

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, Brasil)

Fabio de Lima NORONHA¹, Ana Maria MIZUSAKI² & Luiz Antônio BRESSANI³

¹ Divisão de Controle da Mineração, Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luís Roessler. Rua Carlos Chagas, 55, sala 603, CEP: 90.030-020, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil. E-mail: fabioln@fepam.rs.gov.br.

² Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Av. Bento Gonçalves, 9500, CEP: 91.540-000, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil. E-mail: ana.mizusaki@ufrgs.br.

³ Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Av. Osvaldo Aranha, 99, CEP 90.035-190, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil. E-mail: bressani@ufrgs.br.

Recebido em 08/2010 Aceito para publicação em 10/2012

Versão online publicada em 13/12/2012 (www.pesquisasemgeociencias.ufrgs.br)

Resumo - O conhecimento do meio físico é de suma importância para a melhor utilização e ocupação do solo, principalmente em áreas urbanas sujeitas a um crescimento acelerado. Neste trabalho são descritos os estudos geológicos e geomorfológicos e as técnicas de mapeamento aplicadas para a definição de unidades geológicas e geomorfológicas na área urbana do município de Santa Cruz do Sul (RS), com vistas à obtenção de informações geotécnicas preliminares e a proposição de sua compartimentação em unidades, com base nessas informações. A metodologia empregada contou com a reinterpretação de dados de geologia e geomorfologia do município a partir de interpretação de fotografias aéreas, trabalhos de mapeamento geológico e a realização de ensaios de caracterização granulométrica, de petrografia, de difratometria de raios X (DRX) e de microscopia eletrônica de varredura (MEV). A fotointerpretação prévia permitiu uma visão global da geologia e geomorfologia da área. Os posteriores trabalhos de campo, fotointerpretação geomorfológica e geológica de detalhe e caracterização laboratorial das rochas permitiram a geração dos mapas de unidades geológicas e de unidades de vertente da área de estudo, com dados vinculados a um Sistema de Informações Geográficas (SIG). A partir da combinação das informações cartográficas e de banco de dados dos dois mapas, a área urbana do município foi dividida em 17 unidades geotécnicas preliminares com diferentes comportamentos esperados, controlados por sua litologia e posição geomorfológica nos perfis das vertentes.

Palavras-chave: mapeamento geológico-geomorfológico, unidades geotécnicas, estabilidade de taludes.

Abstract - GEOLOGICAL AND GEOMORPHOLOGICAL MAPPING TECHNIQUES APPLIED TO OBTAIN GEOTECHNICAL INFORMATION - A CASE STUDY IN THE URBAN AREA OF THE MUNICIPALITY OF SANTA CRUZ DO SUL (RS). The knowledge of the physical environment is of great importance to better use and occupation of land, especially in urban areas subject to accelerated growth. This paper describes the geological and geomorphological mapping techniques and applied to the definition of geological and geomorphological units in the urban area of the municipality of Santa Cruz do Sul (RS), with a view to obtaining geotechnical information and propose a preliminary subdivision units, based on this information. The applied methodology included reinter-pretation of city's geological and geomorphological data obtained from photo-interpretation, geological mapping, grading characterization tests, petrography, X ray diffractometry (XRD) and scanning electron microscopy (SEM) analysis. The preliminary photointerpretation allowed an overview of the geological and geomorphological compartmentation of the study area. Subsequent fieldwork, detailed geomorphological and geological photointerpretation, and laboratorial characterization of the materials allowed generating geological and geomorphological units maps of the area in geographical information system (GIS) format. Based on the analysis of cartographic and database information of both maps, the urban area of city was divided into 17 preliminary geotechnical units with different expected behaviors controlled by their lithology and geomorphological position on slope profiles.

Keywords: geological-geomorphological mapping, geotechnical units, slope stability.

1. Introdução

O município de Santa Cruz do Sul localiza-se no estado do Rio Grande do Sul segundo as coordenadas geográficas 29°43'59" de latitude sul e 52°24'52" de longitude oeste e está aproximadamente a 155 km de Porto Alegre, a capital do estado. A área pode ser facilmente acessada por rodovias asfaltadas tanto federais como estaduais, des-

tacando-se as rodovias RST-287 e BR-471. O clima é subtropical temperado, com temperaturas médias de 19°C, com precipitações anuais de 1.300 a 1.800 mm. A área urbana atual é de 156,96 km², com uma população de aproximadamente 104.624 habitantes (www.pmscs.rs.gov.br) (Fig. 1). No que se refere à hidrografia, o município insere-se na sub-bacia hidrográfica do rio Pardo, pertencente à bacia hidrográfica do rio Jacuí. O principal curso

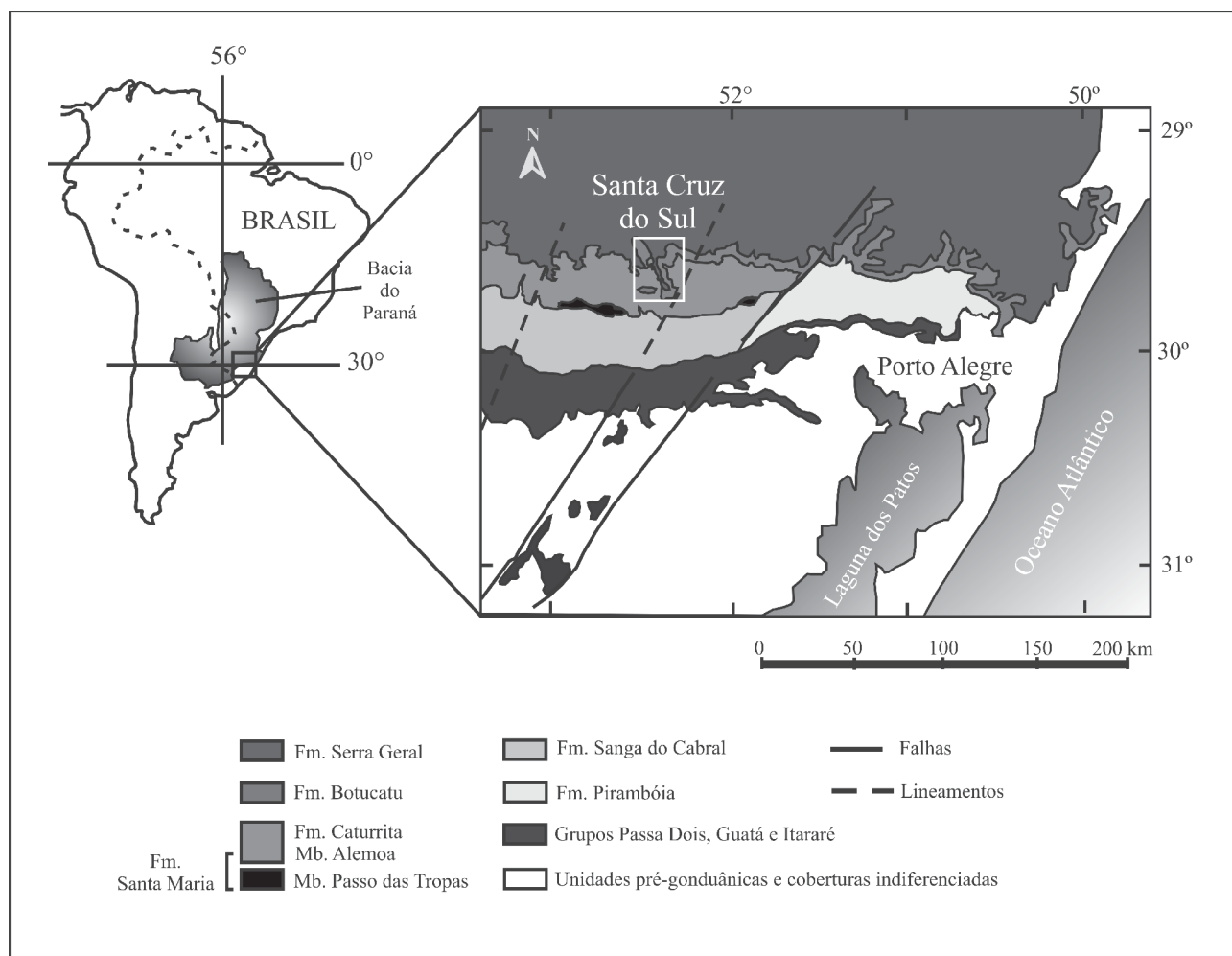


Figura 1. A área de estudo no contexto da Bacia do Paraná (modificado de Da-Rosa, 2005).

d'água existente é o rio Pardinho, um tributário do rio Pardo que limita a porção oeste da área urbana, além de diversos afluentes que cortam a área de estudo.

A área estudada, de acordo com o mapa de regiões geomorfológicas do estado do Rio Grande do Sul (RADAMBRASIL, 1986), situa-se essencialmente dentro da Unidade Geomorfológica Depressão Rio Jacuí, abrangendo ainda parte da Unidade Geomorfológica Patamares da Serra Geral. Em termos geológicos, situa-se na porção sudeste da Bacia do Paraná. A Bacia do Paraná é uma vasta bacia intracratônica desenvolvida a partir do Paleozóico inferior sobre crosta continental sendo preenchida por rochas sedimentares e vulcânicas, constituindo seis superseqüências que abrangem cerca de 400 Ma, limitadas por expressivas discordâncias regionais (Milani *et al.*, 1998). As unidades aflorantes na área de estudo correspondem às superseqüências neotriássica e jurássica-eocretácea da bacia, formadas, respectivamente, pelo Grupo Rosário do Sul, representado pelo Membro Alemoa da Formação Santa Maria e pela Formação

Caturrita; e o Grupo São Bento, composto pelas formações Botucatu e Serra Geral (Figs. 1 e 2). Também ocorrem depósitos sedimentares recentes: depósitos aluvionares e coluvionares (Grehs, 1976; Wenzel, 1996).

Santa Cruz do Sul (RS) foi um dos primeiros municípios do país a contar com um levantamento geológico-geotécnico para fins de planejamento urbano (Grehs, 1976). A partir desse levantamento preliminar, foram identificadas algumas áreas da cidade que apresentavam sinais de movimento de encostas. Posteriormente, em virtude de danos acentuados que foram observados em uma região da cidade, foi feito um levantamento por Pinheiro *et al.* (2002), onde ficaram constatadas algumas evidências de instabilidade com movimentos de rastejo. Eisenberger (2003), aprofundando a pesquisa, estudou em detalhe o comportamento de uma encosta da cidade, avaliando seus deslocamentos e as suas relações com as chuvas e os níveis piezométricos, assim como os danos nas residências provocadas pela movimentação dessa massa de solo.

Este trabalho apresenta os resultados da coleta de dados primários e reinterpretação de dados secundários sobre geologia, geomorfologia e geotecnia disponíveis para o município de Santa Cruz do Sul (RS). O objetivo geral é construir um cenário da geologia e geomorfologia da área de estudo e, através caracterização e cruzamento das informações, propor uma divisão preliminar da área em unidades geotécnicas. Como objetivo específico, realizar a organização de todos os dados adquiridos em uma forma cartográfica, através de um Sistema de Informações Geográficas (SIG).

