

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS NATURAIS E EXATAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA E GEOCIÊNCIAS**

**FEIÇÕES DE CARSTE SOBRE A FORMAÇÃO SERRA
GERAL NO MUNICÍPIO DE SÃO MARTINHO DA SERRA
- RS**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Vinícius Duarte Guareschi

Santa Maria, RS, Brasil
2012

FEIÇÕES DE CARSTE SOBRE A FORMAÇÃO SERRA GERAL NO MUNICÍPIO DE SÃO MARTINHO DA SERRA – RS

Vinícius Duarte Guareschi

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia e Geociências – PPGGEO, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **MESTRE EM GEOGRAFIA.**

Orientador(a): Prof^a. Dr^a. Andréa Valli Nummer

Santa Maria, RS, Brasil
2012

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS NATURAIS E EXATAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA E GEOCIÊNCIAS**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a Dissertação de
Mestrado

**FEIÇÕES DE CARSTE SOBRE A FORMAÇÃO SERRA GERAL NO
MUNICÍPIO DE SÃO MARTINHO DA SERRA – RS**

elaborada por
Vinícius Duarte Guareschi

como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Geografia

COMISSÃO EXAMINADORA:

Andréa Valli Nummer, Dr^a. (UFSM)
(Presidente/Orientadora)

Ivaniza de Lourdes L. Cabral, Dr^a. (UFMT)

Carlos Leite Maciel Filho, Dr. (UFSM)

Santa Maria, 27 de março de 2012.

AGRADECIMENTOS

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES pela concessão da bolsa de estudos.

À Universidade Federal de Santa Maria - UFSM, por fornecer a estrutura necessária para a realização do curso.

À Professora Andréa Valli Nummer, pela atenção, orientação e disposição ao longo de minha vida acadêmica, especialmente no desenvolvimento desta pesquisa.

Aos Professores Luiz Eduardo de Souza Robaina e Romário Trentin e pela colaboração nos trabalhos de campo e disposição sempre que precisei.

Ao professor Carlos Leite Maciel Filho, pelo fornecimento de materiais e pelas conversas que enriqueceram muito este trabalho.

Ao colega de laboratório Dionísio S. Sangoi, pela ajuda e apoio oferecido em todos os momentos.

Ao colega Daniel Junges pela colaboração na edição final dos mapas.

À minha companheira Nádia Bolzan Soares pela atenção, compreensão, carinho e presença ao longo de toda a minha vida acadêmica.

À meu pai e minha mãe pelo apoio incondicional e ensinamentos que me proporcionaram.

EPIGRAFE

A verdade não pertence a ninguém (para ser comerciada), nem é um prêmio conquistado por competição. Ela está diante de todos nós como algo a ser procurado e é encontrada por todos aqueles que a desejarem, que tiverem olhos para vê-la e coragem para buscá-la.

Marilena Chauí

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Geografia e Geociências
Universidade Federal de Santa Maria

FEIÇÕES DE CARSTE SOBRE A FORMAÇÃO SERRA GERAL NO MUNICÍPIO DE SÃO MARTINHO DA SERRA - RS

AUTOR: VINÍCIUS DUARTE GUARESCHI
ORIENTADOR (A): ANDRÉA VALLI NUMMER
Data e Local da Defesa: Santa Maria, 27 de Março de 2012.

Feições cársticas são mais comuns em relevos formados por rochas carbonáticas, mas podem ocorrer em rochas ricas em sílica como as vulcânicas ácidas, fato ainda pouco explorado. Neste sentido, esta Dissertação de Mestrado tem como objetivo compreender os mecanismos responsáveis pelo desenvolvimento destas formas de relevo associadas as rochas vulcânicas, através da identificação e mapeamento das feições cársticas, averiguando sua relação com a declividade, hipsometria, litologia e lineamentos morfo-estruturais. Além disso, procurou-se relacionar a distribuição das feições com o uso e ocupação do solo e verificar a fragilidade do Aquífero Serra Geral. A área de estudo compreende o Município de São Martinho da Serra - RS, em rochas vulcânicas básicas e ácidas da formação Serra Geral. Para tanto, as feições cársticas foram identificadas e mapeadas através de imagens de satélite, e os lineamentos morfo-estruturais foram extraídos de SRTM. Foram gerados diversos produtos cartográficos, que combinados com as observações em campo, permitiram classificar as feições cársticas que ocorrem na área de estudo em três tipos de depressões que correspondem a diferentes estágios de evolução morfológica: a) Depressão em Superfície Aplainada de Topo; b) Cabeceiras de Drenagens Suspensas e; c) Depressão em Fundo de Vale. Foi constatado que as feições cársticas são controladas pelos lineamentos morfo-estruturais, e tendem a se desenvolverem nas porções dos derrames vulcânicos que são mais facilmente afetadas pelo intemperismo. Também verificou-se que as Depressões em Superfície Aplainada de Topo ocorrem com maior frequência na parte do município onde o uso do solo é predominantemente agrícola, fato que denota risco de contaminação do aquífero Serra Geral, já que sua recarga também ocorre através destas feições.

Palavras-Chave: Feições cársticas. Lineamentos morfo-estruturais. Rochas vulcânicas. Aquífero Serra Geral.

ABSTRACT

Master Course Dissertation
Professional Graduation Program in Geography and Geosciences
Universidade Federal de Santa Maria

KARST FEATURES ON SERRA GERAL FORMATION IN SÃO MARTINHO DA SERRA - RS

Karst features are more common in relief formed by carbonate rocks, but can occur in silica-rich rocks such as volcanic acid, a fact not yet explored. Thus, this Master's thesis aims to understand the mechanisms responsible for the development of these landforms associated volcanic rocks through the identification and mapping of karst features, analyzing its relationship with the slope, hypsometry, lithology and morpho-structural lineaments. Furthermore, we tried to relate the distribution of features with use and land cover and check the fragility of the Serra Geral Aquifer. The study area comprises the city of São Martinho da Serra - RS, basic and acidic volcanic rocks of the Serra Geral formation. For this, the karst features were identified and mapped using satellite imagery, and morpho-structural lineaments were extracted from SRTM. We generated various cartographic products, which combined with field observations, allowed to classify the karst features that occur in the study area into three types of depressions that correspond to different stages of morphological evolution: a) Depression Surface Planed Top b) Headwater drainages suspended; c) Depression in the Valley bottom. It was found that karst features are controlled by the morpho-structural lineaments, and tend to develop in portions of volcanic flows that are more easily affected by weathering. It was observed that the depressions in the surface Planed Top occur more frequently in the municipality where the land use is predominantly agricultural, denotes the fact that risk of contamination of the aquifer Serra Geral, since its recharge also occurs through these features.

Keywords: Karst Features. Morpho-structural lineaments. Volcanic rocks. Serra Geral Aquifer.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.4.1 - Modelo esquemático planimétrico da evolução de dolinas para uvalas.....	27
FIGURA 1.4.2 - Representação esquemática de um poljé.....	28
FIGURA 1.4.3 - Zonas hidrológicas no carste.....	29
FIGURA 1.4.4 - Elementos envolvidos na formação das feições cársticas em São Martinho da Serra – RS	32
FIGURA 1.5.1 - Representação da estrutura de um derrame e morfologia de uma escarpa constituída por derrames basálticos.....	34
FIGURA 2.1 - Contato entre o Arenito Botucatu e a Formação Caturrita.....	42
FIGURA 2.2 - Paisagem formada por rocha vulcânica ácida.....	43
FIGURA 3.1.1 - Depressão circular sem água e conectada drenagem.....	52
FIGURA 3.1.2 - Depressão circular com água e desconectada a drenagem.....	53
FIGURA 3.1.3 - Visualização das depressões aplainadas de topo.....	55
FIGURA 3.1.4 - Concavidade formando uma cabeceira drenagem.....	56
FIGURA 3.1.5 - Depressão em Fundo de Vale com forma de “U”.....	57
FIGURA 3.5.1 - Bloco Diagrama da Geologia do Município de São Martinho da Serra – RS	65
FIGURA 3.5.2 - Afloramento vítreo evidenciando a zona da base do derrame.....	67
FIGURA 3.5.3 - Material argiloso alterado de topo de derrame.....	67
FIGURA 3.5.4 - Fotomicrografia de uma amostra de topo/base de derrame.....	68
FIGURA 3.5.5 - Fotomicrografia de uma amostra de centro de derrame.....	69
FIGURA 3.5.6 - Paisagem no domínio das rochas básicas.....	71
FIGURA 3.6.1 - Diagrama de Rosetas.....	72
FIGURA 3.6.2 - Depressão em Superfície Aplainada de Topo evoluindo para Cabeceira de Drenagem Suspensa.....	74
FIGURA 3.6.3 - Afloramento de rocha vulcânica em patamar de derrame.....	75

FIGURA 3.6.4 - Depressão úmida no sopé da vertente.....	76
FIGURA 3.7.1 - Depressão de Topo contendo água e entorno alterado por atividades antrópicas.....	82
FIGURA 3.7.2 - Depressão em Superfície Aplainada de Topo com formato alongado contendo água.....	83
FIGURA 3.7.3 - Depressão em Fundo de Vale.....	83
FIGURA 3.7.4 - Bomba de captação de água no interior de uma Depressão em Fundo de Vale.....	84
FIGURA 3.8.1 - Gênese e Evolução das Feições Cársticas.....	86
FIGURA 3.8.2 - Coalescência de duas depressões circulares e formação de um canal que vai ao encontro da rede de drenagem.....	87
FIGURA 3.8.3 - Formação das cabeceiras de drenagem.....	88
FIGURA 3.8.4 - Depressão em Fundo de Vale com vertentes convexas e fundo raso.....	89
FIGURA 3.8.5 - Depressão em Fundo de Vale com banhado.....	89

LISTA DE MAPAS

MAPA 2.1 - Mapa de Localização de São Martinho da Serra – RS.....	40
MAPA 3.1.1 - Distribuição Espacial das Depressões Aplainadas de Topo em São Martinho da Serra – RS.....	54
MAPA 3.2.1 - Mapa de Declividades de São Martinho da Serra – RS.....	59
MAPA 3.3.1 - Mapa Hipsométrico de São Martinho da Serra – RS.....	61
MAPA 3.7.1 - Mapa de Uso e Ocupação do Solo em São Martinho da Serra – RS.....	77
MAPA 3.7.2 - Mapa de Fragilidades do Aquífero Serra Geral em São Martinho da Serra – RS.....	81

