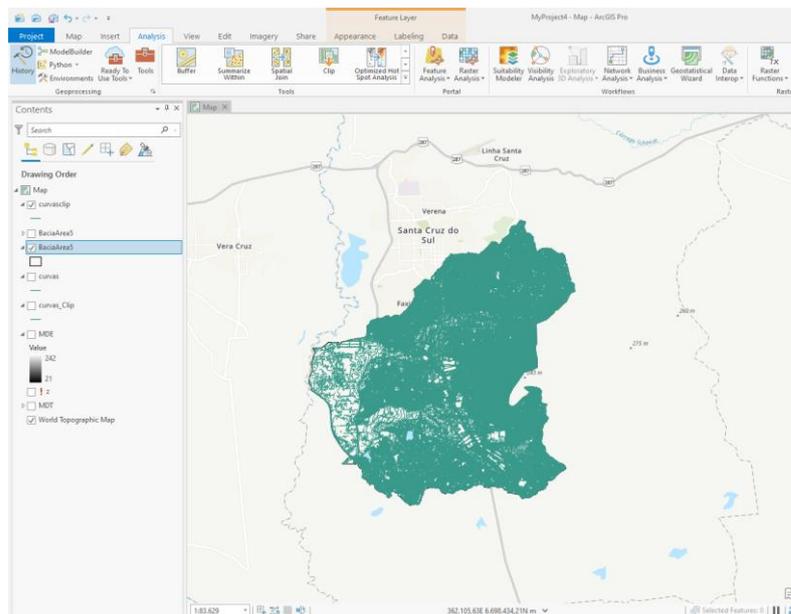
Após este procedimento, a camada *shapefile* da bacia isolada criada anteriormente foi adicionada ao ArcGis Pro, para gerar um MDE somente da Bacia Hidrográfica da área de Estudo, dessa vez com as curvas de nível com intervalo de 0,5 m, pois por ser uma área menor não houveram problemas na execução. Os procedimentos iniciam conforme já é indicado no início do APÊNDICE B. Na aba “*Analysis*” >> “*Tools*” na janela de ferramentas escolheu-se a ferramenta “*Clip*”. Ao abrir a ferramenta, no campo “*Input Features*” inseriu-se a camada que será recortada (curvas de nível) e no campo “*Clip Features*” a camada de limite do recorte, desta vez a bacia hidrográfica delimitada. Em “*Output Features Class*” foi escolhido um local para salvar o resultado do procedimento, e então clicou-se em “*Run*” (Figura 12). O resultado do recorte das curvas para a bacia em questão pode ser observado na Figura 13, e a partir daí segue-se para os passos já esquematizados neste apêndice, estando pronto o MDE no procedimento que antecede o início da metodologia adotada para geração de bacias hidrográficas.

**Figura 12 - Ferramenta “Clip” para os Limites da Bacia**



Fonte: ArcGis Pro, 2020.

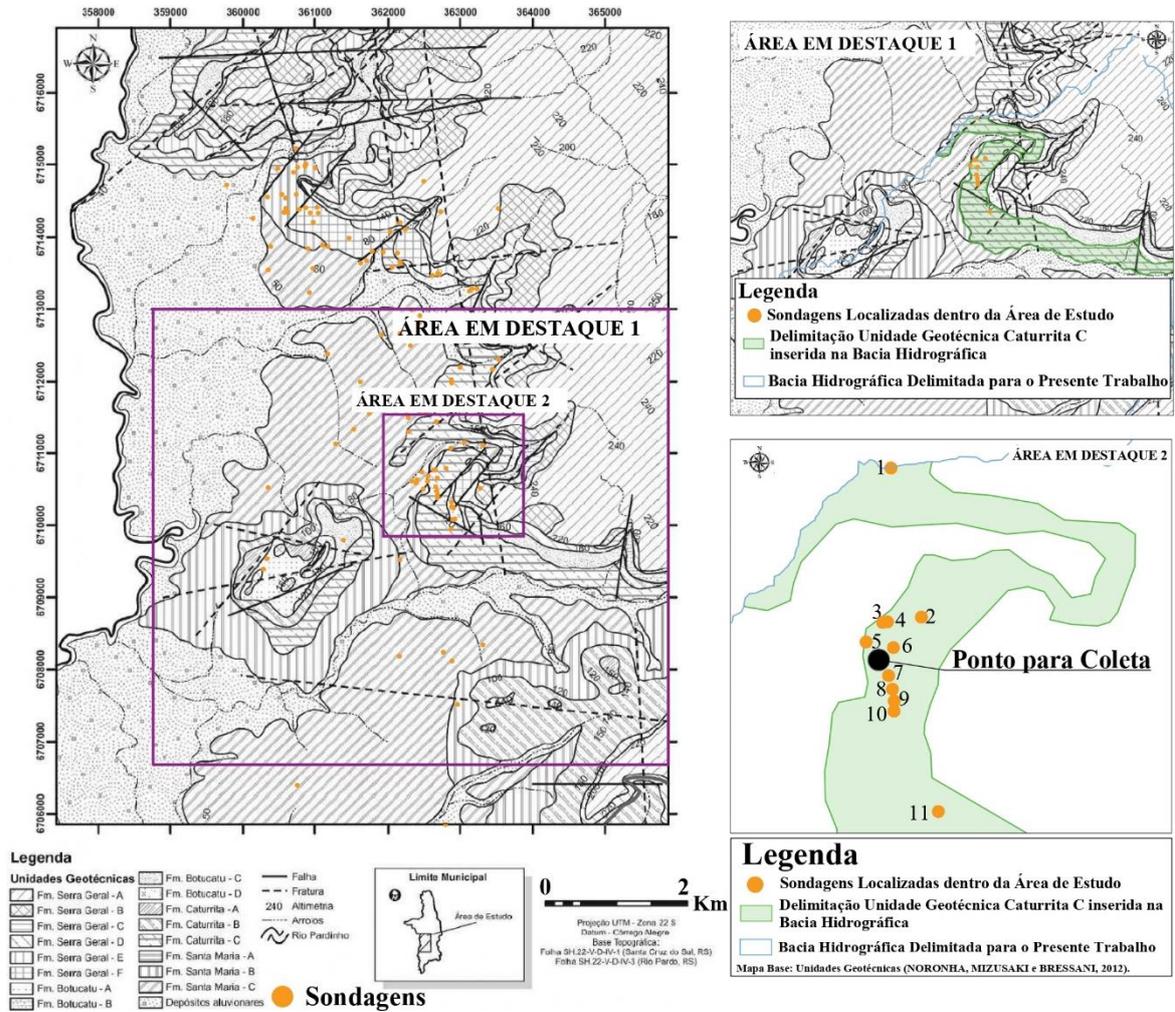
**Figura 13 - Resultado do Procedimento "Clip"**