2. Métodos e técnicas

No estudo da área, foram empregados três métodos de análise do meio físico para determinação de: (a) unidades geológicas, a partir de um mapeamento geológico e análise do substrato rochoso, (b) unidades de vertente, a partir da compartimentação geomorfológica do relevo baseada no modelo conceitual de Dalrymple *et al.* (1968), e (c) unidades geotécnicas preliminares, a partir do cruzamento das informações das duas caracterizações anteriores. Para tal, as técnicas utilizadas neste trabalho envolveram: (1) fotointerpretação

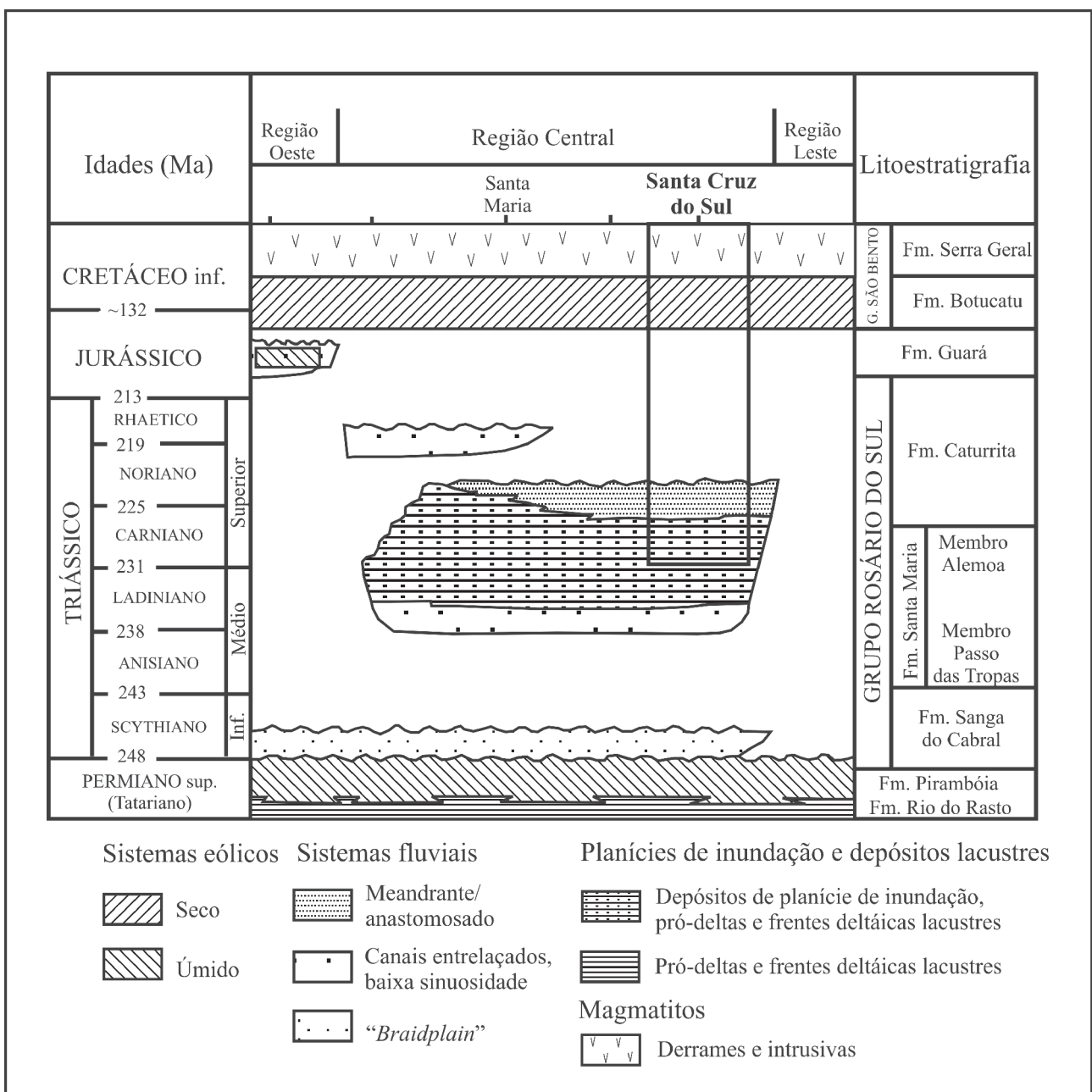


Figura 2. Arcabouço litoestratigráfico do intervalo Neopermiano-Eocretáceo da Bacia do Paraná no estado do Rio Grande do Sul, destacando a região de Santa Cruz do Sul (identificada pelo retângulo) (modificado de Faccini *et al.*, 2003).

geomorfológica e geológica do local de estudo com fotos aéreas em diferentes escalas (2) construção de uma base cartográfica digital em formato SIG, através do georreferenciamento e vetorização de feições cartográficas de interesse, e ortorretificação das fotografias aéreas; (3) mapeamento geológico da área de estudo: litologias (descrição macroscópica, documentação fotográfica e amostragem), reconhecimento e medição de estruturas tectônicas e contatos litológicos; (4) caracterização das amostras de rocha: petrografia, difratometria de raios X (DRX), microscopia eletrônica de varredura (MEV) e ensaios de granulometria; (5) integração dos resultados para a geração de três mapas (unidades geológicas, unidades de vertente e unidades geotécnicas preliminares).

2.1. Determinação das unidades de vertente

Considerando a diferença de escala entre os limites da área de estudo proposta neste trabalho e as grandes unidades abordadas no mapa de unidades geomorfológicas do Projeto RADAMBRASIL (1986), optou-se pela execução de uma compartimentação geomorfológica mais detalhada, abordando a escala das vertentes existentes. Em sentido amplo, uma vertente significa uma superfície inclinada, sem qualquer conotação genética ou locacional, mas associada a canais de drenagem. As vertentes podem resultar da influência de qualquer processo e, nesse sentido amplo, abrangem todos os elementos componentes da superfície terrestre (Cristofolletti, 1980).

Desse modo, a análise da geomorfologia da área de estudos se baseou na fotointerpretação geomorfológica, onde foi feita uma compartimentação das vertentes com base no modelo conceitual proposto por Dalrymple *et al.* (1968). Neste modelo, a vertente é dividida em nove unidades hipotéticas, que combinam as mais prováveis formas de relevo e os possíveis processos geomorfológicos, geológicos e de movimentação de águas atuantes (Fig. 3).

2.2. Determinação das unidades geológicas

A determinação das unidades geológicas foi realizada com base nos resultados obtidos com a aplicação da aerofotogeologia e mapeamento geológico. O mapeamento geológico procurou abranger de forma homogênea toda a área de estudo, desenvolvendo-se na escala 1:25.000. No entanto, em virtude da maciça urbanização dos

bairros centrais do município e por ocuparem um relevo de planície, a localização de afloramentos nestes bairros fica bastante prejudicada. Assim, o enfoque do mapeamento geológico se deu principalmente na região das encostas das porções leste e norte e suas imediações, nos morros testemunhos da metade sul e nas áreas baixas e com pouca urbanização.

Nos afloramentos, inicialmente foi feita a documentação fotográfica das feições mais importantes e depois uma descrição detalhada destacando aspectos como tipo de rochas, alterações, coloração, estruturas e contatos litológicos. Após a caracterização geológica, foram coletadas amostras de rocha e solo para a análise dos materiais. Não foram realizadas sondagens ou análise de sondagens porventura existentes.

2.3. Determinação das unidades geotécnicas

O mapeamento geotécnico pode ser descrito como o processo que busca avaliar e retratar as características dos componentes do meio físico, bem como os possíveis comportamentos frente às diferentes formas de uso do solo, processos naturais e induzidos. Para Zuquette & Gandolfi (2004), em um mapa de unidades geotécnicas, as condições geotécnicas de cada unidade são diferentes em decorrência da sua evolução geológica, geomorfológica, pedológica, hidrogeológica e climática.

Na presente pesquisa, em virtude de não haver mapas pedológicos e hidrogeológicos da área de estudo na escala de interesse (1:25.000), optou-se por usar uma simplificação do esquema proposto por Zuquette (1987) e Zuquette & Gandolfi (2004). Assim, as unidades geotécnicas foram geradas com base na sobreposição, em plataforma SIG, dos mapas de unidades de vertente e de unidades geológicas. Na prática, as unidades geotécnicas preliminares geradas com esse cruzamento de informações representam a divisão das unidades geológicas com base em suas características geomorfológicas, as quais são resultado dos diferentes processos de intemperismo, formação e movimento dos solos.

O comportamento geotécnico das rochas e solos está intimamente ligado à sua mineralogia, sua textura e sua estrutura. Sendo assim, a utilização de técnicas como petrografia, difratometria de raios X (DRX), microscopia eletrônica de varredura (MEV) e ensaios de granulometria foram de suma importância para definir as unidades geotécnicas.

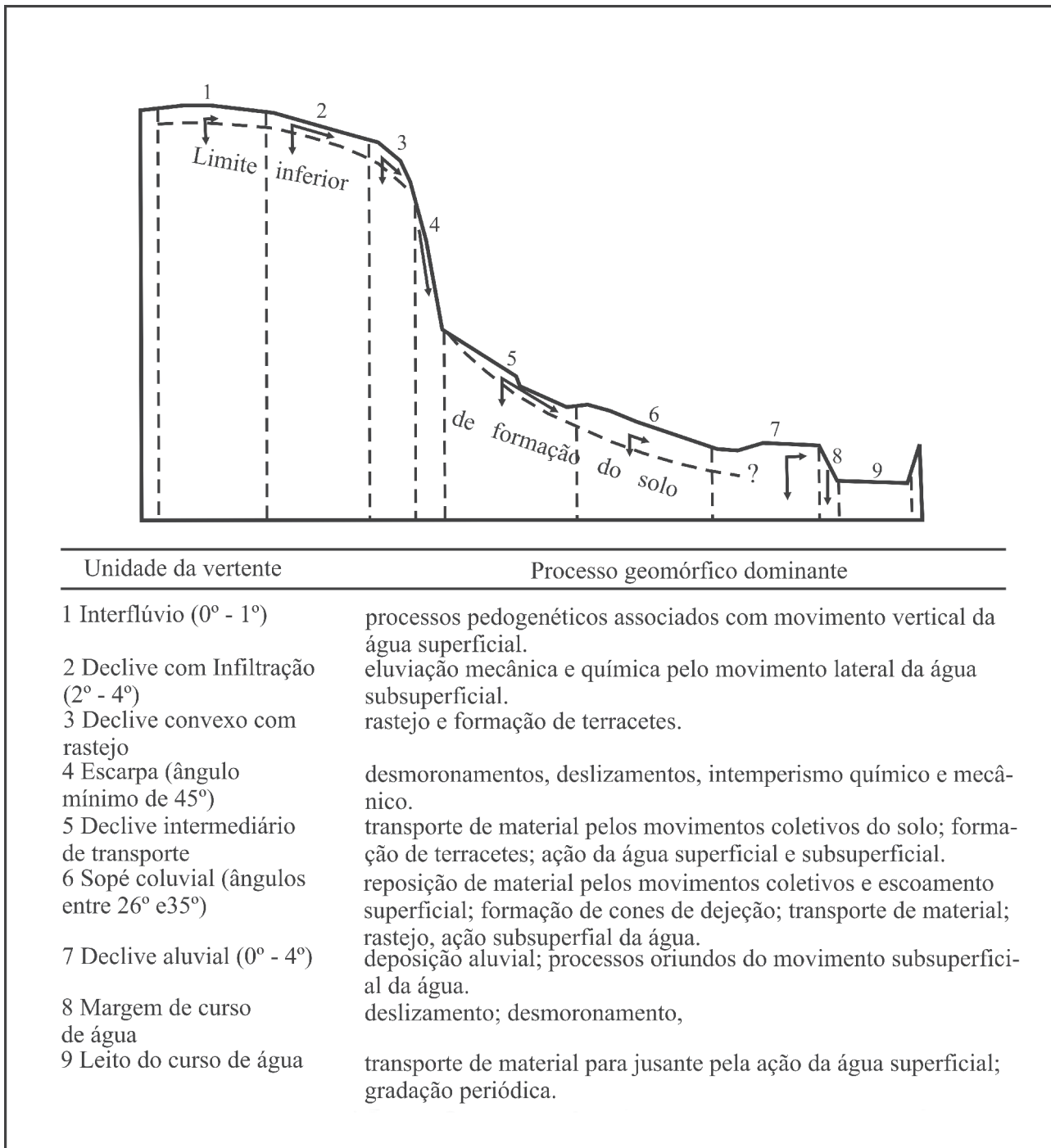


Figura 3. As nove unidades hipotéticas no modelo de vertente apresentado por Dalrymple *et al.* (1968). As setas indicam a direção e intensidade relativa do movimento da rocha intemperizada e dos materiais do solo pelos processos geomórficos dominantes (modificado de Cristofolletti, 1980).