LISTA DE TABELAS

TABELA 3.2.1 - Número de ocorrências e cotas altimétricas das Depressões em Superfície Aplainada de Topo por setores de drenagem.....	62
TABELA 3.5.1 - Depressões Aplainadas de Topo.....	66
TABELA 3.5.2 - Densidade de Rios.....	70
TABELA 3.6.1 - Classes de lineamentos, população e comprimento médio.....	72
TABELA 3.6.2 - Orientação dos eixos das cabeceiras de drenagem no Município de São Martinho da Serra – RS.....	73
TABELA 3.7.1 - Classes de Usos do Solo no município de São Martinho da Serra.....	78
TABELA 3.7.2 - Comparação do número de Depressões em Superfície Aplainada de Topo inseridas em áreas agrícolas e nos demais usos do solo.....	79
TABELA 3.7.3 - Manejo da paisagem e prováveis impactos ambientais.....	85

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	13
I - REFERENCIAL TEÓRICO.....	16
1.1 Principais teorias geomorfológicas.....	16
1.1.1 Modelos de evolução das cabeceiras de drenagem.....	20
1.2 A origem do termo	21
1.3 Relevos cársticos: processos e formas.....	22
1.4 Compartimentação geomorfológica do carste.....	24
1.5 Geologia e hidrogeologia regionais.....	33
II – CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	39
1.2 Procedimentos Metodológicos	21
III – DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	51
3.1 Caracterização e descrição das feições cársticas.....	51

3.2 Declividade.....	57
3.3 Hipsometria	60
3.4 Solos.....	63
3.4 Litologia.....	64
3.6 Lineamentos morfoestruturais.....	71
3.7 Atividade antrópicas	76
3.8 Interpretação geomorfológica para gênese e evolução das feições.....	85
IV - CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	90
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	93

INTRODUÇÃO

A superfície terrestre passa por constantes modificações que se desenrolam desde sua formação, fruto de sua dinâmica interna, ou processos endógenos, somado aos fatores externos que constituem os processos exógenos. Como argumenta Florenzano (2008), a superfície da terra não é plana nem uniforme em toda a sua extensão, caracterizando-se por elevações e depressões de diferentes formas que constituem o relevo, sendo este resultado da interação da litosfera, atmosfera, hidrosfera e biosfera.

Neste sentido, Marquez (2005), argumenta que a estabilidade do relevo decorre de suas características e dos processos que atuam sobre ele, bem como de suas tendências evolutivas e das interferências que pode sofrer dos demais componentes ambientais, ou da ação do homem.

O relevo, como um dos elementos do meio natural, apresenta uma diversidade de tipos e formas. Essas formas são dinâmicas e se manifestam ao longo do tempo e do espaço de modo diferenciado. As inter-relações que ocorrem no estrato geográfico se traduzem pela troca de energia e matéria entre os componentes e são geradoras da história natural do relevo, ou seja, responsáveis pela sua evolução e, portanto, pela gênese do modelado da superfície terrestre (ROSS, 2007).

Os relevos cársticos foram identificados e caracterizados na região próxima ao Mar Adriático, em países como a Itália, a Eslovênia, e a Croácia. Assim, o termo “Karst” foi empregado primeiramente para designar a morfologia regional em formações calcárias, como resultado de processos geoquímicos de dissolução. Dentre a variedade de formas cársticas pode-se destacar as dolinas, uvalas, lapiás, poljés, cavernas e outras.

Contudo, rochas não calcárias também podem apresentar processos de dissolução, e os resultados assemelham-se muito às formas originadas no carste de rochas calcárias. Conforme argumenta Piló (2000), atualmente existe uma tendência em incluir rochas siliclásticas no grupo das rochas cárstificáveis. Esta propensão deriva de demonstrações de que a dissolução da sílica, anteriormente considerada de baixa solubilidade, tem tido um papel importante na configuração de morfologias superficiais e subterrâneas tipicamente cársticas.

A maioria das pesquisas de âmbito nacional e internacional que tratam da dissolução e elaboração de formas cársticas em litologias não calcárias estão relacionadas à intemperização do arenito e do quartzito. No Brasil, alguns autores como Uagoda (2006), Filizola; Boulet (1995), Castro; Coelho Netto (2002) e Coelho Netto (2003) relacionam a evolução destas feições doliniformes com a abertura de vales de cabeceira. Desta forma, as feições cársticas como as depressões circulares que são resultante de mecanismos de dissolução e erosão mecânica tem participação efetiva na esculturação da paisagem e seguem modelos de evolução próprios.

Coelho Netto (2003) considera estas depressões como protovales estruturais, os quais por processos erosivo podem romper sua circularidade e dar origem aos vales de cabeceiras de drenagem. Os autores defendem a ideia de que tais depressões desenvolvem-se relacionadas aos lineamentos estruturais, o que favorece a perda vertical de água através dos sistemas de falhas.

Em rochas vulcânicas são mais escassos os trabalhos que procuram compreender a origem e evolução das feições cársticas. Na Formação Serra Geral, nos estados do Paraná e Santa Catarina, autores como Paisani; Pontelli; Geremia (2006), Bragas et al. (2006) e Bragas et al. (2007), vem pesquisando o desenvolvimento de depressões circulares e concavidades associadas as cabeceiras de drenagens.

No Planalto vulcânico do Rio Grande do Sul, também sob a Formação Serra Geral, Maciel Filho; Cabral; Spinelli (1993), Gontan; Maciel Filho (1998), Gontan (2002), identificaram a presença de feições cársticas do tipo dolinas sob condições de tectônica especiais como falhas, fraturas e descontinuidade, atribuindo estas feições ao intemperismo químico dos vitrófiros.

Neste sentido, esta Dissertação de Mestrado, servindo-se das informações já existentes sobre o assunto no Planalto Meridional do RS e na literatura especializada, buscou avançar no conhecimento desta temática. Para isso, teve-se como objetivo geral compreender os mecanismos responsáveis pelo desenvolvimento destas formas de relevo associadas a rochas vulcânicas no Município de São Martinho da Serra - RS.

Como objetivos específicos pretendeu-se:

- Identificar e mapear as feições cársticas, averiguando sua relação com a declividade, hipsometria, litologia, lineamentos morfo-estruturais, bem como

compreender estas feições no contexto geral das vertentes desta porção do Planalto.

- Mapear o uso do solo no município de São Martinho da Serra e correlacioná-lo com a presença de feições cársticas.

- Avaliar a fragilidade frente à ação antrópica do Aquífero Serra Geral levando em consideração a densidade de lineamentos morfo-estruturais.

Assim, a avaliação conjunta das informações referentes à geologia e geomorfologia permitiram uma melhor compreensão sobre a gênese, dinâmica e evolução das feições cársticas que ocorrem na região e a configuração que estas imprimem na paisagem.

Cabral (2004), afirma que entendimento das formas cársticas, é de grande relevância, pois tem implicações práticas no que se refere à manutenção de superfícies sujeitas aos mais variados tipos de interferências, sejam estas provenientes da ação do homem e/ou do próprio ambiente. Desse modo, uma melhor compreensão das feições cársticas no Município de São Martinho da Serra é de extrema importância, posto que o município se destaca na atividade de agropecuária, turismo e mineração, setores que podem causar grandes impactos ambientais se realizado de forma insustentável. Além disso, quase a totalidade do Município localiza-se sob o aquífero Serra Geral, que se caracteriza como um aquífero do tipo fraturado onde a recarga de água desenvolve-se ao longo de falhas, fraturas, descontinuidades, e feições como dolinas e uvalas que são largamente utilizadas na região, principalmente em zonas de atividades rurais.

Esta dissertação está estruturada da seguinte forma. No Capítulo I é realizada uma breve explanação sobre as principais teorias geomorfológicas e os modelos de evolução de cabeceiras de drenagens, bem como uma revisão bibliográfica sobre relevos cársticos em rochas calcárias, suas principais formas e conceitos relacionados, bem como explana sobre os relevos cársticos em litologias não calcária. Também é apresentada uma revisão sobre a Formação Serra Geral, seus aspectos petrográficos e hidrogeologia regional. No Capítulo II são descritas a caracterização da área de estudo, o município de São Martinho da Serra – RS e a metodologia utilizada no trabalho. O Capítulo III apresenta a discussão dos resultados, contendo os resultados alcançados no decorrer da pesquisa. As Considerações Parciais estão dispostas no Capítulo IV.

I. REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo faz-se uma revisão sobre as principais teorias geomorfológicas elaboradas ao longo do desenvolvimento da Geomorfologia, bem como é apresentado uma revisão sobre os processos e formas que envolvem os relevos cársticos, a compartimentação geomorfológica do carste e a descrição das formas cársticas mais comuns. É discutido o conceito de carste e pseudo-carste e exemplificado alguns trabalhos desenvolvidos no território brasileiro sobre carste em rochas não carbonáticas. Com relação a geologia e hidrogeologia regionais é dissertado sobre a morfologia dos derrames básicos e ácidos e suas características principais como permeabilidade e capacidade de armazenamento de água.

1.1 Principais Teorias Geomorfológicas

Ao longo do desenvolvimento da Ciência Geomorfológica assiste-se ao surgimento de diversas teorias que procuram explicar os mecanismos globais de evolução do relevo. Conforme Vitte (2001) os principais modelos que buscaram explicar a dinâmica da esculturação das paisagens, têm em Davis (1899), Penck (1953), King (1962), Hack (1957, 1960, 1965) trabalhos de referência. Destacam-se ainda as teorias com cerne climatogenéticos tendo como representantes J. Büdel (1957, 1977) e Millot (1977, 1983).

O modelo de evolução do relevo proposto por William Morris Davis fundamenta-se no conceito de Ciclo Geográfico e em correntes evolucionistas. Para Davis (1899) o relevo surgia como uma função da estrutura geológica, dos processos operantes e do tempo, dando este último à tônica em um modelo que valorizava particularmente o aspecto histórico (ABREU, 2003). Neste modelo o relevo teria início, meio e fim, podendo, entretanto recomeçar com um processo de rejuvenescimento, ou seja, o Ciclo Geográfico passa pela juventude, maturidade e chega à senilidade, a partir da qual o relevo pode retomar a juventude com um soerguimento de caráter tectônico.

O ciclo teria início através de um rápido soerguimento das superfícies aplainadas provocado pelas forças internas elevando-as de forma significativa acima do nível do mar. A partir daí o sistema fluvial produz forte entalhamento dos talwegues, que caracteriza o estado de juventude. A maturidade é caracterizada pelo processo denudacional marcado pelo rebaixamento do relevo de cima para baixo (*wearing-down*: desgaste para baixo), o que torna necessário admitir a continuidade da estabilidade tectônica, bem como dos processos de erosão. A evolução considerada tende a atingir total horizontalização topográfica, estágio denominado de senilidade, quando a morfologia seria representada por extensos “peneplanos”, às vezes interrompidos por formas residuais determinadas por resistência litológica, denominadas monadnocks (CASSETI, 2005). Um novo soerguimento daria início a um novo ciclo.