Fonte: ArcGis Pro, 2020.

A delimitação de uma bacia foi necessária pois não haviam arquivos digitais contendo essas informações. O modelo ASA necessita de um MDE de uma bacia hidrográfica para rodar os cálculos, a partir do MDE o modelo aciona automaticamente as ferramentas “*Spatial Analyst Tools*” >> “*Hidrology*” >> “*Fill*”; “*Spatial Analyst Tools*” >> “*Hidrology*” >> “*Flow direction*”; “*Spatial Analyst Tools*” >> “*Hydrology*” >> “*Flow Accumulation*”. Portanto, os procedimentos adotados neste trabalho são compatíveis com o modelo.

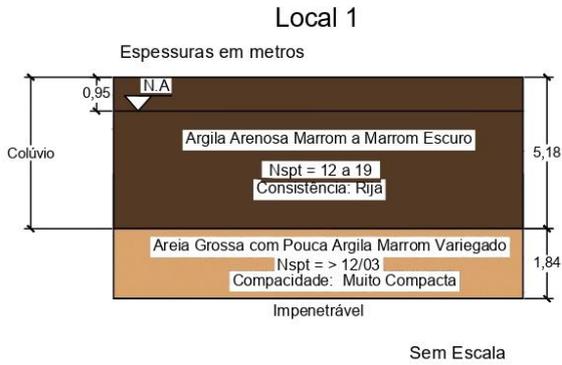
### APÊNDICE C – Mapa de Geoespacialização das Sondagens



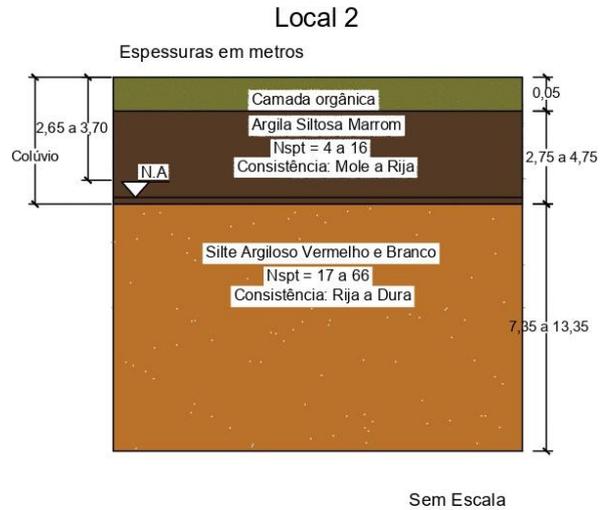
Fonte: Elaborado pela autora, adaptado de Noronha, Mizusaki e Bressani, 2012.