Nesse contexto, buscou-se fazer uma identificação dos grupos de argilominerais presentes nas amostras coletadas, visto que características como expansibilidade e plasticidade dos materiais estão diretamente ligadas ao tipo de argilomineral dominante.

Os argilominerais expansivos são aqueles que têm a capacidade de aumentar a distância interlamelar pela absorção de substâncias como água e poliálcoois (Meunier, 2003). O principal

grupo de argilominerais expansivos é o das esmectitas, o qual é de grande interesse em geotecnia, visto que, quando muito ativos nas rochas, controlam totalmente as suas resistências, diminuindo-as sensivelmente.

3. Resultados e discussão

Neste item são discutidos os resultados obtidos a partir dos três métodos utilizados na análise

do meio físico da área urbana de Santa Cruz do Sul (análises geológica, geomorfológica e geotécnica) com a geração dos mapas de unidades geológicas, unidades de vertente e, por fim, o mapa de unidades geotécnicas.

O processo de elaboração dos mapas teve como rotina fundamental a divisão da área de estudo em unidades, de acordo com a variação de suas características. As unidades, por hipótese, representam áreas com heterogeneidade mínima quanto às características consideradas.

3.1. Unidades geológicas

A nomenclatura adotada para as unidades geológicas é a tradicionalmente utilizada para designar as unidades sedimentares e vulcânicas da Bacia do Paraná: Formação Santa Maria (Membro Alemoa), Formação Caturrita, Formação Botucatu, Formação Serra Geral e depósitos de sedimentos recentes.

3.1.1. Formação Santa Maria: Membro Alemoa

A Formação Santa Maria, inicialmente definida por Gordon Jr. (1947), aflora somente no estado do Rio Grande do Sul ao longo de uma faixa de aproximadamente 250 km de extensão em direção leste-oeste e largura em torno de 20 km (Fig. 1). É dividida litoestratigraficamente em dois membros: Passo das Tropas, inferior, predominantemente siliciclástico e Alemoa, superior, essencialmente pelítico. Representa uma associação de depósitos acumulados sobre amplas planícies de inundação, parcialmente ocupadas por corpos lacustres rasos, adjacentes a canais fluviais de pequenas dimensões (Faccini *et al.*, 2003).

Na área do mapeamento geológico efetuada aflora apenas o Membro Alemoa como uma sequência de pelitos com estrutura maciça. Com espessura média de 40 m, o Membro é a segunda maior unidade em área e está presente na maior parte da região, ocorrendo nas cotas baixas a intermediárias e apresentando um relevo levemente ondulado. O contato superior do Membro Alemoa se dá com a Formação Caturrita ou diretamente com os arenitos eólicos da Formação Botucatu, ou com os derrames basálticos da Formação Serra Geral.

Os pelitos são homogêneos, maciços e de coloração vermelho-claro a vermelho escuro. Como feição característica, observam-se fraturas subconchoidais na rocha não alterada. A fração fina

(FF < 2 µm) das amostras coletadas em um pacote de rochas (SM-A e SM-B), considerado como típico dessa unidade, foi analisada pela técnica de difração de raios X. Observa-se o predomínio dos argilominerais expansivos representados pela esmectita. Secundariamente são identificados illita, quartzo, feldspato alcalino e plagioclásio (Fig. 4).

Tais resultados são perfeitamente correlacionáveis com aqueles encontrados por Montardo (1984), na análise dos argilominerais das Formações Santa Maria e Caturrita da região compreendida entre os municípios de Santa Cruz do Sul e Candelária (RS). Neste trabalho, a autora aponta o predomínio de argilominerais do grupo das esmectitas (montmorilonitas e beidelitas) na fração fina dos siltitos e argilitos do Membro Alemoa da Formação Santa Maria.

3.1.2. Formação Caturrita

Essa unidade do Triássico Superior (Rubert & Schultz, 2004) corresponde ao conjunto de camadas predominantemente arenosas que ocorrem entre o Membro Alemoa e a Formação Botucatu. Em termos gerais, os litotipos constituintes da Formação Caturrita incluem camadas lenticulares, tabulares e sigmoidais de arenitos muito finos a conglomeráticos que ocorrem intercalados a pelitos maciços ou laminados, associados a níveis de paleossolos. Esses litotipos são interpretados como uma associação de fácies aluviais (Faccini *et al.*, 2003).

Na área urbana de Santa Cruz do Sul, a Formação Caturrita, com uma espessura média de 35 m, representa o primeiro degrau topográfico antes das escarpas do planalto formado pelas Formações Botucatu e Serra Geral. Essa unidade aflora normalmente como uma sequência composta por camadas tabulares de siltitos e arenitos, eventualmente com paleoalterações, além de delgadas camadas de lamitos (Fig. 5).

Os siltitos formam camadas tabulares com espessuras entre 3 e 10 cm, possuem tonalidade laranja e estrutura interna principalmente maciça. Os arenitos com geometria tabular variam desde arenitos sílticos a arenitos finos e formam camadas com espessuras médias de 15 cm. São rochas maciças embora localmente possa ser observada laminação plano-paralela e laminação cavalgante de porte centimétrico. Os lamitos possuem menor ocorrência, constituem finas camadas ou lentes com espessuras por volta de 1 cm, apresentam cor

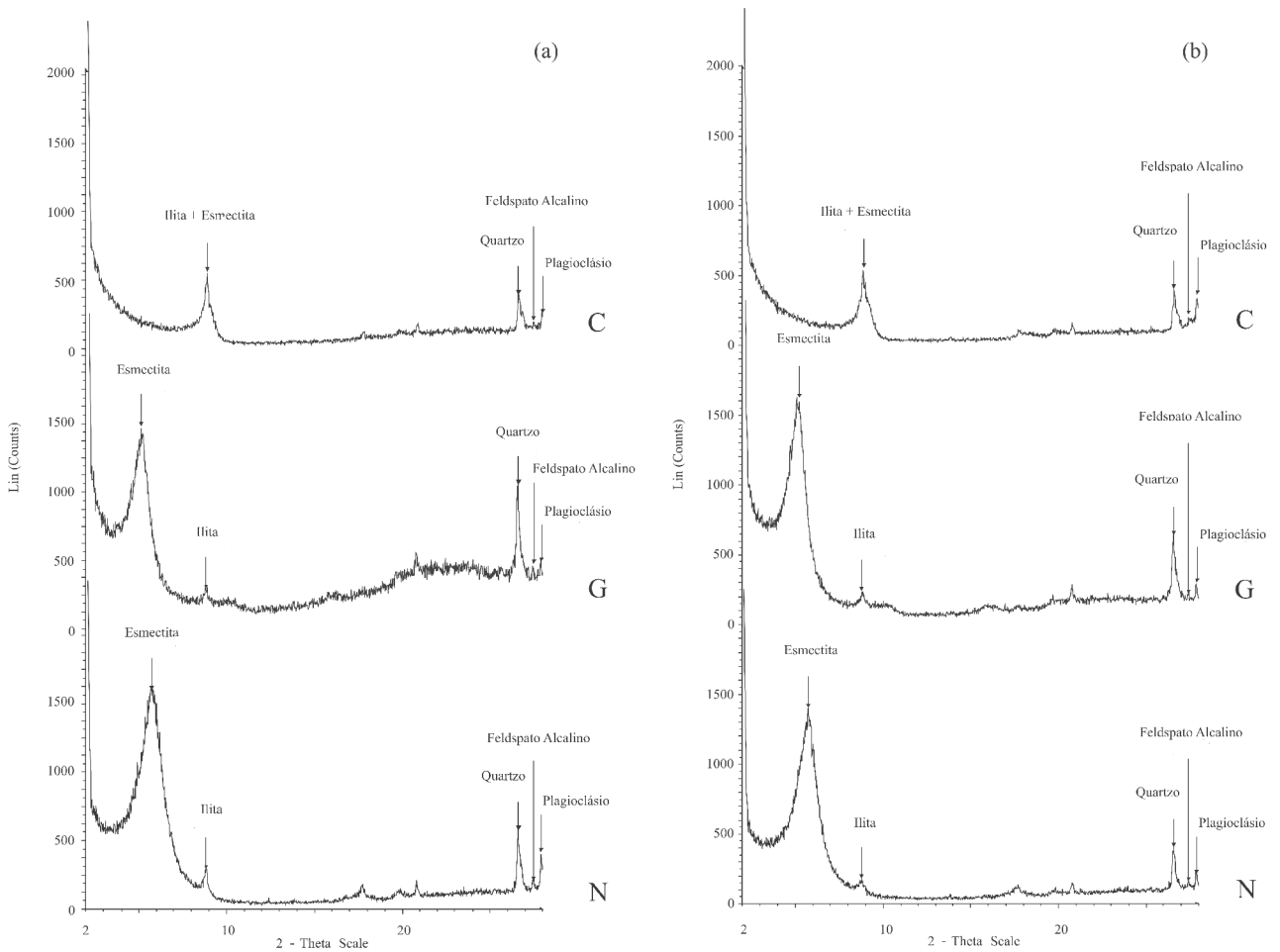


Figura 4. Difratoigramas de raios X da fração inferior a $2 \mu\text{m}$, referentes às amostras da Formação Santa Maria: (a) SM-A; (b) SM-B (N=normal; G= glicolada; C= calcinada).