O modelo proposto por Walther Penck (1953) apoia-se na concepção de que emersão e denudação ocorrem ao mesmo tempo e quando o processo de entalhamento dos vales é mais intenso que o de denudação, as vertentes convexas dominam; quando a intensidade do entalhamento é igual a da denudação, predominam as vertentes retilíneas; quando o entalhamento é menos intenso do que a denudação, as vertentes côncavas dominam. (FLORENZANO, 2008).

Para Penck (1924) a natureza e o princípio da análise geomorfológica baseia-se em três elementos que são: a) os processos exogenéticos, b) os processos endogenéticos, c) os processos devido aos dois anteriores, os quais podem ser chamados de feições atuais da morfologia (ROSS, 2007; ABREU, 2003).

Enquanto Davis afirmava que o relevo evoluía de cima para baixo (*wearing-down*), Penck acreditava no recuo paralelo das vertentes (*wearing-back*, ou desgaste lateral da vertente), constituindo-se no modelo aceito para o entendimento da evolução morfológica (CASSETI, 2005). No entanto, Abreu (2003) lembra que embora o autor previsse no seu modelo a evolução das vertentes pelo recuo paralelo, não ficou especificado o papel da litologia e do intemperismo na dinâmica dos canais fluviais e das vertentes.

Outro importante modelo de evolução geomorfológica é o proposto por Hack (1960, 1979, 1982) baseado no conceito de “equilíbrio dinâmico” fundamentado na Teoria Geral dos Sistemas. Dentro desta concepção o modelado terrestre comporta-se como um sistema aberto mantendo constantes trocas de matéria e energia com os demais sistemas terrestres (CHRISTOFOLETTI, 1980). A teoria prevê que as

situações de desequilíbrio são geradas pela alteração na entrada de fluxos de energia e matéria no sistema, podendo ser de caráter intermitente (ROSS, 2007). Neste sentido, o equilíbrio pode ser mantido nos diferentes panoramas topográficos, determinado pela resistência diferencial litológica, que proporciona mesmo com declives fortes, um volume de material correspondente (CASSETI, 2005). Diante disso, o sistema pode atingir a estabilidade a qualquer momento, e a morfologia não tenderia necessariamente para o aplainamento, visto que o equilíbrio pode ocorrer sob as mais variadas circunstâncias topográficas.

Dessa forma, Caseti (2005) esclarece que enquanto a proposta de Penck considera o modelado como resultado da competição entre o levantamento e a erosão, Hack o considera como produto de uma competição entre a resistência dos materiais da crosta terrestre e o potencial das forças de denudação.

O modelo de King (1953), conhecido como Teoria da Pediplanação, propõe que os aplainamentos ocorrem em regiões que, além de estarem submetidas a condições de relativa calma tectônica, estão submetidas também a condições climáticas com tendência a aridez ou semi-aridez (SANTOS; SALGADO, 2010).

King utiliza-se do conceito de recuo paralelo das vertentes (proposto por Penck) para explicar a destruição mecânica destas e a consequente deposição de material detrítico em áreas mais deprimidas. A gênese de uma superfície aplainada teria início com uma incisão fluvial em razão de soergimentos tectônicos ou rompimentos de níveis de base. Após a dissecação/encaixamento da rede de drenagem, inicia-se o trabalho de alargamento destes vales fluviais e de retração lateral das vertentes. O processo de retração lateral das vertentes tem, por consequência, o acúmulo de material detrítico na base das mesmas. Esse material detrítico se acumula na forma de rampas suaves que se estendem da base das vertentes em direção aos leitos fluviais e são denominadas de pedimentos (SANTOS; SALGADO, 2010) e se daria por atividades ou processos torrenciais, originando as formas conhecidas como *bajadas*, proporcionando o mascaramento de toda irregularidade topográfica, caracterizando a morfologia dos pediplanos (CASSETI, 2005). Os relevos residuais que resistissem ao processo de aplainamento foram denominados de *inselbergs*.

Seguindo na linha climatogenética podem-se destacar as teorias de Büdel (1957, 1977) e Millot (1977, 1983), que relacionam as superfícies aplainadas a consequência das alterações climáticas. Büdel (1957, 1977) elaborou a teoria da

etchplanação consolidando o papel do intemperismo na análise geomorfológica (THOMAS, 1989, 1994 apud VITTE 2001). Na sua concepção existe uma “integração dialética” entre a alteração geoquímica das rochas e a erosão superficial (BÜDEL, 1982), sendo que os processos de lixiviação e lessivagem promovem a disjunção nas ligações ferro-argila, instabilizando os horizontes superficiais, preparando-os para o processo erosivo nas encostas.

Inicialmente Büdel (1957, 1963 apud VITTE, 2001) considerou que os *etchplains*, ocorreriam apenas nos trópicos sazonais situados em áreas tectonicamente estáveis. Posteriormente, admitiu a existência dessas superfícies nos trópicos úmidos, onde além da alteração das rochas participariam também as variações climáticas. Para o autor a formação do relevo ocorre a partir da interação entre a superfície topográfica e subsuperficial existente no contato entre a rocha e a zona de alteração (VITTE, 2001).

Dessa forma o intemperismo químico seria responsável pela decomposição das rochas criando assim material friável para a erosão mecânica carrear. Logo, os aplainamentos são formados e evoluem graças a um “mecanismo de duplo front” (BÜDEL, 1957): (i) superfície exumada de lavagem (*washing surface*) e; (ii) superfície basal de intemperismo (*leaching surface*). A superfície de lavagem corresponde à superfície do modelado propriamente dita onde predominam os processos mecânicos de escoamento pluvial (*washing*). Já a superfície basal de intemperismo é extremamente irregular e se localiza em subsuperfície onde a rocha é lixiviada e predomina a denudação química (*leaching*) (SANTOS; SALGADO, 2010).

A teoria de Millot (1977, 1983) envolve o conceito de *planação climática*, no qual o intemperismo e a pedogênese são fatores muito ativos, intermediando o embasamento e a erosão superficial (VITTE, 2001). Para esta teoria, a gênese dos aplainamentos estaria na sucessão de climas ao longo do tempo geológico, e não, conforme previsto na teoria da etchplanação (BÜDEL, 1957, 1977; SANTOS; SALGADO, 2010) na sucessão de estações ao longo do ano.

Millot (1977, 1983) defende que as superfícies de aplainamento são formadas inicialmente em condições climáticas semi-úmidas pela junção de três processos: (i) intemperismo da rocha fresca em subsuperfície; (ii) transformação pedogenética do material anteriormente alterado e; (iii) erosão superficial. Os processos geoquímicos são necessários principalmente como um estágio preparatório para os processos

mecânicos superficiais, visto que, estes sim, quando atuam sobre material intemperizado, possuem alta capacidade de gerar aplainamentos.

Esta capacidade só atinge potencial de aplainar em condições de clima árido ou semi-árido, pois nestes tipos de clima, a erosão mecânica continua forte, mas o intemperismo químico quase cessa. Isto faz com que o manto de alteração não aprofunde e desestruture a forma plana que o relevo está adquirindo. Logo, o relevo só será aplainado pela sucessão de climas, sendo que, os climas úmidos são responsáveis por “preparar” material para que, nos climas secos, a erosão mecânica aplane o relevo (SANTOS; SALGADO, 2010).

1.1.1 Modelo de evolução das cabeceiras de drenagem

Compreende-se por cabeceira de drenagem uma área côncava situada a montante de canal de primeira ordem, que se desenvolve no domínio das encostas sobre as quais se originam ou avançam as cabeças de canais (PAISANI; OLIVEIRA, 1999; COELHO NETTO, 2003). Os canais erosivos das cabeceiras de drenagem drenam através da rede principal de canais fluviais, integrando os processos de encostas com os processos fluviais (COELHO NETTO, 2003). Ahnert (1998) ressalta que a cabeceira de drenagem é um componente especial do sistema fluvial, porque é uma área onde a transição dos processos de denudação para transporte erosivo é caracterizada pela convergência em direção à porção terminal da rede de canais.

Um dos principais modelos que se aplica ao estudo das cabeceiras de drenagem é o desenvolvido por Gilbert (1877) que foi o primeiro autor a tentar explicar a evolução do relevo com base no equilíbrio dinâmico, embora Hack (1957, 1960, 1965) tenha ampliado consideravelmente as ideias iniciais (CASSETI, 2005). O autor definiu as leis das declividades, dos divisores e da estrutura. A lei da declividade associa velocidade de fluxo com declividade da vertente e conseqüente capacidade erosiva. Já a lei dos divisores estabelece que as maiores declividades estão mais próximas dos topos e que o perfil da vertente de uma montanha revela-se como uma curva côncava para fora. Finalmente, a lei da estrutura aponta que a esculturação do relevo depende da resistência variada das diferentes litologias (ROSS, 2007).

Avelar; Coelho Netto (1992) citados por Coelho Netto (2003) ao avaliarem os padrões espaciais de distribuição das concavidades estruturais ajustadas (CEA) e concavidades estruturais suspensas (CES), no compartimento de colinas da bacia do rio Bananal, sob diferentes litologias e densidades de fraturas subverticais, concluíram que as CES são mais frequentes em litologias que apresentam menor densidade de fraturas. Este fato alimentou a hipótese de que a denudação estaria sendo mais eficiente em áreas mais fraturadas, favorecendo o ajuste de declives entre concavidades originalmente do tipo CES, com as concavidades adjacentes do tipo CEA, o que reduziria a frequência destas, tal como previsto pela Lei do Ajuste de Declives de Gilbert (1877).

1.2 A origem do termo

O termo "Kart" é oriundo da região do Carso (em esloveno, Kars), localizada no sudoeste da Eslovênia até o noroeste da Itália, formada de rochas carbonáticas (CARVALHO JÚNIOR et al., 2008).

Conforme Christofletti (1980), a palavra *Karst* foi inicialmente empregada para designar a morfologia regional da área de calcários maciços situados nas proximidades de Rijeka (Iugoslávia). Em seguida, tornou-se um termo mais amplo empregado para designar as áreas calcárias ou dolomíticas que possuíam uma topografia característica oriunda da dissolução de tais rochas. Assim que o vocábulo se disseminou internacionalmente originou os termos *karst* (idênticos no francês, inglês e alemão), *carso* (italiano) e *carste* (português).

Para Derruau (1972, p. 238-239), o termo "Karst" parece significar campo de pedras (...) "Os geógrafos estendem o nome a toda região de grandes "plateaux" (planaltos nus, descobertos) cortados por vales e apresentando depressões fechadas e dimensões variáveis". O mesmo autor afirma que "os calcários são rochas sedimentares que dão origem a relevos originais, e algumas regiões calcárias são célebres por seu interesse morfológico e turístico"

Jennings (1971), afirma que em geomorfologia, *carste* é um terreno em que rochas solúveis são alteradas acima e abaixo do solo pela ação de dissolução da água e que tem distintas características de relevo e drenagem.