APÊNDICE D – Perfis Esquemáticos dos Boletins de Sondagens

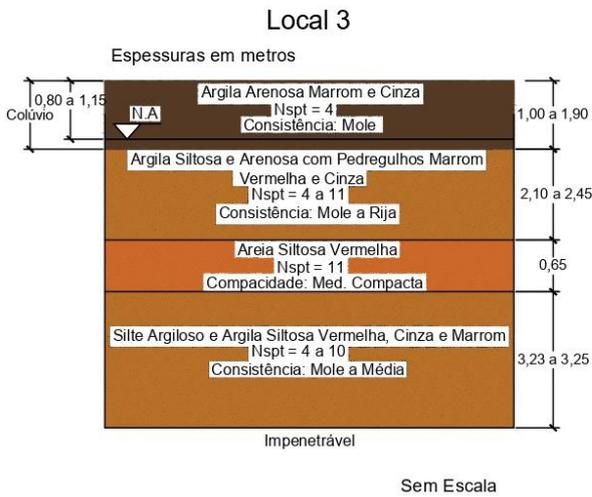
PERFIL ESQUEMÁTICO



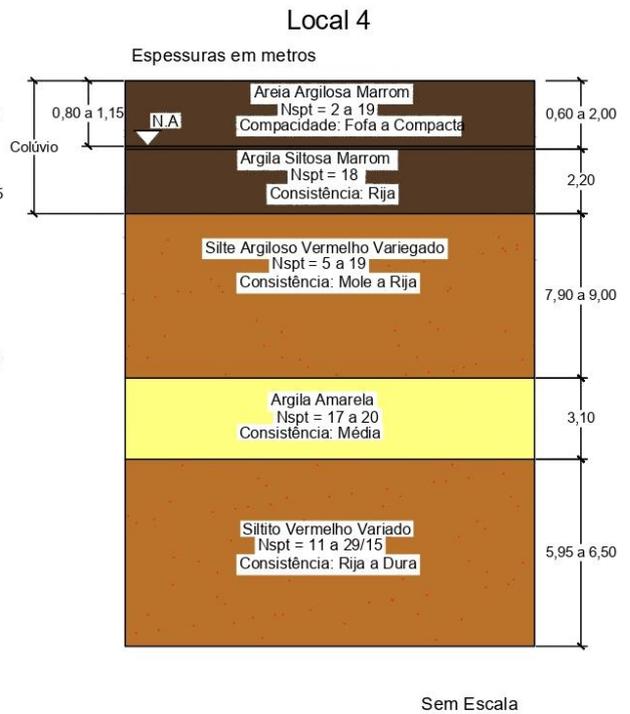
PERFIL ESQUEMÁTICO



PERFIL ESQUEMÁTICO



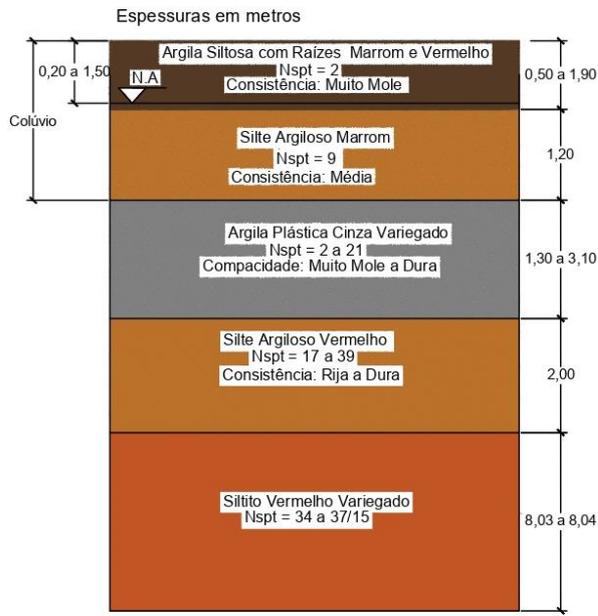
PERFIL ESQUEMÁTICO



Fonte: Autora, 2020.