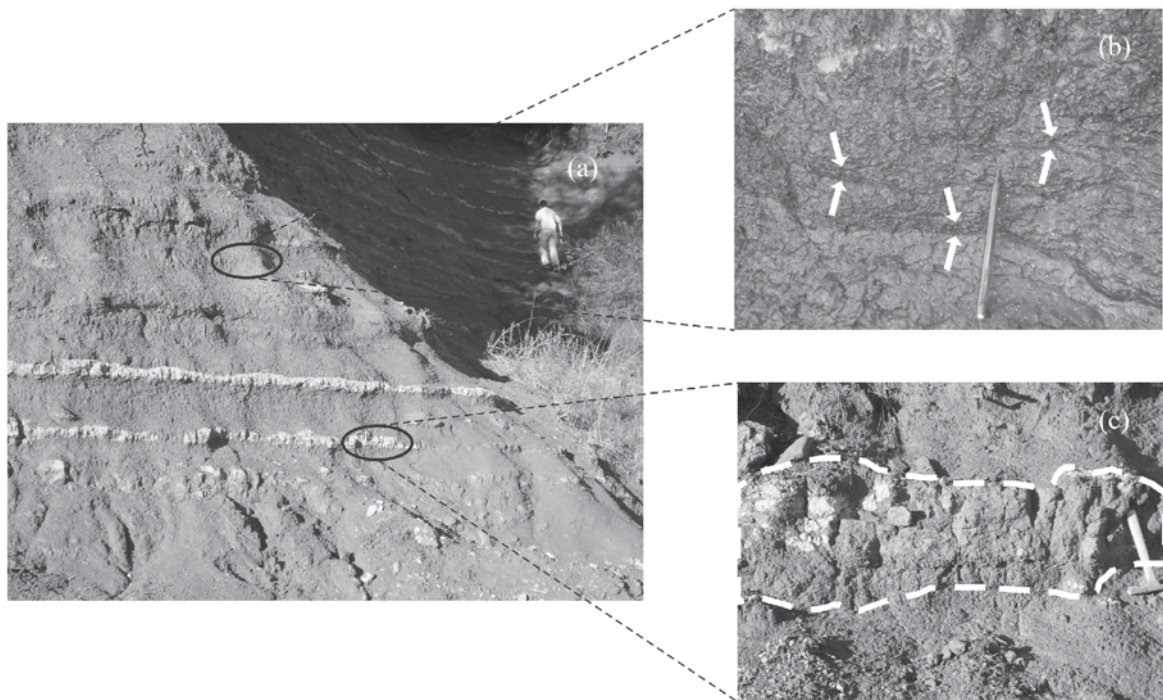


Figura 5. Feições de campo: (a) afloramento característico da Formação Caturrita na área de estudo, composto pela intercalação entre camadas tabulares de arenito e siltito e finas camadas de lamitos. As camadas tabulares de arenito estão totalmente ou parcialmente descoloridas (cor branca), em função do processo de hidromorfismo freático e pedogênico; (b) detalhe mostrando a intercalação entre os siltitos e as finas camadas ou lentes de lamitos (indicadas pelas setas); (c) detalhe mostrando camada tabular de arenito siltítico descolorida parcialmente pelos processos de paleoalteração (UTM N: 6708757m e UTM E: 360466m, segundo Datum Córrego Alegre).

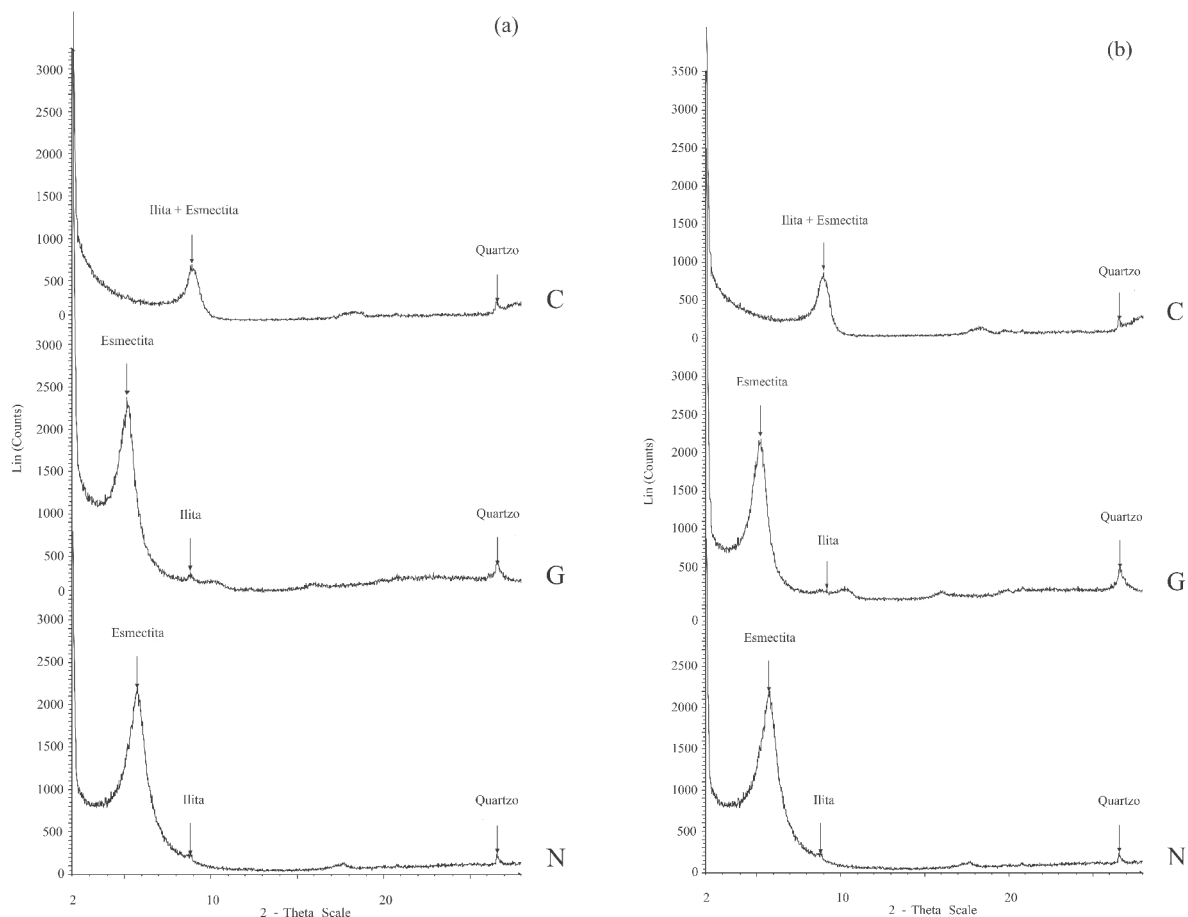


Figura 6. Difratoformas de raios X da fração inferior a 2 μm , referentes às amostras da Formação Caturrita: (a) CAT-A; (b) CAT-B. (N= normal; G= glicolada; C= calcinada).

vermelho-escuro, estrutura interna também maciça e, quando alterados, possuem cor cinza-azulada e são extremamente plásticos quando úmidos. Estas camadas tem grande importância geotécnica, pois podem condicionar fortemente a estabilidade de taludes da área em função de sua reduzida resistência ao cisalhamento e baixa permeabilidade.

As alterações encontradas nessa unidade são representadas por descolorações localizadas ou de relativa extensão lateral, interpretadas como fruto de hidromorfismo pedogênico ou freático (Da-Rosa, 2005), atingindo principalmente os arenitos e os siltitos tabulares.

A superfície de contato inferior da Formação Caturrita com a Formação Santa Maria não foi observada em campo. O contato superior com a Formação Botucatu é discordante. Em algumas situações, a Formação Botucatu está ausente e o contato superior se dá diretamente com os derrames basálticos da Formação Serra Geral.

Como característica importante dos arenitos da Formação Caturrita, ressalta-se a porosidade secundária formada pela intensa dissolução dos

grãos de feldspatos, assim como a alteração dos mesmos na forma de caulinitização e vacuolização. Também foi observada uma forte contribuição de argilas infiltradas, formando cutículas em torno dos grãos detríticos. O siltito argiloso, com estrutura maciça, apresenta grãos detríticos na fração silte (diâmetro em torno de 0,06 mm), além de matriz argilosa característica.

Devido às características apresentadas, foram selecionadas 03 amostras (CAT-A, CAT-B e CAT-C) para aplicação da técnica de difração de raios X na fração fina ($FF < 2 \mu\text{m}$). Sendo assim, a amostra CAT-A representa o material de alteração dos lamitos, de coloração cinza-azulado e com comportamento bastante plástico; a amostra CAT-B é representativa dos lamitos e a amostra CAT-C corresponde ao siltito. Os resultados para as amostras CAT-A e CAT-B revelam grande semelhança, apontando uma composição rica em esmeclita (Fig. 6A e 6B). Para a amostra CAT-C, ao contrário dos outros resultados, ainda são registrados traços de plagioclásio e feldspato alcalino na fração fina e a esmeclita apresenta maior grau de cristalinidade (Fig. 6C).

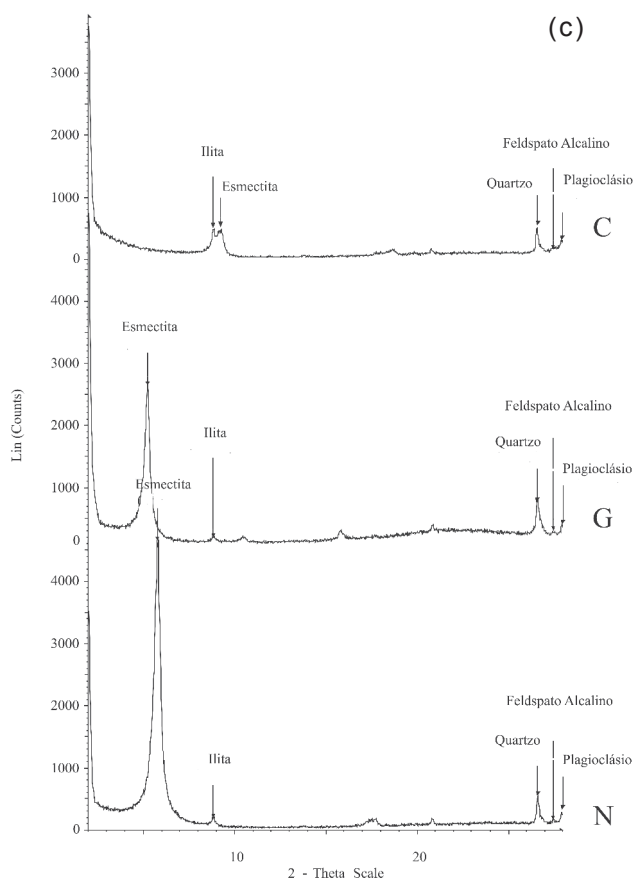


Figura 6 (continuação). Difratoograma de raios X da fração inferior a 2 µm, referentes às amostras da Formação Caturrita: (c) CAT-C (N= normal; G= glicolada; C= calcinada).

Novamente, os dados encontrados corroboram as informações de Montardo (1984), as quais apontam que os argilominerais que ocorrem nos arenitos e siltitos da Formação Caturrita são caracterizados pela predominância de esmectitas, aparecendo também ilitas, além de camadas mistas ilita-esmectita e quantidades mínimas de cloritas. Nas análises efetuadas no presente trabalho não foi registrada a presença de cloritas.

A análise ao microscópio eletrônico de varredura (MEV) mostra o aspecto detrítico, maciço, predominantemente argiloso da amostra CAT-A. Confirma-se que a esmectita, previamente identificada pela análise por difração de raios X, é detrítica e não apresenta deformações marcantes. No entanto, destaca-se que há porções da amostra onde ocorre uma leve orientação da superfície ocasionando um aspecto liso ou com estrias (Fig.7A). A amostra CAT-B mostra o predomínio de esmectita detrítica sem orientação preferencial, mas com microfraturamentos provavelmente associados ao processo de ressecamento (*shrinkage*) (Fig. 7B). Por último, na amostra CAT-C é evidenciado o aspecto síltico, de estrutura pouco compacta-

da quando comparado com as outras amostras, apresentando nítida microporosidade (Fig. 7C). Raros grãos de feldspato com formas prismáticas e grãos de quartzo subarredondados a subangulosos foram observados associados com a esmectita detrítica.