Além da área costeira Adriática da Iugoslávia, que foi a primeira a ser metodicamente descrita, existem outras importantes áreas de morfologia cárstica tais como os Causses, no sul da França, a de Kwangsi, no sul da China, a de Porto Rico, a de Cuba, a de Yucatan no México, a da Jamaica, e muitas outras de menor expressão (CHRISTOFOLETTI, 1980).

No território brasileiro são diversas as áreas que apresentam ocorrência de carste em rochas carbonáticas, sendo mais bem desenvolvidas nas proximidades de Sete Lagoas e Cordisburgo ao norte de Belo Horizonte. Destacam-se também algumas áreas no norte de Minas Gerais até o centro-sul da Bahia, acompanhando o vale do rio São Francisco, bem como o Vale do Ribeira, situado entre os estados de São Paulo e Paraná, onde o calcário sofreu forte tectonismo e algum metamorfismo (HARDT; PINTO, 2009).

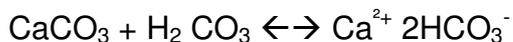
1.3 Relevos cársticos: processos e formas

Os relevos cársticos constituem-se em um estilo especial de morfologia, onde o intemperismo químico, através da dissolução da rocha encaixante, determina as suas formas. As formas resultantes expressam uma íntima relação entre os processos superficiais e subterrâneos, revelando uma paisagem definida por depressões fechadas de tamanhos variados, feições ruiformes, drenagens descontínuas em superfície, cavernas, afloramentos rochosos e sistemas de drenagens subterrânea, desenvolvida especialmente em rochas solúveis, como as carbonáticas. Dentre os seus minerais formadores destacam-se os calcários, predominantemente formado por carbonato de cálcio (CaCO_3), e os dolomitos $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$.

As rochas carbonatadas, são altamente solubilizadas na presença de ácido carbônico, que se forma a partir da combinação do dióxido de carbono, presente na atmosfera e no solo, com a água. A síntese que explica a dissolução do calcário pode ser representada pela seguinte fórmula:



A reação entre o gás carbônico e a água gera o ácido carbônico.



O carbonato de cálcio reage com o ácido carbônico que o dissolve, gerando o bicarbonato como subproduto.

Os principais fatores que afetam a cinética das reações envolvidas na dissolução das rochas carbonáticas são a temperatura, a concentração de íons H^+ e de CO_2 , portanto o pH do meio, este dependente da atividade biogênica, e a umidade. Em geral, estes fatores explicam os distintos padrões das feições originadas no carste de diferentes zonas climáticas.

Segundo Willians apud Uagoda (2006) a morfologia cárstica em latitudes temperadas é rica em formas negativas, como dolinas, uvalas e poljés, pois a denudação química será concentrada nos condutos subterrâneos. Diferentemente, a morfologia cárstica comum a latitudes tropicais será mais rica em formas positivas residuais, com a formação de cockpits, onde coexistem grandes depressões cársticas com formas residuais positivas do tipo mogotes e torres. No entanto, Piló (1998), argumenta que esta tese parece não se aplicar a alguns casos brasileiros em latitudes tropicais, apresentando feições similares aquelas ao carste de clima temperado como observado na península balcânica, em que predominam formas negativas.

Neste sentido, Piló (2000) enfatiza que a influência do clima na dinâmica e evolução dos relevos cársticos, tem motivado inúmeros debates nas últimas décadas. Este autor destaca os trabalhos de Corbel (1959) que aponta os climas frios como mais aptos a carstificação, em função da maior capacidade da água fria de absorver CO_2 . Por exemplo, a 20°C a solubilidade do CO_2 é a metade que a 0°C . Por outro lado, Lehmann (1936) afirma que nos locais de climas tropicais úmidos ocorrem o maior desenvolvimento dos relevos cársticos, em função da maior quantidade de CO_2 liberada pela vegetação (PILÓ, 2000), fator que potencializaria a capacidade de dissolução da água frente à rocha carbonática.

As equações de Corbel; Pulina e Smith; Atkinson (KARMANN, 1994) evidenciam que a determinação da taxa de denudação química é bastante complexa e depende da dureza da água, pluviosidade, evapotranspiração, área da bacia,

vazão, densidade da rocha e teor de carbonatos. Através dessas equações, foi possível calcular uma taxa de denudação de cerca de 30 mm a cada mil anos para o sistema Pérolas-Santana-SP (PULIDO 2007). White (1984), realizando comparação entre os diferentes tipos de carste, concluiu que existe uma relação direta entre os índices de precipitação e as taxas de denudação.

Além dos fatores citados anteriormente, para que ocorra o pleno desenvolvimento do modelado cárstico é necessário que a rocha solúvel apresente considerável espessura e linhas de fraqueza como fissuras e fraturas que facilitem a percolação da água para que aconteça a dissolução. Dessa forma, as descontinuidades presentes nas rochas tornam-se zonas que favorecem o trânsito da água formando caminhos preferenciais para os processos de alteração (FORD; WILLIAMS, 2007).

Como foi visto a evolução da paisagem cárstica depende da disponibilidade de água no sistema e de suas características, bem como das condições litológicas e estruturais do meio, fatores que oferecem suporte para o desenvolvimento de uma série de formas superficiais e subterrâneas que guardam uma relação direta entre si. A seguir será realizada uma descrição das formas buscando relacioná-las com a posição que ocupam na paisagem.

1.4 Compartimentação geomorfológica do Carste

Piló (2000) adota uma compartimentação geomorfológica para o carste baseado em três domínios, envolvendo a superfície (exocarste), a subsuperfície (epicarste) e o meio subterrâneo (endocarste).

O exocarste constitui-se no conjunto morfológico superficial do carste podendo adquirir uma variedade de tipologias em função das variáveis que se ajustam para configurar o relevo. As formas exocársticas podem ser subdivididas em: a) positivas: feições residuais que se tornam proeminente no relevo, como maciços, os mogotes e as torres; e b) negativas: feições de abatimento oriundas das atividades hídrica na subsuperfície, como as dolinas, uvalas e os poljes.

O epicarste é formado pela zona subcutânea, sendo constituída pela parte superior da rocha subjacente contendo material inconsolidado ou não apresentando

uma rede de fissuras elaborada por processos cársticos (PILÓ, 2000). O material de alteração encontrado “*in loco*” pode ser um produto de alteração da própria rocha matriz ou uma superposição de depósitos de encosta e de fundo de vale em grandes superfícies cársticas (UAGODA, 2006).

O endocarste designa a zona do carste formada por condutos subterrâneos e seus depósitos químicos, clásticos e orgânicos. A abertura de condutos por dissolução no meio carbonático pode ser atribuída principalmente às reações lentas de dissolução da calcita pelo ácido carbônico (H_2CO_3) onde soluções próximas do equilíbrio são capazes de percolar a rocha por grandes distâncias sem atingir a saturação (PILÓ, 2000).

Neste sentido, os resultados morfológicos do processo de carstificação recebem várias denominações, em virtude das diferentes formas presentes nas superfícies, relacionadas ao estágio em que se encontra o processo de dissolução da rocha (CARVALHO JUNIOR, 2008). A seguir serão descritas algumas formas cársticas mais comuns, como: lapiás (*Karrens*), dolinas, uvalas, poljés e cavernas.

a) Lapiás (*Karren*)

É a feição característica que marca o desenvolvimento inicial do carste. Refere-se ao conjunto de todas as microformas que entalham a superfície das rochas solúveis. Os campos de lapiás são comuns em todo o carste (BIGARELLA et al., 1994). Correspondem as caneluras ou sulcos superficiais nas rochas calcárias, podendo estar recobertas por uma camada de solo (*Bodenkarren*) ou aflorar a céu aberto (*Karren*).

O desenvolvimento desta feição segue um processo evolutivo muito específico. A atividade da água segue as fissuras, diáclases ou planos de estratificação, imprimindo uma ação química preponderante na rocha calcária, e eventualmente mecânica, corroendo-as e erodindo-as. Os planos de menor resistência da rocha são escavados e originam relevos íngrimes de cristas agudas. As dimensões das caneluras e das cristas podem variar de alguns milímetros a mais de 10 metros, sendo as formas mais comuns em torno do decímetro ao metro (CHISTOFOLETTI, 1980).

As diferenças de forma e de dimensões são explicadas pela resistência da rocha aos processos intempéricos e aos mecanismos de dissolução. Lino (2001,

apud UAGODA 2006), relaciona as superfícies de Lapiás (*Karren*) às zonas de recarga no início do sistema cárstico, onde a água concentra-se em caminhos preferenciais nas descontinuidades da rocha e demarcam, sempre, a existência de processos de denudação química. Estas superfícies podem assumir várias formas, ocorrendo em paredes horizontais ou verticais.

b) Dolinas, Uvalas e Poljés

As dolinas são consideradas a forma fundamental do *Kart*, constituindo-se nas feições mais particulares do exocarste. Esta feição sempre teve especial importância na geomorfologia cárstica, desde Cvijic (1893) que identificou-as dando a topografia cárstica seu caráter particular (FORD; WILLIANS, 2007). O termo dolina é uma expressão eslava usada normalmente para designar depressões fechadas circulares ou elípticas que podem atingir de poucos metros a centenas de metros de profundidade por varias centenas de metros de diâmetro.

Na literatura internacional alguns termos são utilizados como sinônimo para dolinas, embora possam apresentar pequenas variações de conceito dependendo do país e dos profissionais técnicos que as nomeiam. Na literatura de engenharia Norte Americana são conhecidas como “buracos”, na França como sumidouros e em países de língua inglesa como sinkholes (FORD; WILLIANS, 2007).

Para Ford; Willians (2007) o processo inicial de formação das dolinas está ligado à circulação da água em zonas de descontinuidades estruturais por onde começa o ataque químico (dissolução) e físico (remoção de materiais). A dolina começa a se formar quando proto-cavernas estendem o avanço de pontos de recarga, permitindo uma maior exposição da rocha a água. Uma vez conectado o foco de drenagem e remoção de solutos gera um funil de superfície como um tubo que drena o *karst*, alargando as fissuras e ampliando os condutos. As dolinas apresentam uma grande variedade de formas e de acordo com Carvalho Junior (2008) podem ser classificadas em: cônica, cilíndrica, prato, bacia e tigela. Em termos morfogénéticos, as dolinas podem ter origem por dissolução, colapso ou abatimento e subsidência (JENNINGS, 1985), embora a maioria apresente origem poligênica (FORD; WILLIANS, 2007).