PERFIL ESQUEMÁTICO

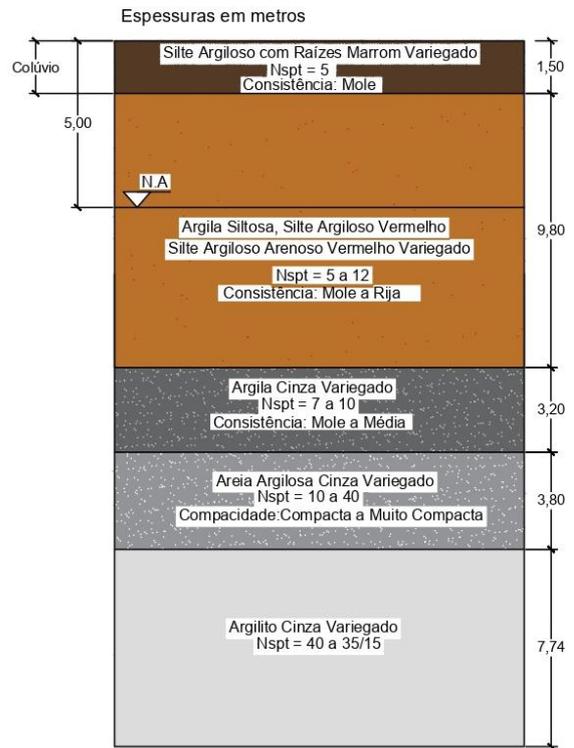
Local 5



Sem Escala

PERFIL ESQUEMÁTICO

Local 6



Sem Escala

PERFIL ESQUEMÁTICO

Local 7

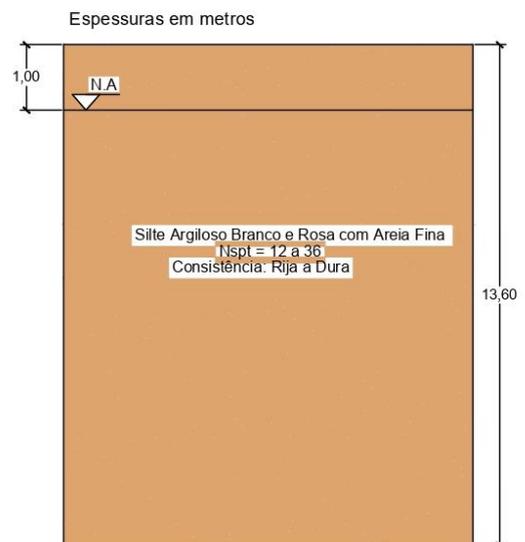


Impenetrável

Sem Escala

PERFIL ESQUEMÁTICO

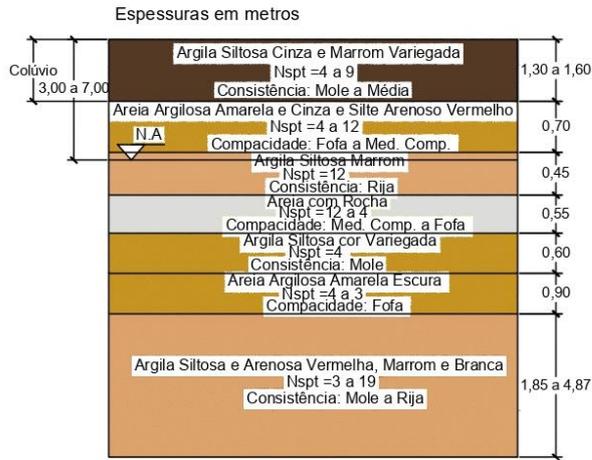
Local 8



Sem Escala

PERFIL ESQUEMÁTICO

Local 9



Sem Escala

PERFIL ESQUEMÁTICO

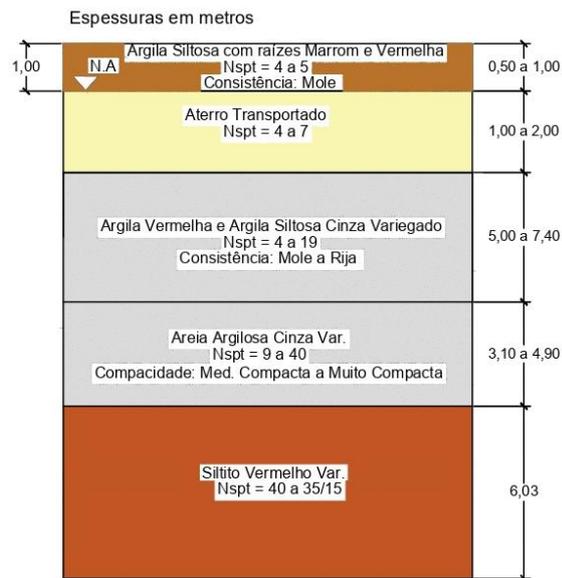
Local 10



Sem Escala

PERFIL ESQUEMÁTICO

Local 11



Sem Escala

Fonte: Autora, 2020.

## APÊNDICE E – Aplicação do Modelo *Automatic SHALSTAB Analysis* (ASA)

Para aplicação do modelo é necessário baixar o *plugin* disponível no endereço: <https://www.arcgis.com/home/item.html?id=db284030a80644c3a99a21c4d4500956>.

A instalação é automática. O procedimento seguiu a metodologia descrita por Sbroglia, *et al.* (2017), que idealizaram a ferramenta para ArcGis Pro. Para rodar o modelo foi necessário criar uma pasta para os dados de entrada. O presente estudo envolveu três combinações de parâmetros do solo, portanto, foram criadas três pastas (Figura 1), para organizar cada dado de entrada.

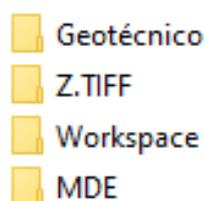
**Figura 1 - Criação das Pastas**



Fonte: Autora, 2020.

Em cada pasta criada foram inseridos os parâmetros de entrada do modelo, sendo eles a camada raster do MDE, criada conforme o APÊNDICE B, uma pasta vazia para rodar os cálculos do programa nomeada *Workspace*, uma camada em formato vetorial, com extensão *shapefile* da bacia hidrográfica contendo os parâmetros de coesão (kPa), densidade (kg/m<sup>3</sup>), profundidade da camada (m) e ângulo de atrito do solo (°) (Geotécnico). Além destes, o modelo exige como parâmetro de entrada um arquivo formato *raster* com extensão *GeoTIFF* da camada de espessura do solo novamente (Figura 2).

**Figura 2 - Dados de Entrada**

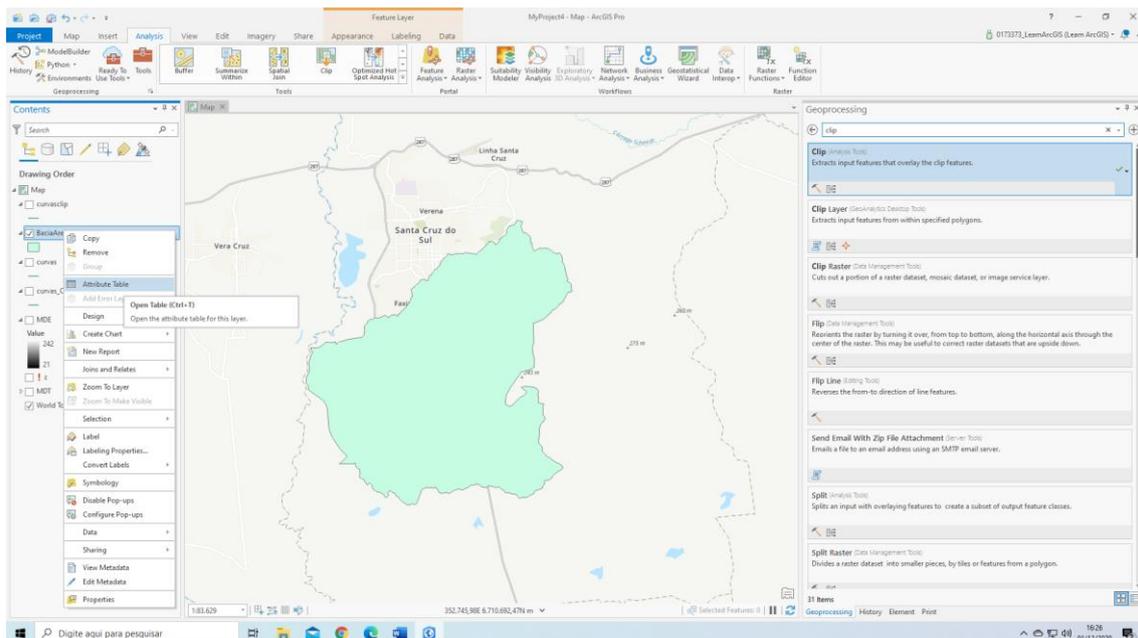


Fonte: Autora, 2020.