A distribuição granulométrica (Fig. 8) da amostra CAT-A (material de alteração dos lamitos, cinza-azulado) revela um aumento do teor de fração argila (52 %) sobre o da fração silte (41 %), quando comparado com a amostra CAT-B (lamito não alterado). A amostra CAT-B tem 47 % de argila, 45 % de silte e 8 % de areia fina. A análise da curva granulométrica da amostra CAT-C revela um franco predomínio da fração silte (74 %) em relação à fração argila (22 %), ainda contendo uma pequena parcela da fração areia fina (4 %).

3.1.3. Formação Botucatu

Os litotipos da Formação Botucatu constituem uma associação de fácies de sistema eólico seco, sendo representados essencialmente por arenitos bimodais, finos a médios, quartzosos, apresentando estratificações cruzadas de grande porte como estrutura mais característica (Faccini *et al.*, 2003).

Com espessuras médias de 40 m, os pacotes da Formação Botucatu afloram de forma descontínua na área de estudo, principalmente nas bases das escarpas norte e leste, e na forma de morros testemunhos ao sul. Verificou-se que essa unidade é representada por arenitos de cor rosa-claro, finos a médios, e de composição quartzosa. As principais estruturas descritas foram as estratificações cruzadas tangenciais e planares de grande porte organizadas em *sets* cuneiformes com espessuras de 1 a 5 m.

O contato inferior da Formação Botucatu pode ser com a Formação Caturrita ou diretamente com a Formação Santa Maria, sendo marcado por uma discordância erosiva. O seu contato superior com os basaltos da Formação Serra Geral é evidenciado por uma superfície de não conformidade, onde os arenitos tornam-se bastante silicificados, endurecidos e com reduzida porosidade. Estas rochas foram classificadas macroscopicamente como quartzo-arenitos bem selecionados, de coloração rosa-claro a bege, com granulometria bimodal em areia fina e média e grãos arredondados. Como estrutura interna, apresenta laminações com variações abruptas no tamanho de grão de uma lâmina para a outra (fluxo de grãos e queda livre de grãos).

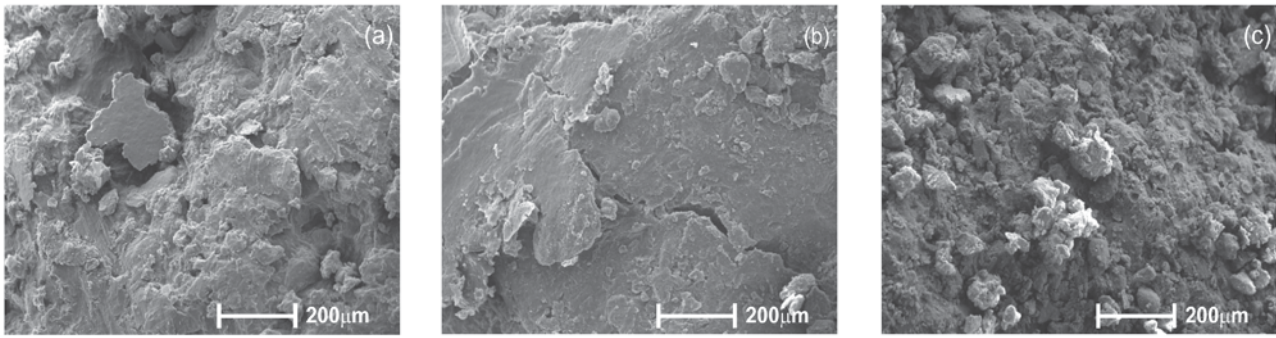


Figura 7. Fotomicrografias das amostras da Formação Caturrita, observadas com a técnica da microscopia eletrônica de varredura (MEV): (a) amostra CAT-A, (b) amostra CAT-B e (c) amostra CAT-C.

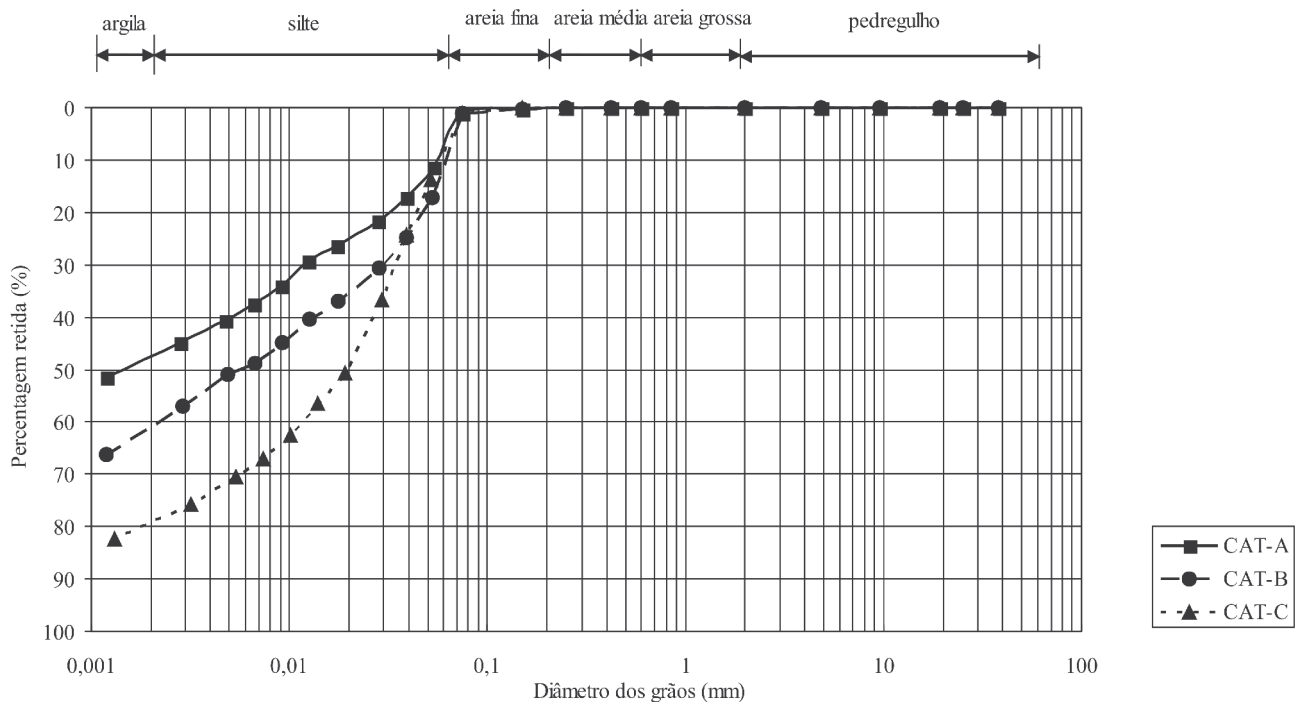


Figura 8. Distribuição granulométrica das amostras da Formação Caturrita, indicando claramente a maior porcentagem de silte da amostra CAT-C.

Por não ter um conteúdo de argilominerais significativos e de ter um comportamento geotécnico variável e associado ao grau de alteração da rocha, não foram determinados parâmetros geotécnicos, os quais podem ser encontrados em trabalhos de Bressani *et al.* (1998).

3.1.4. Formação Serra Geral

Na área estudada, a Formação Serra Geral possui espessuras aflorantes médias de 50 m, formando platôs, muitas vezes, com encostas íngremes, encontrando-se nas cotas mais altas da cidade. São rochas basálticas com cor variando do cinza até tons de marrom-avermelhado quando alteradas. São

comuns as zonas de fraturamento vertical e horizontal com espaçamentos que variam de 10 a 40 cm bem como as zonas vesiculares preenchidas total ou parcialmente por minerais como quartzo e zeolitas, caracterizando as feições primárias inerentes ao processo de resfriamento das lavas basálticas. Esta unidade ocorre geralmente recobrendo os pacotes com características de deposição eólica da Formação Botucatu através de uma superfície discordante, embora também possa estar em contato direto com as unidades do Grupo Rosário do Sul.

Como os basaltos descritos encontram-se em diversos estágios de alteração, a maioria sendo rochas ou rochas alteradas sob o ponto de vista da geotecnia, seus parâmetros apresentam-se muito

dependentes desta alteração, portanto não foram colhidas amostras para a etapa de ensaios geotécnicos. Recomenda-se que os mesmos somente sejam feitos para solução de problemas específicos e que amostras representativas a estes problemas sejam então coletadas.

3.1.5. Depósitos recentes

Os depósitos recentes são representados por sedimentos ou materiais transportados por agentes gravitacionais (depósitos coluvionares) ou fluviais (depósitos aluvionares). Em grande parte da zona urbana, as unidades anteriormente descritas encontram-se recobertas por estes sedimentos recentes.

Os colúvios que se originaram das cotas mais altas e foram transportados por diversos processos gravitacionais, localizam-se na meia-encosta das escarpas e geralmente ocorrem ao longo do contato entre a Formação Caturrita e a Formação Botucatu. Na maioria das vezes, esses depósitos não possuem estruturação interna, podendo, porém, apresentar uma laminação incipiente. Geralmente, esses pacotes são compostos por materiais com matriz areno-siltosa ou argilo-siltosa de coloração marrom, envolvendo clastos angulosos a subarredondados de basaltos e arenitos com diferentes dimensões (desde grânulos até matacões com 2 m de diâmetro).

Já os depósitos aluvionares englobam os sedimentos depositados pelos cursos d'água adjacentes ou que cortam a região, originados a partir do intemperismo e erosão dos materiais pela ação da água. Esses depósitos constituem a planície de inundação do Rio Pardinho e seus afluentes, e são compostos por sedimentos que abrangem as frações silte-argila, areia, cascalhos, e eventualmente, matéria orgânica. A espessura dos aluviões é variável, não superando cerca de 10 m e sua ocorrência está nas cotas mais baixas. Em virtude da escala de mapeamento (1:25.000), apenas os depósitos aluvionares apresentam área de ocorrência suficiente para ser representados no mapa de unidades geológicas (Fig. 9).

3.2. Unidades de vertente

Baseando-se no modelo conceitual proposto por Dalrymple *et al.* (1968), foi idealizado um modelo de vertente para a área urbana de Santa Cruz do Sul, cujo esquema é mostrado na figura a seguir (Fig. 10). É importante salientar que a comparti-

mentação mostrada no esquema não é rígida, não havendo a obrigatoriedade da ocorrência de todas as sete unidades nos perfis de vertentes analisados, podendo ocorrer, inclusive, a repetição de determinada unidade ao longo dos perfis. O mapa das unidades de vertentes é apresentado na figura 11.

3.3. Unidades geotécnicas preliminares

As unidades geotécnicas preliminares foram definidas com base em parâmetros geomorfológicos e geológicos conforme o modelo de Dalrymple *et al.* (1968). As unidades geotécnicas são descritas a seguir e suas respectivas representações no perfil de vertente podem ser visualizadas na figura 12.