As dolinas de dissolução apresentam bordas suaves e formato circular a alongado, sendo geralmente formadas nas interseções de juntas, fraturas ou planos

de acamamento da rocha, que conduzem a captura da drenagem e, conseqüentemente, a dissolução e o alargamento da cavidade. Dolinas de abatimento ou colapso são depressões mais ou menos afuniladas geradas pela queda do teto de cavernas próximas a superfície, formando paredes íngremes na cavidade, que são rapidamente degradadas por dissolução e ação do intemperismo físico.

Já as dolinas de subsidência caracterizam-se por um processo gradual de rebaixamento e flacidez dos depósitos de superfície sem qualquer ruptura óbvia de solo e rocha. O processo ocorre quando espessa cobertura de solo ou outro material móvel que cobre a rocha é gradualmente introduzido nas fraturas da zona epicárstica, o que ocasiona pequenas subsidências na superfície da cobertura e a criação de dolinas (PILÓ, 2000).

As uvalas correspondem a depressões alongadas formadas pela coalescência de duas ou mais dolinas e indicam uma evolução do carste. As taxas de ampliação das depressões estão diretamente relacionadas à eficiência do processo de realimentação hidrológica e ao desenvolvimento das rotas de drenagem subterrânea (PILÓ, 2000). À medida que a área de captação das águas pluviais vai sendo ampliada, a disponibilidade de água na zona de infiltração é aumentada, tornando o processo de corrosão mais eficiente e conseqüentemente aprofundando e alargando a feição. A Figura 1.4.1 ilustra o modelo esquemático de evolução das dolinas para uvalas proposto por White (1988) e adotado por Piló (2000).

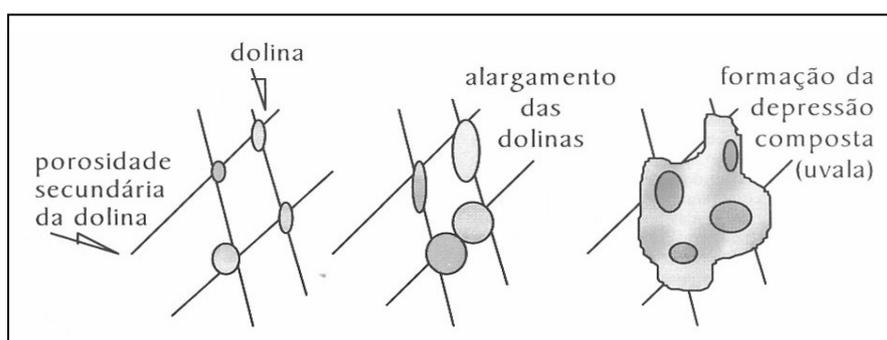


Figura 1.4.1: Modelo esquemático planimétrico da evolução de dolinas para uvalas.

Fonte: White apud Piló (2000).

Os Poljés correspondem a grandes depressões fechadas com paredes abruptas, fundo plano rochoso, ou mais comumente, recoberto por argilas de descalcificação, aluviões ou depósitos lacustres (PILÓ, 2000). Os Poljés resultam da

dissolução de extensas áreas com rochas calcárias, tendo sua origem ligada a fatores estruturais da rocha, como falhas, fraturas, horizontalidade de camadas, além de fatores relacionados aos processos corrosão. Apresentam fluxo de água subterrâneo podendo sofrer alagamento em períodos de maior umidade.

A figura 1.4.2 mostra o esquema de um poljé, no qual se observa um rebaixamento da superfície do terreno causado pela dissolução de parte da rocha.

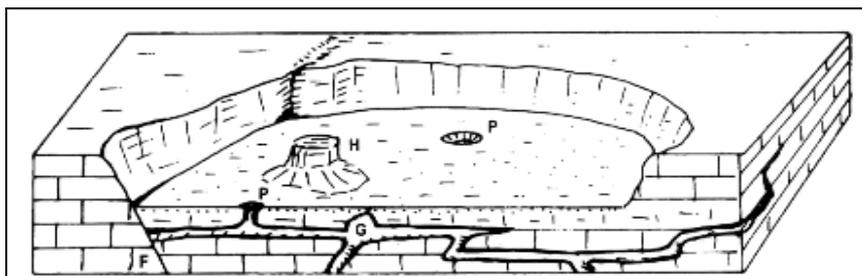


Figura 1.4.2: Representação esquemática de um poljé.
Fonte: Bigarella (1994).

c) Cavernas

As cavernas constituem-se em uma feição endocárstica, pois diferente das formas descritas anteriormente, desenvolvem-se em subsuperfície, podendo atingir vários metros de profundidade, sendo resultado da dissolução e remoção de materiais pela percolação da água através das discontinuidades litológicas. O movimento da água no interior da rocha calcária é controlado por linhas de falhas e fraturas, sendo justamente nas paredes destes lineamentos que a corrosão tem início.

Piló (2000) ao tratar do regime hidrológico no carste, individualiza quatro zonas que ilustram a circulação da água no interior da rocha e permite compreender a evolução das formas superficiais e o desenvolvimento de cavernas (Figura 1.4.3):

1) Zona superficial ou epicárstica, onde a água escoia superficialmente ou percola pelo solo ou fissuras da rocha promovendo o alargamento dos condutos. Nessa zona ocorreriam campos de lapiás, torres e dolinas e formação de solo (UAGODA, 2006).

2) Zona vadosa, onde a água circula livremente pelos condutos, sob ação da gravidade, e ocorreriam feições do tipo claraboias, paredes em fraturas, dutos verticais e *piping*.

3) Zona de oscilação do nível freático, onde os condutos apresentam-se alternadamente secos e inundados, onde ocorreriam cavernas com grandes espeleotemas pela deposição dos materiais dissolvidos nos condutos, e;

4) zona freática, onde os condutos estão totalmente ocupados por água, na qual ocorreriam cavernas praticamente sem espeleotemas, devido à contínua ação erosiva da água (UAGODA, 2006).

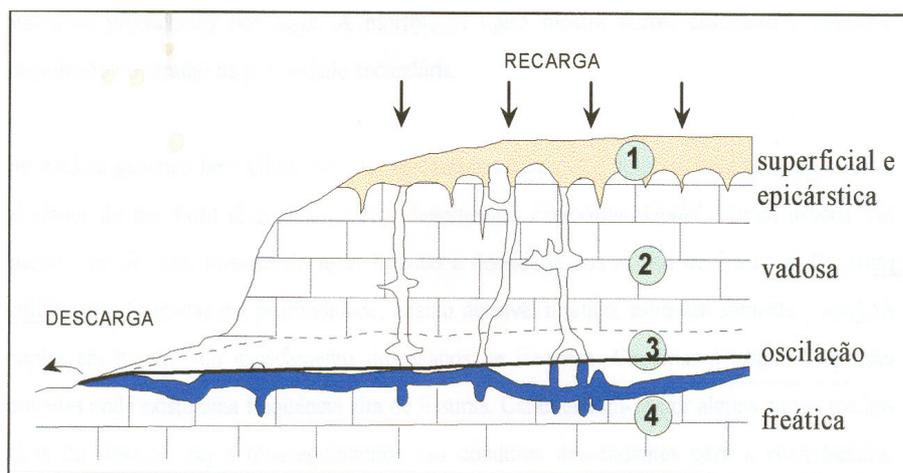


Figura 1.4.3: Zonas hidrológicas no carste, adotada por Piló (2000).

Como já mostrado anteriormente, o conceito tradicional de “Kart” é utilizado para designar a ação da água sobre os terrenos calcários, originando uma morfologia muito peculiar resultante dos processos de dissolução. No entanto, esta definição vem sendo ampliada ao longo do tempo devido à identificação de formas de relevo muito semelhantes às desenvolvidas nas rochas carbonáticas, porém esculpidas nas mais variadas litologias. Neste sentido, as feições cársticas desenvolvidas em ambientes que não se enquadravam ao carste propriamente dito, principalmente em termos litológicos, passaram a ser denominadas de “pseudo-carste”, originando termos como “pseudo-dolinas”, “pseudo-uvalas”, “pseudo-poljés” entre outros.

Embora o conceito de carste esteja em franca evolução, tendo mudado diversas vezes desde a década de 1960 até o presente existe ainda um amplo debate conceitual no sentido de classificar uma forma de relevo enquanto carste ou “pseudo-carste” (HARDT, 2003). O fato central reside na ideia de que além das rochas carbonáticas, dificilmente outras litologias apresentem potencial para desenvolverem formas típicas controladas por processos de dissolução.

Para Huggett (2007), todas as rochas são solúveis de alguma forma na presença de água, sendo possível a ocorrência de “Karst” em evaporitos tais como o gesso e a halita, em rochas como o arenito e quartzitos, e em alguns basaltos e granitos em condições favoráveis. Para o referido autor às feições decorrentes da dissolução destes minerais são consideradas “Karst” original. O autor ainda argumenta que o “Karst” também pode se formar por outros meios, como o intemperismo, a ação hidráulica, movimentos tectônicos, degelo, e a erupção de lava. Estes casos, segundo o autor, são chamados de pseudokarst, pois a dissolução não é o processo dominante no seu desenvolvimento. Ford; Willians (2007) corroboram com esta ideia considerando as feições cársticas como a conjunção entre processos de denudação química e física, na qual deve predominar o primeiro processo.

Halliday (2004) define *pseudokarst* como paisagens com morfologias semelhantes ao *karst* e/ou que possam ter uma predominância de drenagem subsuperficial através de vazios ou condutos, mas com ausência de elementos de evolução de longo prazo por solução ou erosão física.

Hardt (2003) revisando o conceito de carste, conclui que atualmente existe uma tendência a se desvincular o conceito de carste do processo formador. Desta forma, a existência de um conjunto de feições cársticas em uma determinada área caracterizaria a existência de um relevo cárstico, independente do processo ou processos envolvidos na estruturação deste relevo.

Neste sentido, Hardt; Pinto (2009) adotam a proposta de Klimchouk; Ford (2000), uma das mais recentes em que não se refere mais a “relevo cárstico”, mas em “sistema cárstico”, com uma organização peculiar. Desta forma, Klimchouk; Ford (2000) definem carste como sendo um sistema de transferência de massa integrado, em rochas solúveis, com permeabilidade estrutural dominada por condutos estabelecidos pela dissolução do material rochoso e organizado para facilitar a circulação de fluídos.