Como o MDE já foi desenvolvido durante os procedimentos do APÊNDICE B e a pasta *Workspace* é uma pasta limpa para a ferramenta realizar os cálculos, restam apenas gerar a camada geotécnica com os dados de entrada e a camada *z.tif* com o dado de profundidade.

Para isso, a camada da bacia em formato vetorial criada anteriormente conforme o APÊNDICE B, foi adicionada no ArcGis e feito clique com o botão direito sobre a camada e aberta a “*Atributed Table*” (tabela de atributos) (Figura 3).

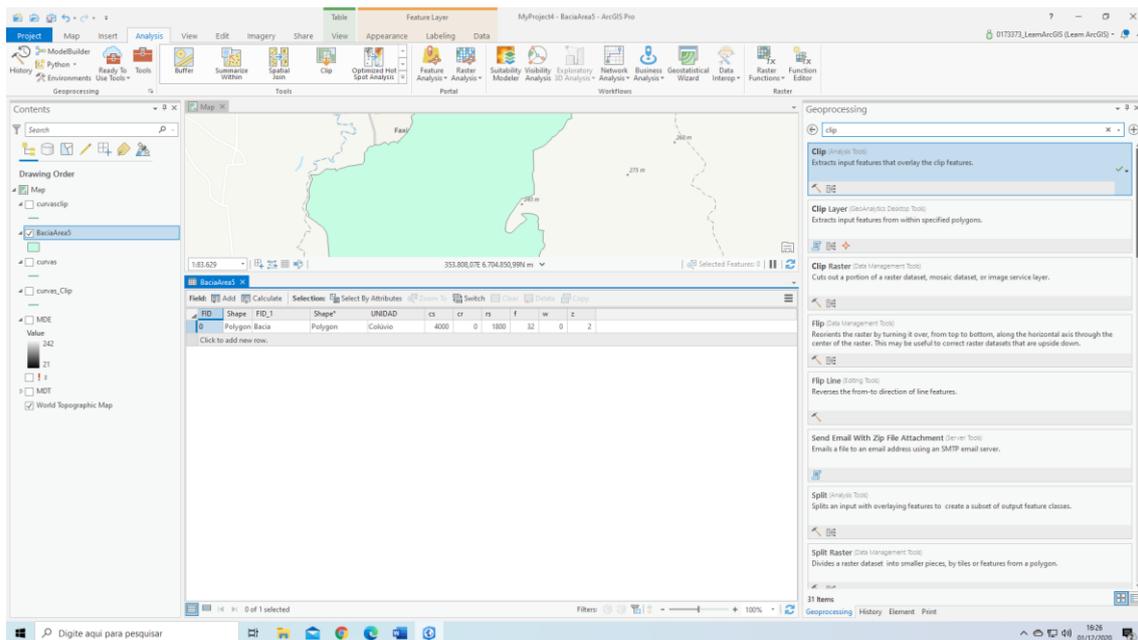
**Figura 3 - Abrindo a Tabela de Atributos**



Fonte: ArcGis Pro, 2020.

Após, dentro da tabela de atributos é possível editar e adicionar campos e assim atribuir uma valor para cada parâmetro, sendo *cs* – coesão do solo ( $N/m^2$ ), *cr* – coesão das raízes ( $N/m^2$ ), *rs* – densidade do solo ( $kg/m^3$ ), *f* - ângulo de atrito( $^{\circ}$ ), *w* – peso da vegetação ( $N/m^2$ ) e *z* – profundidade de análise (m) (Figura 4 – valores ilustrativos).

Figura 4 - Tabela de Atributos

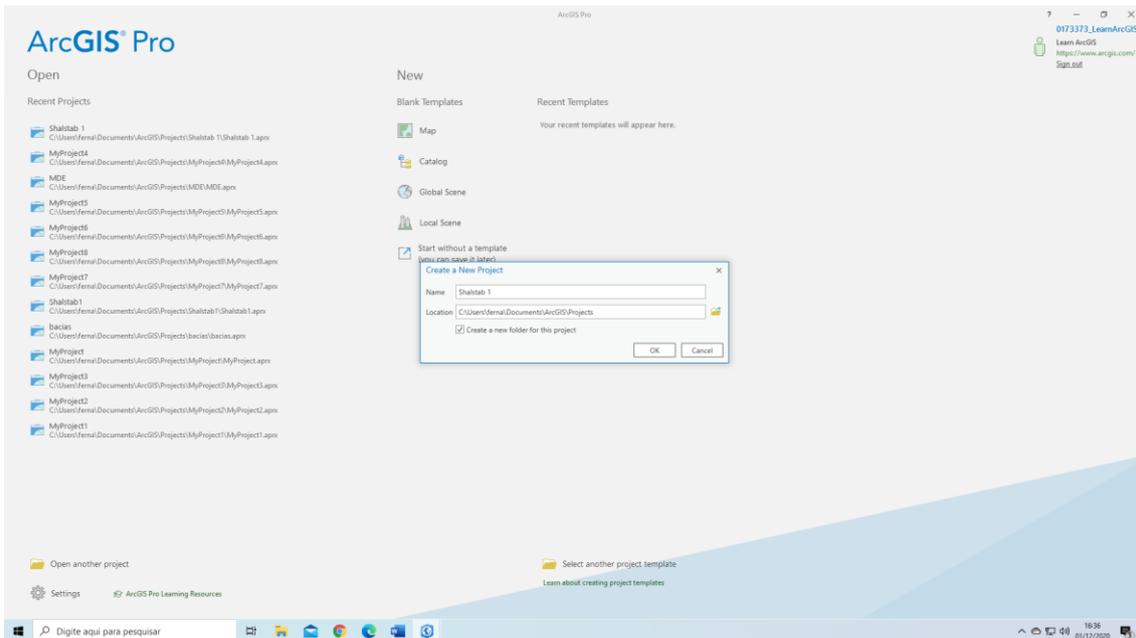


Fonte: ArcGIS Pro, 2020.