O mapa de unidades geotécnicas (Fig. 13) foi elaborado com base na sobreposição simples, em plataforma SIG, dos produtos finais obtidos nas análises geomorfológicas e geológicas: os mapas de unidades de vertente e de unidades geológicas.

3.3.1. Formação Santa Maria

Por se tratar de uma unidade essencialmente pelítica, onde a fração argila é representada quase que exclusivamente por minerais expansivos do grupo das esmectitas, a Formação Santa Maria pode apresentar diferentes comportamentos geotécnicos, dependendo de sua característica geomorfológica. Desse modo, a Formação Santa Maria foi dividida em três unidades.

Formação Santa Maria – A

Unidade encontrada somente na porção norte da área de estudo com declividades intermediárias, onde predominam os processos de escoamento superficial das águas, em função da natureza impermeável dos argilominerais. Possibilidade de ocorrência de escorregamentos e rastejo dos materiais coluvionares (quando presentes, ver Eisenberger, 2003) e do regolito (principalmente em função dos argilominerais expansivos presentes).

Formação Santa Maria – B

Esta unidade ocorre geralmente dividindo o sopé coluvional das vertentes com a Formação Caturrita – C. A exemplo da unidade anterior, devido à baixa permeabilidade do regolito argiloso, aqui predomina o processo de escoamento superficial das águas.

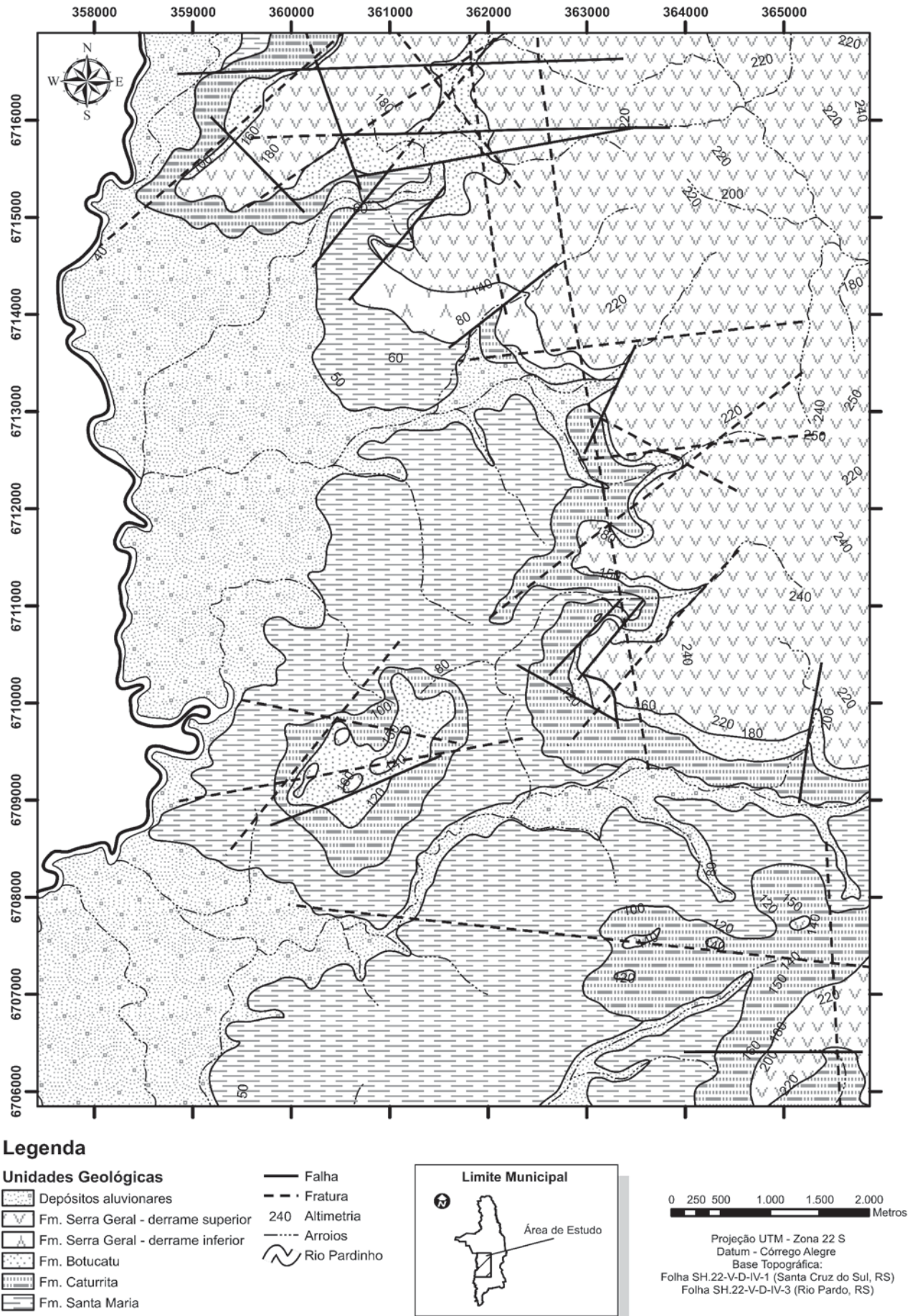


Figura 9. Mapa de unidades geológicas da área urbana de Santa Cruz do Sul (RS).

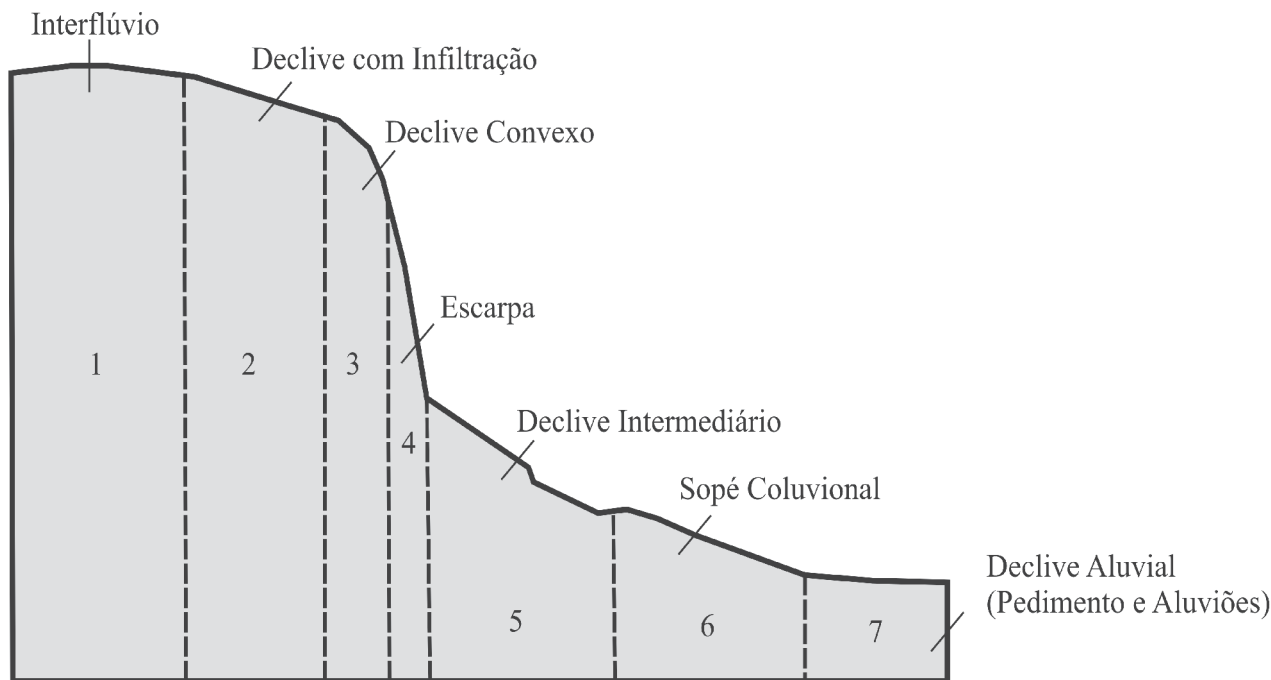


Figura 10. Modelo de perfil de vertente idealizado para a área de estudo (adaptado de Dalrymple *et al.*, 1968).

Formação Santa Maria – C

Unidade que divide juntamente com os depósitos aluvionares as cotas mais baixas da área de estudo. Aqui predominam os processos de formação de solo localmente podendo ocorrer espessos regolitos. As suaves declividades somadas com o caráter impermeável do regolito argiloso podem causar problemas de alagamento nas cotas mais baixas.

3.3.2. *Formação Caturrita*

Em virtude da sua composição heterogênea, com frequente intercalação entre arenitos, siltitos e lamitos, a Formação Caturrita é uma unidade importante do ponto de vista geotécnico. A interface abrupta entre essas três litologias, apresentando contrastes composicionais e de comportamento (resistência e permeabilidade), representam importantes planos de fraqueza. No caso de lamitos alterados, a natureza expansiva dos argilominerais e seu comportamento plástico diminuem ainda mais a resistência ao cisalhamento desses pacotes. Seguindo o critério geomorfológico da figura 10, a Formação Caturrita foi subdividida em três unidades:

Formação Caturrita – A

Unidade encontrada no topo dos morros testemunhos da área de estudo, com baixas declividades e com espesso regolito. Quanto à capacidade de drenagem do solo saprolítico, possui um comportamento bastante heterogêneo, onde seus pacotes areníticos mostram permeabilidade contrastando com a ocorrência de pelitos com natureza menos permeável resultado do maior teor de argilominerais presente.

Formação Caturrita – B

Esta unidade divide com a Formação Botucatu as cotas logo abaixo das escarpas da maior parte das vertentes, apresentando declividades intermediárias. Aqui, os processos de movimentos laterais dos depósitos coluvionares (quando presentes) e do regolito ganham importância, havendo possibilidade de ocorrer escorregamentos e rastejo. É uma unidade que apresenta alta susceptibilidade geotécnica à deflagração de movimentos de massa, pois soma a posição geomorfológica desfavorável com a natureza geotécnica contrastante das rochas.