Dessa forma, em muitos estudos recentes sobre carste os autores nomeiam as formas baseados na nomenclatura cárstica tradicional, mas destacam a rocha em que tais feições ocorrem. Assim, surgem termos como carste em arenito, carste em quartzitos, etc. No território brasileiro tem-se desenvolvido diversas pesquisas sobre carste em rochas não carbonáticas, principalmente em arenitos e quartzitos. Destacam-se os trabalhos Uagoda; Avelar; Coelho Netto (2006) que descrevem a

ocorrência de depressões fechadas em quartzitos na Bacia do Ribeirão Santana, Vale do Rio Paraíba, entre os Estados de Minas Gerais e Rio de Janeiro; Hardt et al (2009) na Chapada dos Guimarães (Estado do Mato Grosso) e na Serra do Itaqueri (Estado de São Paulo) ambas as áreas em arenitos; Letenski et al.(2009) no Parque Estadual de Vila Velha (PR) também em arenitos; Sallum Filho; Karmann (2007) em arenitos da Bacia Sedimentar do Paraná, no MS e no PR; Spoladore (2005) descreve a formação de cavernas em arenito também no estado do PR, entre outros.

Além dos exemplos citados anteriormente, é possível identificar no território brasileiro diversas áreas potencialmente cársticas em rochas não carbonáticas, tais como na Chapada Diamantina (BA) com evidências de carste em quartzito; Noroeste da Amazônia Brasileira (quartzitos e arenitos); Região centro-norte de Minas Gerais (quartzitos); Região da Serra da Capivara e Sete Cidades (PI) (arenito); Estado do Tocantins (rochas siliciclásticas, em especial o arenito); Serra Geral desde o sul de Minas Gerais ao Rio Grande do Sul (arenitos da formação Botucatu e Pirambóia) (HARD; PINTO 2009).

No estado do Rio Grande do Sul, diversos autores vêm constatando a ocorrência de feições cársticas em rochas sedimentares da Depressão Periférica e em muitos trabalhos estas formas são designadas de “pseudo-cársticas” por estarem inseridas em estruturas não calcárias. Destacam-se os trabalhos de Ávila; Nummer; Pinheiro (2010) na Bacia Hidrográfica do Arroio Sarandi no município de Santa Maria, onde os focos de erosão são atribuídos às feições cársticas associadas a fraturas de direção preferencialmente nordeste; Cabral (2004) nas Bacias dos Rios Ibicuzinho, Areal do Paredão, Cacequi, Santa Maria e Ibicuí, atribuí uma relação direta entre as feições cársticas (formas doliniformes) e os processos de voçorocamentos nas cabeceiras de drenagem; Robaina; Bazzan (2006) que descrevem a ocorrência de cavernas em arenitos litificados no sudoeste do Estado; Maciel Filho; Cabral; Spinelli (1993a) na Bacia do Areal Grande no município de Cacequi, que relacionam a ocorrência de depressões em sedimentos inconsolidados com zonas de banhados que constituem as nascentes dos rios.

Em rochas vulcânicas são mais escassos os estudos que procuram compreender a origem e evolução de feições cársticas. Recentemente, em nível de Brasil, destacam-se os trabalhos de Paisani; Pontelli; Geremia (2006), Bragas, Pontelli; Paisani; Andres (2007) e Bragas et al. (2007), integrantes do grupo de

pesquisa “Gênese e Evolução de Superfícies Geomórficas e Formações Superficiais”, formado na Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Unioeste, que vem estudando o desenvolvimento de concavidades associadas a cabeceiras de drenagens no oeste dos estados do Paraná e Santa Catarina em substrato vulcânico da Formação Serra Geral.

No Planalto Meridional do Rio Grande do Sul, sob a Formação Serra Geral, os primeiros estudos devem-se a Justus et al. (1986) e se referem as dolinas e uvalas como “*dales*”, e a Maciel Filho; Cabral; Spinelli (1993) que identificaram a presença de feições de relevo do tipo dolinas sob condições de tectônica especiais como falhas, fraturas e descontinuidade, no município de São Martinho da Serra, atribuindo sua Gênese ao intemperismo químico dos vitrófiros.

De acordo com os autores, estas feições ocorrem em áreas de relevo do tipo “coxilhas” ou colinas com uma distribuição em área mais ou menos caótica, isto é, nem sempre seguindo as linhas determinadas pelos rios e formando semi-círculos e círculos quase fechados ao redor das depressões. Geralmente possuem formas arredondadas, vertentes suaves com inclinação em torno de 5°.

A figura 1.4.4 exemplifica a distribuição em perfil dos materiais envolvidos nos processos de formação das feições estudadas.

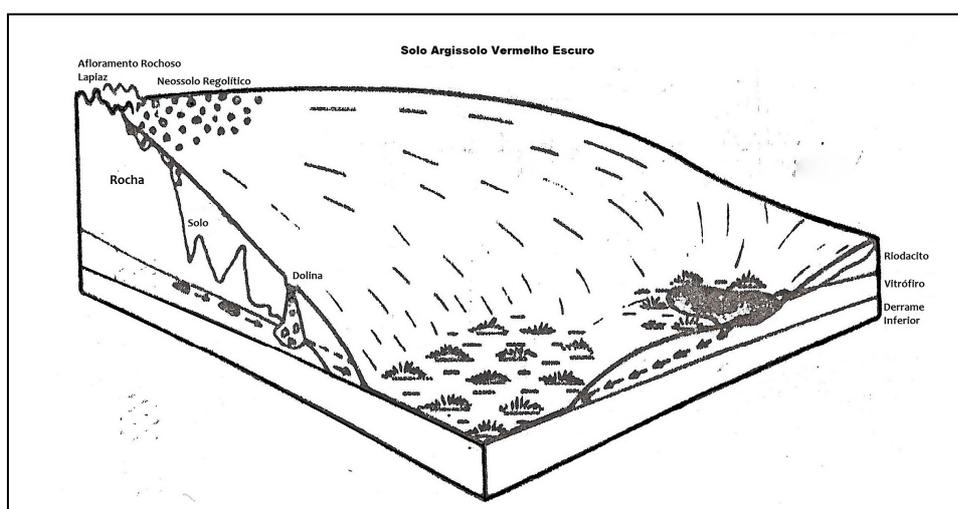


Figura 1.4.4: Ilustração dos elementos envolvidos na formação das feições cársticas em São Martinho da Serra. Fonte: Modificada de Maciel Filho; Cabral; Espinelli (1993).

A figura 1.4.4 mostra a camada constituída por vitrófiros na base do derrame. Esta camada quando sujeita a água de infiltração por tempo prolongado sofre

dissolução e perda de massa. Segundo Gontan; Maciel Filho (1998) a prova deste processo geoquímico são os saprólitos de baixa densidade.

No município de Júlio de Castilhos também foram registradas depressões circulares. De acordo com Pontelli; Silva (1992) as depressões úmidas são características da região podendo as mesmas apresentar acúmulo de água, dependendo da época do ano. Essas depressões são aproximadamente circulares e planas, com dimensões de dezenas a centenas de metros ligadas frequentemente ao vale de um rio de primeira ordem. Um pequeno córrego, cujas laterais também são baixas e alagadiças, alimentado pelo banhado ou pântano, liga essas depressões ao restante da drenagem.

No município de Itaara-RS, na localidade conhecida como Vila Etelvina, Gontan; Maciel Filho (1998) constataram que estas feições ocorrem junto a superfície de contato entre derrames vulcânicos. Os autores destacam que as depressões encontram-se em estágios mais avançados de evolução, dificultando a análise de suas origens.

Gontan (2002) ressalta que o Planalto Meridional do Rio Grande do Sul apresenta vários aspectos típicos de terrenos cársticos, sejam as pequenas depressões circulares fechadas (dolinas), lagoas naturais, afloramentos de rochas irregulares (lapiáz) e áreas alagadiças rebaixadas que podem se assemelhar a poljés, embora com dimensões menores. A autora confere estas formas à dissolução parcial da rocha, principalmente o vitrófiro e também o transporte de materiais pela água.

1.5 Geologia e hidrogeologia regionais

O município de São Martinho da Serra insere-se na Bacia Sedimentar do Paraná e encontra-se sobre uma sequência de rochas vulcânicas ácidas e básicas da Formação Serra Geral, intercalada por arenitos da Formação Botucatu. Na base desta sequência, ocorrem os arenitos da Formação Caturrita.

O pacote vulcânico, denominado de Formação Serra Geral é composto de rochas basálticas com andesitos em menor quantidade na sua base e rochas ácidas no seu topo. Frequentemente ocorrem interdigitações de derrames ácidos e básicos nas porções médias até o topo da seqüência vulcânica. São comuns as ocorrências de lentes de arenitos eólicos que se intercalam com os primeiros derrames básicos

podendo aparecer até os níveis superiores da seqüência vulcânica (ROISEMBERG; VIERO, 2000).

As espessuras das unidades vulcânicas giram em torno de 20m podendo atingir até 50m conforme a variação do paleorelevo. A atitude regional dos derrames tem sentido de mergulho para o eixo da bacia em ângulos menores do que 5 graus. Como sugere Roisenberg; Viero (2000) a espessura da pilha vulcânica básica cresce de oeste para leste, chegando a valores máximos de 600m na escarpa da região Nordeste do Estado, onde são identificados derrames básicos intercalados ou sobrepostos até cinco unidades piroclásticas.

A morfologia dos derrames básicos, segundo Roisenberg; Viero (2000) mostra da base para o topo uma zona densa e parcialmente vítrea, relativamente delgada, seguida de uma zona de diáclases horizontais, enquanto que a parte central é mais volumosa e apresenta diáclases verticais. Segue-se mais uma zona de diáclases horizontais, enquanto que o topo do derrame é amigdalar, com vesículas cuja densidade de ocorrência e tamanho variam sem padrão definido. A Figura 1.5.1 mostra a morfologia de um derrame básico.

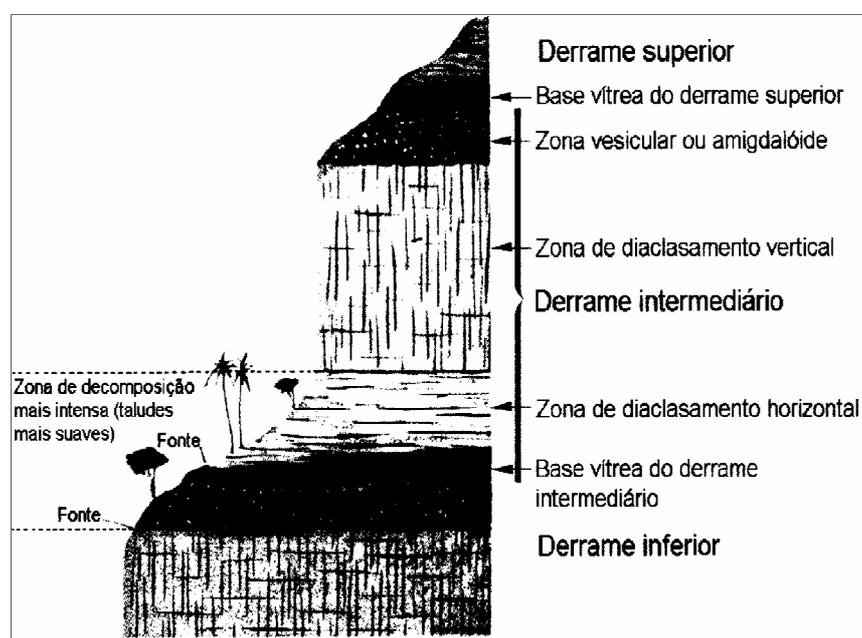


Figura 1.5.1: Representação da estrutura de um derrame e morfologia de uma escarpa constituída por derrames basálticos. Fonte: Leinz; Amaral (1989).