Para gerar a camada *z.tiff* foi realizado o comando **Analysis** >> **Tools** >> **Conversion Tools** >> **From Raster** >> **Polygon to Raster**, onde no campo **Input Features** foi adicionada a camada geotécnica da bacia, em **Value Field** foi selecionado o campo “z” da tabela de atributos, em **Output Raster Dataset** foi escolhido o local para salvar o resultado (pasta *Z.TIFF* dos dados de entrada) e em **cellsize** foi colocado o valor de 0,5, referente ao intervalo das curvas de nível. Foi acionado o botão **Run**.

Para rodar o modelo foi criado uma novo projeto intitulado *Shalstab1* (Figura 5), referente à primeira combinação de parâmetros, pois o modelo será rodado três vezes, variando o parâmetro de profundidade da camada, pois, a partir da pesquisa realizada encontrou-se um valor médio, um limite inferior e um limite superior para o parâmetro z.

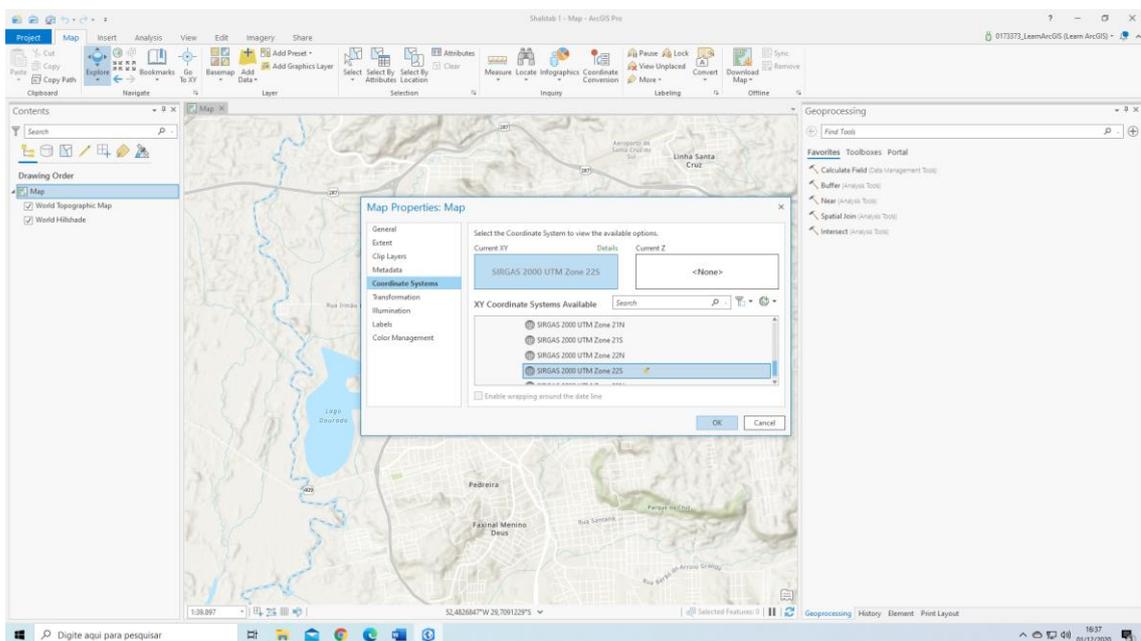
**Figura 5 - Criando um Novo Projeto**



Fonte: ArcGis Pro, 2020.

O projeto abriu automaticamente e então foi georreferenciado para o sistema de projeções adequado, neste caso SIRGAS 2000 UTM Zona 22S. Para isso foi necessário apertar com botão direito sobre o **“Map”** >> **“Properties”**. Selecionado o sistema (Figura 6).

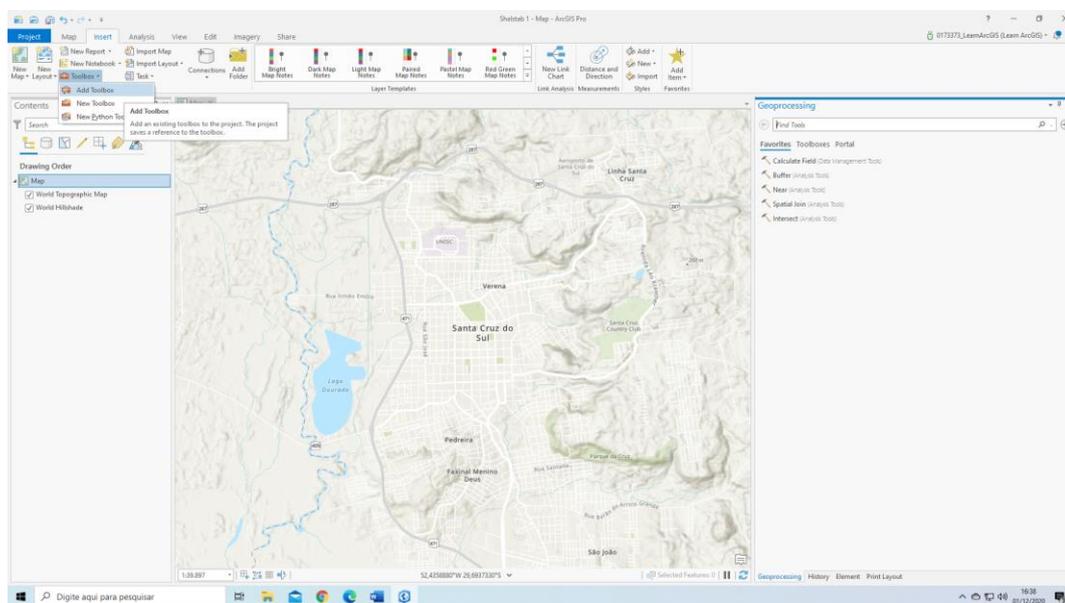
**Figura 6 - Selecionando Sistema de Coordenadas**