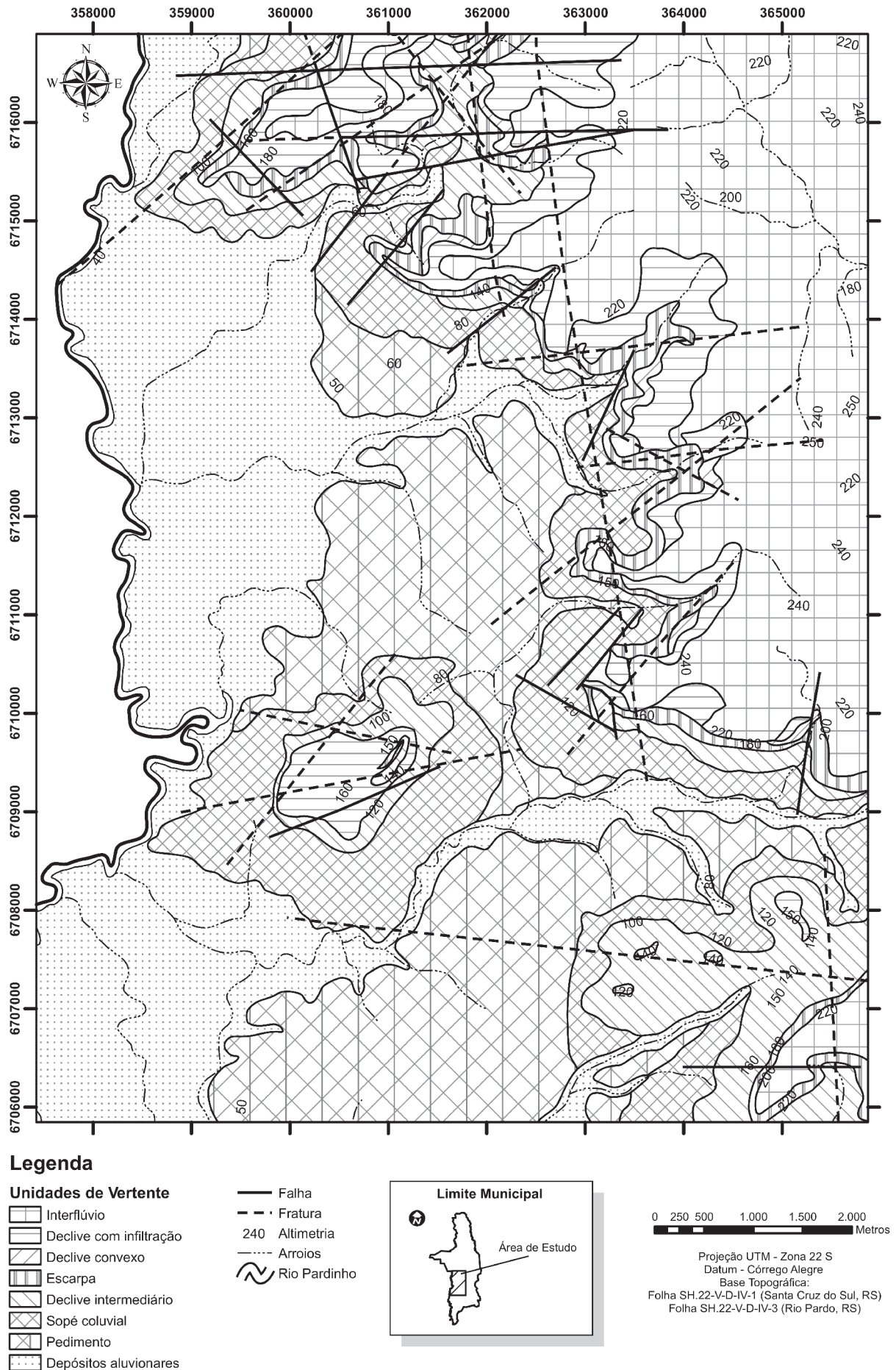


Figura 11. Mapa de unidades de vertente da área urbana de Santa Cruz do Sul (RS).

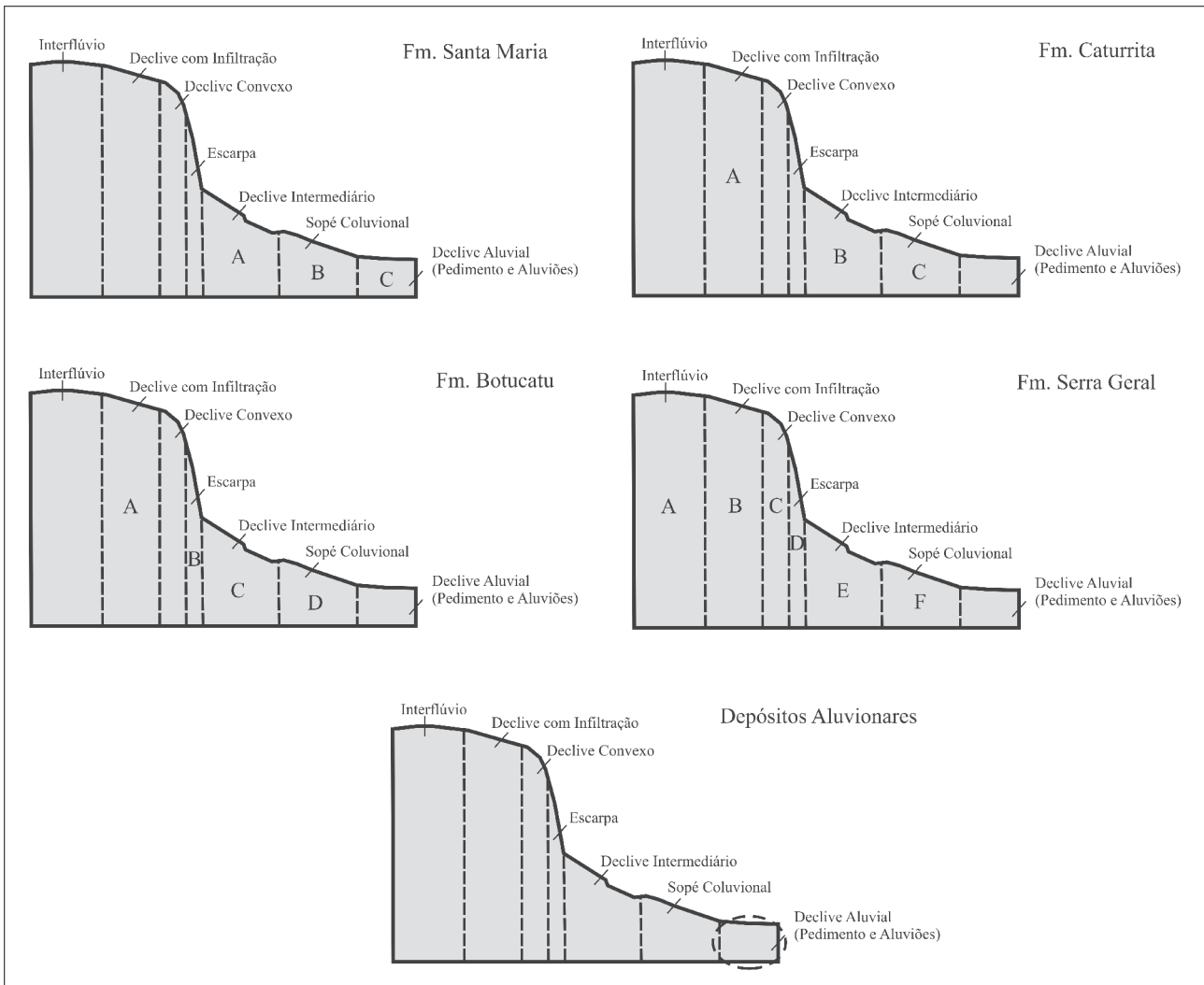


Figura 12. Esquema mostrando a posição das unidades geotécnicas no modelo de perfil de vertente proposto para a área de estudo. Fm. Santa Maria: declive intermediário (A), sopé coluvional (B) e declive aluvial (C); Fm. Caturrita: declive com infiltração (A), declive intermediário (B), sopé coluvional (C); Fm. Botucatu: declive com infiltração (A), escarpa (B), declive intermediário (C), sopé coluvional (D); Fm. Serra Geral: interflúvio (A), declive com infiltração (B), declive convexo (C), escarpa (D), declive intermediário (E), sopé coluvional (F); Depósitos Aluvionares (área indicada pelo círculo, sem subdivisão).

Formação Caturrita – C

Esta unidade forma o sopé coluvional da maior parte das vertentes. Assim como a unidade anterior, representa uma zona com susceptibilidade elevada no que diz respeito à movimentação de massa, porém onde o principal movimento esperado é o rastejo, em virtude das declividades mais suaves.

3.3.3. Formação Botucatu

A natureza predominantemente arenosa confere à Formação Botucatu um comportamento bastante permeável, facilitando a infiltração das

águas superficiais e deslocamento das águas sub-superficiais. Em função da homogeneidade de suas litologias (arenitos quartzosos, bem selecionados), as características geotécnicas irão depender exclusivamente do seu grau de cimentação e da sua condição geomorfológica. Deste modo foi possível a divisão da Formação Botucatu em quatro unidades.

Formação Botucatu – A

Unidade representada principalmente pelo declive com infiltração do morro testemunho localizado na região centro-sudoeste da área de estudos. Unidade com baixas declividades, onde se espera a formação de espesso manto de alteração, no qual vão predominar os processos de eluviação

mecânica e química pelo movimento lateral da água sub-superficial.

Formação Botucatu – B

Unidade que, muitas vezes, representa a metade inferior das escarpas do planalto formadas conjuntamente com a Formação Serra Geral. Há ausência ou, no máximo, desenvolvimento de solos rasos em virtude do alto gradiente de declividade.

Formação Botucatu – C

Unidade localizada logo abaixo das escarpas, com declividades intermediárias, onde pode ser importante a atuação do transporte principalmente dos materiais mobilizados das unidades de cotas superiores.

Formação Botucatu – D

Unidade que representa o sopé coluvional das escarpas das vertentes, com declividades mais suaves que a unidade anterior e regolito arenoso espesso. Nesta porção há deposição do material coluvionar mobilizado das unidades anteriores, assim como a movimentação do mesmo por processos de rastejo.

3.3.4. Formação Serra Geral

A Formação Serra Geral é uma unidade geotecnica bastante heterogênea, dependendo do grau de alteração da rocha (maior ou menor formação de argilominerais e materiais terrosos). Esta Formação foi dividida em seis unidades.

Formação Serra Geral – A

Unidade localizada no topo do platô basáltico, com baixa declividade, representando as cotas mais altas da área de estudo. Trata-se de uma unidade com espesso manto de alteração de natureza argilosa, formado principalmente pela rápida decomposição dos minerais ferro-magnesianos da rocha basáltica.

Formação Serra Geral – B

Representa porções do topo do platô basáltico com declividades um pouco superiores

em relação à unidade anterior. No seu espesso manto de alteração predominam os processos de eluviação mecânica e química pela movimentação da água de sub-superfície.

Formação Serra Geral – C

Última porção do topo do platô basáltico antes da escarpa. Assim como as unidades anteriores, apresenta espesso regolito, porém aqui a possibilidade de movimentação do solo pelo processo de rastejo se torna mais importante, em função de sua maior inclinação.

Formação Serra Geral – D

Representa as escarpas do platô basáltico, onde predominam as altas declividades ($> 45^\circ$). A grande dinâmica de transporte dos materiais de alteração em virtude do alto gradiente de inclinação faz com que essa unidade não apresente solos ou estes sejam pouco espessos.