As amígdalas são preenchidas por zeolitas e, subordinadamente, por apofilita, ametista, calcedônia, ágata, opala, calcita, selenita, Cu nativo e outros minerais e agregados. Ocorrem comumente associados as amígdalas argilo minerais

expansivos como esmectitas, de cor verde característica que resultam da alteração de minerais primários (piroxênios e plagioclásio).

Os basaltos e rochas associadas são geralmente afíricos a subafíricos, com um conteúdo de fenocristais e microfenocristais inferior a 5% do volume, sendo constituídos por plagioclásios, augita, pigeonita, ilmenita e rara olivina, usualmente pseudomorfizada para argilo minerais. Os resíduos subvítreos contém cristais aciculares de apatita tardia, quartzo e feldspato. Já as unidades ácidas da Formação Serra Geral são constituídas por riolitos, riodacitos e quartzo-latitos que cobrem cerca de 50.000 Km² no Rio Grande do Sul, com formas tabulares e homogêneas de espessuras médias de 40m.

Para Belliene et al. (1986) o pacote ácido é constituído de dois tipos distintos petrográfica e quimicamente. O Primeiro, do tipo afírico, os autores denominaram de rochas vulcânicas tipo Palmas, cuja ocorrência no estado do Rio Grande do Sul é registrada desde a borda oriental da escarpa até os setores do centro-oeste, correspondente a região de Santiago. O segundo pacote, do tipo porfírico foi denominado de rochas vulcânicas tipo Chapecó, localizado na região noroeste do Estado, correspondente a Nonoai e adjacências.

A morfologia completa dos derrames vulcânicos ácidos aparece somente nas unidades afíricas do tipo Palmas, e pode ser dividida em três zonas. A zona basal é constituída por vitrófiros e brechas de fluxo dispostas sem padrão definido e destituídos de diaclasamento característico, correspondendo de 5 a 10% da espessura total da unidade (ROISENBERG; VIERO, 2000). De acordo com os autores, o vitrófiro consiste em lentes irregulares ou camadas descontínuas com até seis metros de espessura, mostrando freqüentemente filonetes avermelhados resultante da alteração e cristalização do vidro.

A zona central é mais espessa, caracterizada por granófiros acinzentados com diáclases tabulares na base, finamente cristalino com fraturas colunares na porção intermediária e fraturas tabulares na porção superior. A zona superior é a mais delgada, com características semelhantes à zona basal, da qual se distingue pela presença de vesículas e amígdalas preenchidas por quartzo, calcita e mais raramente por zeolitas.

Em mapeamento geológico mais recente realizado por Wildner (2008) em escala 1:750.000 para o estado do Rio Grande do Sul, a Formação Serra Geral foi dividida em fácies de acordo com suas características geoquímicas e afinidades de

campo. Desta forma, as Fácies individualizados para a Formação Serra Geral são os seguintes:

- Fácies Jaguarão: derrames de composição intermediária a félsica, com textura vitrofírica, contendo abundantes xenólitos e granitóides, fortemente reabsorvidos;

- Fácies Alegrete: derrames de composição intermediária a ácida, variando entre andesitos e riolitos, microgranulares, melanocráticos, aspecto sacaroíde, freqüentes texturas de fluxo e autobrechas no topo e bases dos derrames;

- Fácies Esmeralda: derrames básicos, microgranulares, textura microgranular, predominantemente pretos, comuns vesículas mili a centimétricas com opala preta e ágata, eventual presença de Cu nativo, alteração amarelo ovo (jarosita) característica;

- Fácies Parapanema: derrames básicos granulares finos, melanocráticos, contendo horizontes vesiculares espessos preenchidos por quartzo (ametista), zeolitas, carbonatos, seladonita, Cu nativo e barita, compreende a maior concentração das jazidas de ametista do Estado;

- Fácies Caxias: derrames de composição intermediária a ácida, riolitos a riolitos, mesocráticos, microgranulares a vitrofíricos, textura esferulítica comum (tipo carijó), forte disjunção tabular no topo dos derrames e maciço na porção central, dobras de fluxos e autobrechas freqüentes, vesículas preenchidas predominantemente por calcedônias e ágata, fonte de mineralização da região;

- Fácies Chapecó: derrames ácidos variando entre riolitos a riolitos, matriz vitrofírica contendo pórfiros;

- Fácies Gramado: derrames básicos granulares finos a médio, melanocráticos cinza, horizontes vesiculares preenchidos por zeolitas, carbonatos, apofilitas e saponita, estruturas de fluxo e *pahoehoe* comuns, intercalações com os arenitos Botucatu, e;

- Fácies Várzea do Cedro: derrames vitrofíricos pretos tipo *pichstone*, texturas de fluxo e autobrechas freqüentes, fino fraturamento perlítico.

Cabe destacar também as formações sedimentares que ocorrem na área de estudo, como a Formação Botucatu e a Formação Caturrita. A Formação Botucatu está posicionada abaixo das rochas vulcânicas da Formação Serra Geral, é composta por arenitos essencialmente quartzosos contendo feldspatos alterados

cimentados por sílica e óxidos de ferro, com estratificação cruzada de grande porte (MACIEL FILHO, 1990).

Descendo na coluna estratigráfica ocorre a Formação Caturrita que é composta por camadas de arenitos finos a médios, de cor rosa e cinza claro de composição essencialmente quartzosa e matriz argilosa, contendo em algumas partes considerável teor de feldspato, intercalados por camadas ou lentes de siltitos de espessura menor e cor avermelhada (MACIEL FILHO, 1990).

De acordo com Zalán et al. (1990) os lineamentos morfo-estruturais¹ predominantes na Bacia Sedimentar do Paraná ocorrem nas direções NW e NE. Também se destaca a existência de um terceiro grupo de lineamentos com orientações E-W. As orientações mais importantes são as NW-SE e NE-SW, que representam zonas de fraquezas antigas, recorrentemente reativadas durante a evolução da bacia

O Município de São Martinho da Serra está inserido na Província Hidrogeológica do Paraná, onde ocorre uma grande área de rochas vulcânicas da Formação Serra Geral. Esta Formação apresenta uma grande importância hidrogeológica, principalmente no sul do Brasil, decorrente da elevada explotabilidade das suas zonas aquíferas por meio de poços tubulares. As rochas da Formação Serra Geral trazem características de porosidade do tipo fissural, o que permite o armazenamento de água ao longo de fraturas e descontinuidades, correspondentes às zonas vesiculares e amigdaloidais de topo de derrame e zonas de disjunção horizontal. Nanni et al., (2005) salientam que “as zonas de disjunções, quando interceptadas por fraturas ou falhas, interconectam-se e podem armazenar grandes volumes de água”.

De acordo com a Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luiz Roessler (FEPAM, 2009), as águas subterrâneas, na Formação Serra Geral, estão condicionadas a fatores de ordem genética e tectônica. Os fatores de ordem genética são condicionantes intrínsecos da permeabilidade horizontal, ou seja, esta propriedade depende das características do material, enquanto a tectônica

¹ Os lineamentos morfo-estruturais são consequência das tensões a que são submetidas às rochas, e correspondem a estruturas tectônicas frágeis. Segundo O'Leary (1976), "um lineamento é uma feição linear mapeável da superfície cujas partes estão alinhadas numa relação retilínea ou levemente curvilínea que diferem dos padrões das feições adjacentes e que presumivelmente refletem um fenômeno de subsuperfície”.

condiciona as permeabilidades verticais, as quais interconectam as estruturas aquíferas.

Para Costa (2008), no aquífero fissural, a porosidade é meramente função das fissuras e outras descontinuidades, não se distribuindo homogeneamente em todo o aquífero, mas variando muito, de um ponto a outro. Assim, só haverá porosidade e armazenamento de água se, em determinada zona do maciço, existir fraturas. Igualmente, a condutividade hidráulica dependerá fundamentalmente, da presença de descontinuidades, já que a circulação da água no interior da rocha só ocorre através das fissuras.

Neste sentido, o aquífero Serra Geral é heterogêneo e anisotrópico, visto que a água flui com diferente velocidade para distintas direções, condicionada pelas descontinuidades sendo difícil prever a vazão. Neste sistema de fraturas, a circulação acontece quase sempre sob pressão e os poços, geralmente, apresentam um artesianismo semi-surgente (a pressão da água nas fraturas é tal que quando se perfura um poço, a água é empurrada além da superfície dando origem a poços jorrantes). As entradas de água, muitas vezes, ocorrem a partir de topos de derrame, representados por zonas amigdalares, que podem estar alteradas e intercaladas com paleossolos ou arenitos intertrápicos (FEPAM, 2009).

O sistema Aquífero Serra Geral comunica-se com o aquífero Guarani (que ocorre em arenito, rocha porosa, abaixo do Serra Geral, ou em lentes entre derrames vulcânicos) através de grandes fraturas existentes no basalto. Ora o aquífero fraturado fornece água, ora recebe do aquífero poroso. Onde existe a conexão entre os dois sistemas de aquíferos, dá-se a mistura de águas e, conseqüente, a alteração nos parâmetros geoquímicos. Outro ponto importante em relação à comunicação dos aquíferos diz respeito à possibilidade de contaminação do Aquífero Serra Geral através do sistema de fraturas e conseqüente difusão dos contaminantes para o Aquífero Guarani, que constitui uma reserva estratégica de água no Brasil Meridional. A contaminação pode fazer-se mais facilmente porque o Aquífero Serra Geral é abastecido através das descontinuidades que se comportam como macroporos e não promovem uma filtragem natural da água que infiltra no interior da rocha.

II. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O município de São Martinho da Serra está localizado na região central do estado do Rio Grande do Sul, fazendo divisa com o Município de Santa Maria, conforme mostra o mapa 2.1. A principal forma de entrada se dá pelo norte do Município de Santa Maria através BR 158, sendo necessário percorrer aproximadamente 30 Km até a estrada de acesso ao município.