Fonte: ArcGis Pro, 2020.

Para adicionar o *plugin* ASA é necessário clicar na aba “*Insert*” >> “*Toolboxes*” >> “*Add Toolbox*”, e navegar até a pasta onde foi instalado o *plugin*, selecionando-o (Figura 7).

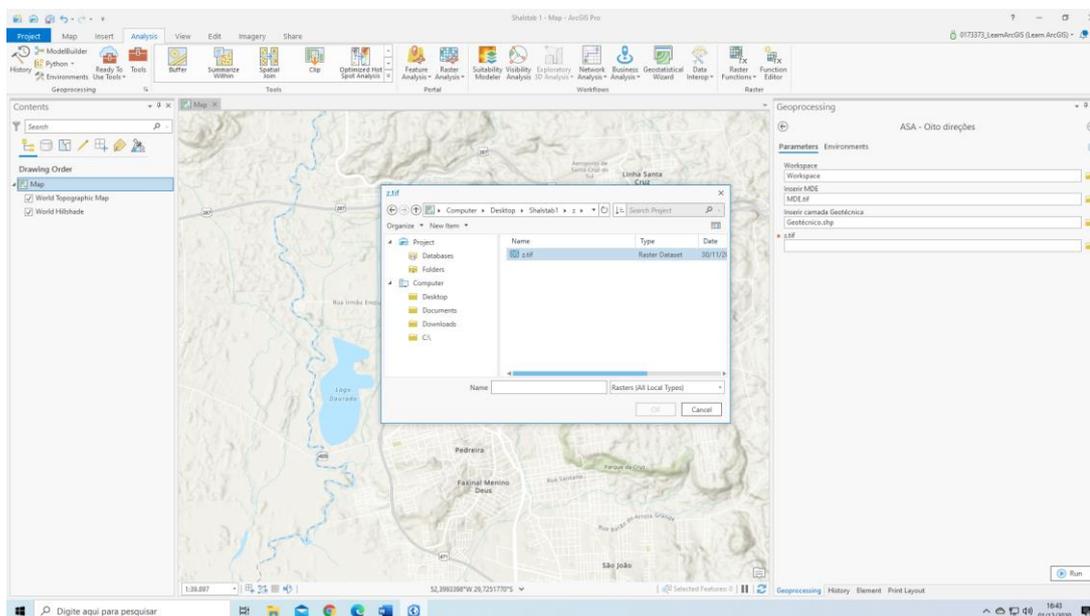
**Figura 7 - Adicionando o *plugin* ASA**



Fonte: ArcGis Pro, 2020.

Feito esse procedimento, a ferramenta está pronta para uso. Basta digitar na caixa de ferramentas pelo nome e selecioná-la. Foi escolhida a opção ASA – Oito Direções e em cada um dos campos de entrada foi inserido o parâmetro necessário, conforme a Figura 8, e clicar sobre o botão “*Run*”.

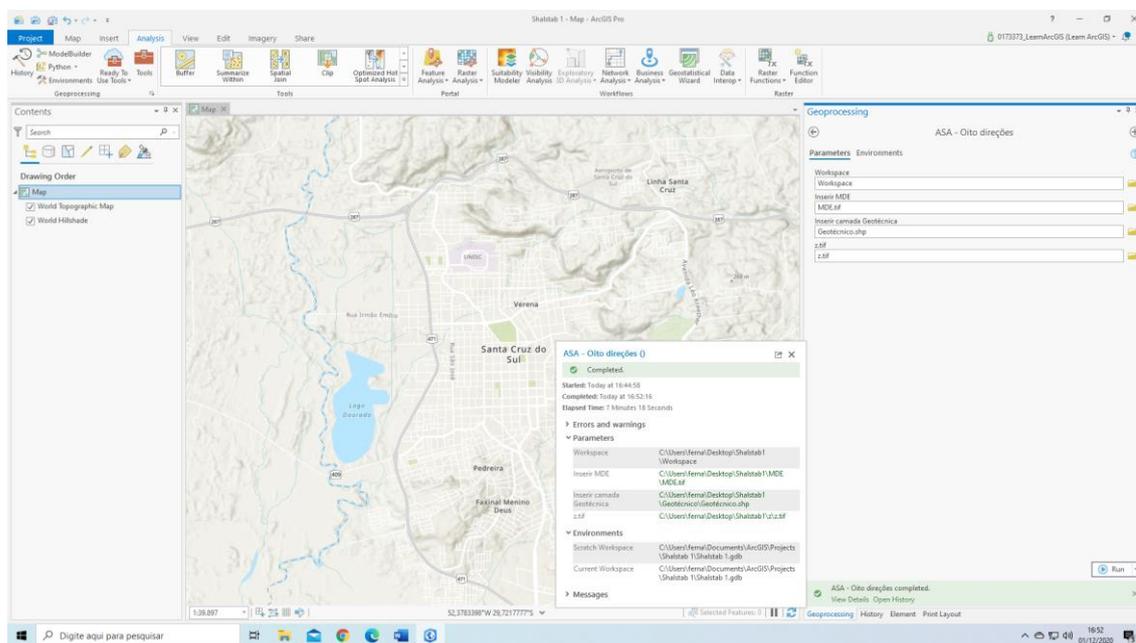
**Figura 8 - ASA - Oito Direções**



Fonte: ArcGis Pro, 2020.