Formação Serra Geral – E

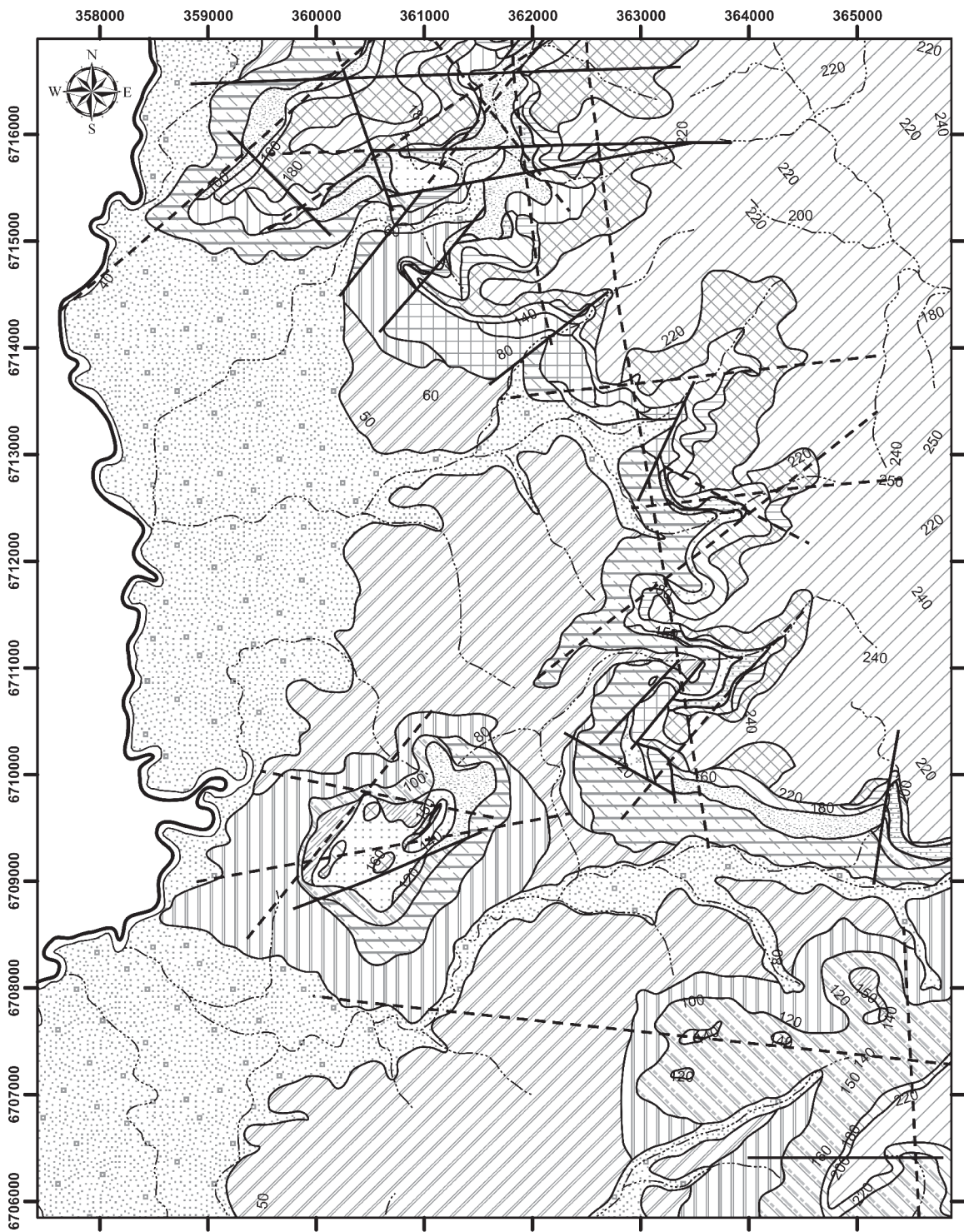
Representa porções dos derrames basálticos com declividades intermediárias, onde não se desenvolveram as escarpas ou que ocorrem logo abaixo das mesmas. Essa unidade apresenta contraste entre solos rasos nas cotas mais altas, onde há predomínio de saprólitos de basalto e solos um pouco mais espessos nas cotas mais baixas, onde há tanto a contribuição do manto de alteração como dos materiais remobilizados das unidades anteriores (depósitos coluvionares).

Formação Serra Geral – F

Unidade representada principalmente pelo derrame basal identificado na porção norte da área de estudo, apresentando declividades menores que a unidade anterior. Aqui é importante o processo de redeposição dos depósitos coluvionares.

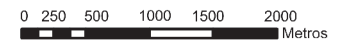
3.3.5. Depósitos aluvionares

Essa unidade não apresenta subdivisão em razão de seus limites coincidirem com os limites da compartimentação geomorfológica. Representam as cotas mais baixas da área de estudos e abrigam os terrenos da porção oeste da cidade até atingirem o rio Pardinho. Em virtude de estarem recobridos



Legenda

Unidades Geotécnicas	Fm. Botucatu - C	Falha
Fm. Serra Geral - A	Fm. Botucatu - D	Fratura
Fm. Serra Geral - B	Fm. Caturrita - A	240 Altimetria
Fm. Serra Geral - C	Fm. Caturrita - B	Arroios
Fm. Serra Geral - D	Fm. Caturrita - C	Rio Pardiniho
Fm. Serra Geral - E	Fm. Santa Maria - A	
Fm. Serra Geral - F	Fm. Santa Maria - B	
Fm. Botucatu - A	Fm. Santa Maria - C	
Fm. Botucatu - B	Depósitos aluvionares	



Projeção UTM - Zona 22 S
 Datum - Córrego Alegre
 Base Topográfica:
 Folha SH.22-V-D-IV-1 (Santa Cruz do Sul, RS)
 Folha SH.22-V-D-IV-3 (Rio Pardo, RS)

Figura 13. Mapa de unidades geotécnicas da área urbana de Santa Cruz do Sul (RS).

quase que exclusivamente os materiais impermeáveis da Unidade Geotécnica Formação Santa Maria – C, e estarem em ampla área com lençol freático elevado, apresentam um considerável teor de umidade (podendo atingir a saturação em períodos de precipitações mais intensas).

4. Conclusões

O método de geração de unidades geotécnicas utilizado foi baseado no cruzamento das informações adquiridas por meio de análise qualitativa da geologia e geomorfologia, tendo sido adequado para a construção de um panorama geotécnico preliminar da área urbana de Santa Cruz do Sul (RS). Através deste procedimento foi possível obter informações básicas do substrato da área de estudo, permitindo a divisão da área em unidades com diferentes comportamentos geotécnicos esperados, em função da sua posição geomorfológica no perfil de vertente e dos processos geomórficos atuantes em cada posição.

Assim, foram definidas 5 unidades geológicas principais. A primeira unidade geológica representa os derrames basálticos da Formação Serra Geral, caracterizados geomorfológicamente por variarem desde platôs com escarpas íngremes a terrenos bastante suavizados. A segunda unidade, formada pelos arenitos da Formação Botucatu, ocorre principalmente nas bases das escarpas ou na forma de morros testemunhos. A terceira unidade, representada pela Formação Caturrita, tem uma intercalação de estratos com características geotécnicas contrastantes e sustenta o primeiro degrau topográfico da região. A quarta unidade está presente na maior parte da zona urbana e é representada pelos pelitos vermelhos da Formação Santa Maria, com relevo levemente ondulado, materiais expansivos e pouco permeáveis. A quinta unidade é formada pelos depósitos aluvionares que se localizam nas cotas mais baixas da porção oeste da cidade até atingirem o rio Pardinho. Estas 5 unidades geológicas foram subdivididas, em função de suas características geomorfológicas, em 17 unidades geotécnicas preliminares, com diferentes comportamentos geotécnicos esperados, resultando no mapa de unidades geotécnicas apresentado.

Agradecimentos - Agradecemos à Prefeitura Municipal de Santa Cruz do Sul (RS) pelo apoio logístico nos trabalhos de campo, à Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais - CPRM/RS por diversas informações disponibilizadas, ao geólogo Henrique Zerfass pela ajuda em trabalhos de campo e identificação de materiais e ao professor Nelson A. Lisboa, por auxílio nos trabalhos

com fotografias aéreas e interpretação da geomorfologia.

Referências

- Bressani, L.A., Bica, A.V.D., Martins, F.B. & Ferreira, P.M.V. 1998. Stress-strain behavior of residual soils of Botucatu sandstone. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON HARD SOILS AND SOFT ROCKS, 2, 1998, Napoles. *Proceedings...*v.1, p. 459-464.
- Cristofolletti, A. 1980. *Geomorfologia*. São Paulo, Edgard Blücher, 185 p.
- Da-Rosa, A.A.S. 2005. *Paleoalterações em depósitos sedimentares de planícies aluviais do Triássico Médio a Superior do sul do Brasil: caracterização, análise estratigráfica e preservação fóssilífera*. São Leopoldo, 190 p., Tese de Doutorado em Geologia, Universidade do Vale do Rio dos Sinos.
- Dalrymple, J.B., Blong, R.J. & Conacher, A.J. 1968. A hypothetical nine unit landsurface model. *Z. Geomorphology*, 12: 60-76.
- Eisenberger, C. 2003. *Estudo do Comportamento de um Talude Coluvionar Urbano em Santa Cruz do Sul – RS*. Porto Alegre, 112 p. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Faccini, U.F., Giardin, A. & Machado, J.L.F. 2003. Heterogeneidades litofaciológicas e hidroestratigrafia do Sistema Aquífero Guarani na região central do estado do Rio Grande do Sul, Brasil. In: Paim, P.S.G., Faccini, U.F., Netto, R.G. (Eds.). *Geometria, arquitetura e heterogeneidades de corpos sedimentares*. São Leopoldo, UNISINOS, p. 147-173.
- Gordon Jr., M. 1947. Classificação das formações gondwânicas do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. *Notas Preliminares e Estudos, DNPM*, 38: 1-20.
- Grehs, S. A. 1976. Mapeamento geológico preliminar de Santa Cruz do Sul visando obter informação básica ao planejamento integrado. *Acta Geologica Leopoldensia*, 1: 121-152.
- Meunier, A. 2003. *Argiles*. Paris, Contemporary Publishing International, 433p.
- Milani, E. J.; Faccini, U. F.; Scherer, C. M. S.; Araújo, L. M.; Cupertino, J. A. 1998. Sequences and stratigraphic hierarchy of the Paraná Basin (Ordovician to Cretaceous), Southern Brazil. *Boletim IG-USP, São Paulo*, p. 125-173. (*Série Científica*, n. 29).
- Montardo, D. K. 1984. Análise de argilo-minerais das Formações Santa Maria e Caturrita (Grupo Rosário do Sul, Triássico), Rio Grande do Sul, Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 33, Rio de Janeiro, 1984. *Anais...*, Rio de Janeiro, SBG, p. 765-776.
- Pinheiro, R.J.B., Soares, J.M.D., Bica, A.V.D., Bressani, L.A. & Eisenberger, C.N. 2002. Investigação geotécnica de uma encosta na área urbana de Santa Cruz do Sul – RS. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 12, São Paulo, 2002. *Anais...*, São Paulo.
- RADAMBRASIL. 1986. Folha SH.22 Porto Alegre e parte das Folhas SH.21 Uruguaiana e SI.22 Lagoa Mirim:

- geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação, uso potencial da terra. Rio de Janeiro: IBGE. V. 33, 792 p.
- Rubert, R.R. & Schultz, C.L. 2004. Um novo horizonte de correlação para o Triássico Superior do Rio Grande do Sul. *Pesquisas em Geociências*, 31 (1): 71-88.
- Wenzel, J.A. 1996. *Mapeamento geológico estrutural geotécnico da Zona Urbana de Santa Cruz do Sul visando obter informação básica ao planejamento integrado*. Santa Cruz do Sul – RS, PMSCS. (Relatório técnico).
- Zuquette, L.V. 1987. *Análise Crítica da Cartografia Geotécnica e Proposta Metodológica para as Condições Brasileiras*. São Carlos, 673p. Tese de Doutorado em Engenharia, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- Zuquette, L.V. & Gandolfi, N. 2004. *Cartografia Geotécnica*. São Paulo, Oficina de Textos, 190p.