Ao finalizar os cálculos, recebe-se um aviso (Figura 9) e os resultados estarão na pasta *Workspace*, em formato *GeoTIFF*. Os resultados são três, sendo um deles o resultado em 7 classes, o resultado em função de  $\log(q/t)$  (diferença da nomenclatura), e um último resultado (a/b) referente a área de contribuição da bacia.

**Figura 9 - Aviso de Finalização dos Cálculos**



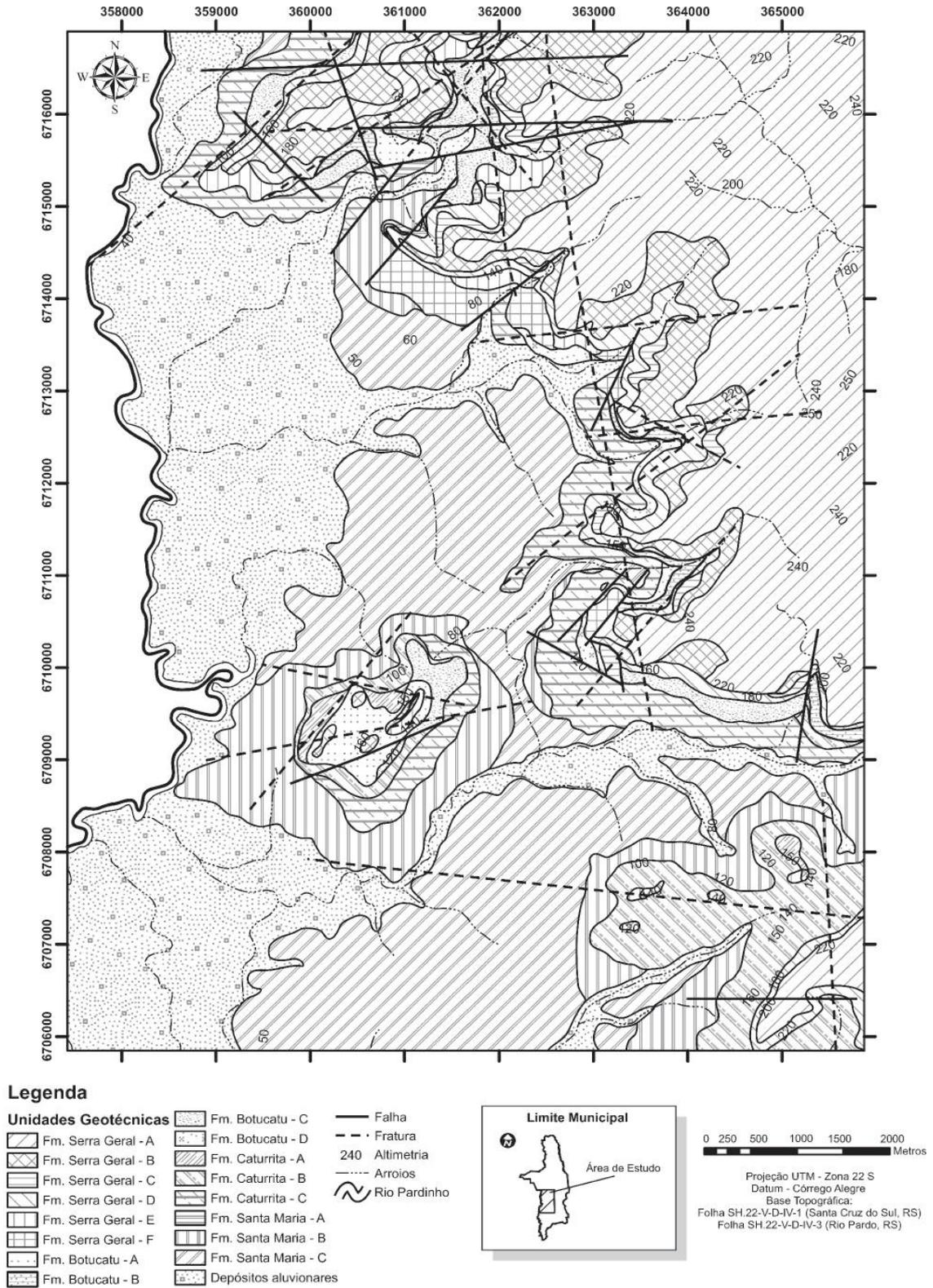
Fonte: ArcGis Pro, 2020.

## APÊNDICE F – Criação de Mapa de Declividades

A partir do MDE, criado conforme APÊNDICE B, foi extraído o mapa de declividade, utilizando o mesmo procedimento que a ferramenta ASA utiliza: “*Spatial Analyst Tools*” >> “*Surface*” >> “*Slope*”.

ANEXOS

ANEXO A – Mapa de Unidades Geotécnicas da Área Urbana de Santa Cruz do Sul



Fonte: Noronha, Mizusaki e Bressani, 2012.