A área do município é de 669,5 Km², e a população de acordo com o IBGE em 2010 é de 3.201 habitantes, o que dá uma densidade demográfica de 4,76 habitantes por Km². A maioria da população encontra-se na área rural do município, 70,6% enquanto 29,4% reside na área urbana. O Produto Interno Bruto (PIB) é baseado no setor agropecuário que se sobressai sobre a indústria e o comércio. Destaca-se a produção de soja, trigo, milho, feijão, arroz, e a criação de gado. Um grande número de famílias garante seu sustento através do artesanato, produção de leite e produtos coloniais. O município possui muitas riquezas naturais, como cascatas e rios (Ibicuí, Toropi). Atualmente ocorre também a exploração de pedras semi-preciosas como ágatas e ametistas aproveitando o potencial da região.

Geomorfologicamente, a maior parte do município localiza-se no topo do Planalto Meridional com altitude média de 470 metros acima do nível do mar (GONTAN, 1996). Já uma pequena parcela insere-se no Rebordo do Planalto, com altitudes variando de 140 a 440m aproximadamente. O Planalto Meridional pode ser compartimentalizado em duas unidades de relevo: Rebordo do Planalto ou Serra Geral e Topo do Planalto ou Planalto dos Campos Gerais (MACIEL FILHO; CABRAL; ESPINELLI, 1994). Conforme Wildner (2008), no topo do Planalto ocorrem rochas vulcânicas Básicas e Ácidas da Formação Serra Geral. No Rebordo ocorrem às mesmas rochas do topo do Planalto, além da Formação Botucatu e Formação Caturrita na base e Depósitos Aluvionais associados às planícies dos rios, principalmente o Ibicuí-Mirim localizado na área de estudo.

As rochas vulcânicas do topo da Formação Serra Geral, região Centro-Oeste do Planalto são de composição ácida, classificadas como riólitos granófiricos e vitrófiros, contrastando com os derrames localizados na base da sequência que são de constituição basáltica de natureza toleítica (SARTORI; MACIEL FILHO; MENEGOTTO, 1975; SARTORI; MACIEL FILHO, 1978; GONTAN; MACIEL FILHO, 1993).

As rochas sedimentares da Formação Botucatu e Formação e Formação Caturrita afloram no Rebordo do Planalto, sendo identificadas ao sul da sede municipal. A figura 2.1, ilustra o contato entre as Formações Caturrita e Botucatu, a uma altitude de aproximadamente 340 metros, próximo da sede do município.



Figura 2.1: Contato entre o Arenito Botucatu e a Formação Caturrita.
Foto: Prof^a.Dr^a.Andréa Valli Nummer. Data: Janeiro de 2011.

As rochas vulcânicas ácidas são mantenedoras da topografia. A morfologia do Topo do Planalto é fracamente ondulada, com coxilhas de formas tabulares, refletindo a disposição estrutural em camadas que mergulham suavemente para oeste. Nesta porção observa-se fraca dissecação do relevo apresentando vales pouco entalhados com vertentes suaves e pequena densidade de drenagem.

Em linhas gerais, a paisagem geomorfológica desta área é dominada pelas seguintes formas de relevo: a) topos tabulares suavemente ondulados, devido à presença de cabeceiras de drenagem e depressões fechadas; b) patamares curtos, em degraus estruturais no entorno das depressões maiores, formando anfiteatro; c) vales com seguimentos ora encaixados, ora suspensos, constituindo alvéolos associados às cabeceiras de drenagem; d) rios com meandros estruturais; e) predomínio de encosta retilínea e côncava; f) concavidades conectadas e desconectadas da rede hidrográfica.

Porém nas áreas cobertas por rochas básicas, menos resistentes aos processos de denudação, a topografia apresenta dissecação mais intensa refletida no entalhamento e abertura dos vales e pela presença de relevos residuais (Figura 2.2).



Figura 2.2: A frente, paisagem formada por rocha vulcânica ácida e ao fundo paisagem constituída por rocha vulcânica básica. Foto: Prof^a Dr^a. Andréa Valli Nummer. Local: Rincão dos Salvianos. Data: Janeiro de 2012.

O clima da área de acordo Nimmer (1977) é do tipo Mesotérmico Brando que domina a maior parte do Rio Grande do Sul. Não é comum a temperatura atingir índices muito baixos no inverno, sendo que o índice médio de ocorrência de geada gira em torno de 15 dias por ano, no máximo. Seu inverno apesar de muito sensível é pouco intenso, quando comparado com as regiões de maiores altitudes do Estado, enquanto que o verão é quente com médias mensais de Janeiro acima de 22°C. Os índices pluviométricos anuais situam-se entre 1.500 e 1.750 mm, com ausência de estação seca durante o ano.

O Topo do Planalto é drenado pelo Rio Toropi, tendo o Guassupi como seu principal afluente. A Bacia Toropi-Guassupi, através de seus tributários de primeira, segunda e terceira ordens, reflete a perenidade de seu regime devido ao clima úmido, seccionando o a superfície do Planalto e destacando as coxilhas, caracterizando estas pelas formas arredondadas, associadas aos processos pedogenéticos resultantes do intemperismo químico (MACIEL FILHO; GONTAN, 1998).

Destacam-se duas direções principais de escoamento das águas na área de estudo, uma para norte que através dos Arroios² Lajeado Guassupizinho, Lajeado

² Arroio é uma denominação dada aos pequenos rios no sul do Brasil, e “lajeados”, quando possuem leito rochoso associado às disjunções horizontais nas rochas vulcânicas (MACIEL FILHO; GONTAN, 1998).

Negrinho, Lajeado da Porteira, Lajeado da Encrenca e Lajeado da Esperança conduzem as águas para os Rios Guassupi e Toropí que se constituem no nível de base local, e servem de limite norte do município. Outro sentido de escoamento dá-se para sul pelos tributários do Rio Ibicuí-Mirin que drenam as áreas próximas ao Rebordo do Planalto. O padrão de drenagem predominante é dendrítico, mas também ocorre drenagem do tipo paralela, principalmente nos rios de primeira ordem, como consequência do controle estrutural.

Gontan (2002) em trabalhos no topo do Planalto próximo ao Rio Guassupi no nordeste do município identificou duas classes de solos, o Podzólico Vermelho-Escuro, classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo por Embrapa (2006; STRECH et al., 2008) e solo litólico classificados como Neossolo Regolítico.

O Argissolo é ferruginoso, com pouca permeabilidade devido ao alto teor de argila e ocorre em relevo suavemente ondulado ocupando principalmente as colinas. Já o Neossolo ocorre em relevos mais acidentados, é pouco desenvolvido e apresenta pequena espessura com o horizonte "A" assentado diretamente sobre a camada de rocha mais resistente, principalmente dos derrames ácidos.

A composição vegetal da área reúne formações campestres, capões-de-mato e galerias florestais ao longo dos rios. De acordo com Marchiori (2002) a área insere-se na região fitoecológica da "Savana Gramíneo Lenhosa" com diversos gêneros de gramíneas. É comum na área de estudo a presença de espécies como o "caraguatá" (*Bromélia balansae*) associado às depressões circulares (feições doliniformes) típicas da região.

2.1 Procedimentos Metodológicos

O presente trabalho tem por objetivo compreender os processos responsáveis pelo desenvolvimento das feições cársticas no município de São Martinho da Serra. A escolha da área de estudo deve-se aos trabalhos de Maciel Filho; Cabral; Espinelli

(1993); Gontan; Maciel Filho (1996), Gontan; Maciel Filho (1998) e Gontam (2002), que identificaram a presença expressiva destas feições.

Neste sentido, se propôs realizar uma pesquisa que vai ao encontro dos trabalhos já publicados pelos autores acima mencionados procurando avaliar a relação entre os diferentes elementos que, em conjunto contribuem para o desenvolvimento das feições na área.

Para uma compreensão inicial sobre o tema na área de estudo, além do uso da bibliografia citada acima, realizou-se o mapeamento e identificação das feições cársticas utilizando-se de produtos provenientes do Sensoriamento Remoto. Posteriormente foram sendo confeccionados os mapas temáticos, como declividade, hipsometria, lineamentos morfo-estruturais e geologia. A partir da análise combinada entre os diferentes produtos cartográficos e as observações de campo foi possível classificar as feições que ocorrem na área de estudo em três formas distintas que refletem os diferentes estágios de evolução: a) Depressão em Superfície Aplainada de Topo; b) Cabeceiras de Drenagens Suspensas, e; c) Depressão em Fundo de Vale.

Com a finalidade de atingir os objetivos propostos, a metodologia adotada neste trabalho compreende atividades de gabinete, campo e laboratório.

a) Atividades de Gabinete

As atividades de gabinete iniciaram-se pelo levantamento bibliográfico acerca do tema proposto e busca de informações de cunho cartográfico, como cartas topográficas, produtos orbitais, fotografias aéreas etc. As informações do relevo planialtimétrico e da rede hidrográfica foram retiradas das cartas topográficas do

Serviço Geográfico do Exército, em escala 1:50000, e da Base Cartográfica Vetorial Continua do Rio Grande³ do Sul também em mesma escala.

A identificação e mapeamento das feições foram realizadas com base nas imagens do satélite WorldView 2, nas bandas Pancromática MS1 e MS2. Para a cobertura de toda a área de estudo foram necessárias 4 cenas sendo uma de 25 de abril de 2008; uma de 09 de agosto de 2010; e duas de 11 de agosto de 2011. As cenas foram unidas para formar um mosaico e tratadas através do uso de filtros para uniformizar os tons das cores. Estes procedimentos contaram com o auxílio do *software Envi 4.8*. A identificação e digitalização das feições de carste foram realizadas diretamente sobre a imagem de satélite no monitor do computador utilizando o *Software ArcGis 9.3*, módulo *ArcMap*, sendo mapeadas um total de 350 depressões circulares.

b) Atividades de campo

Inicialmente os trabalhos de campo tiveram como objetivo a realização de observações prévias da paisagem, bem como levantar informações sobre a ocorrência das feições pesquisadas, como posição e forma da vertente, se as depressões continham ou não água e características da vegetação.

As atividades de campo que se seguiram foram direcionadas para o levantamento de pontos de observação dentro do perímetro municipal, localizados em cortes de estradas; depressões circulares e alongadas; zonas de afloramento rochoso e cursos d' água. Estes locais foram investigados na busca de evidências de contato entre derrames vulcânicos como a presença de geôdos, brechas vulcânicas, disjunções horizontais e vidro vulcânico além de sinais de controle estrutural.

³ A Base Vetorial Continua do Rio Grande do Sul é um material digital que contém os elementos da altimetria (pontos cotados e curvas de nível) digitalizados das cartas da Diretoria de Serviços Geográficos (DSG) e do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) em escala 1:50000. A elaboração deste material contou com o apoio da Universidade Federal do Rio Grande do Sul-UFRGS.

Foram realizadas observações a respeito das questões gerais do relevo como a declividade e altitude que as feições se encontram; grau de evolução das feições; cobertura vegetal e uso e ocupação do solo na área e; coleta de amostras de rochas para a confecção de lâminas petrográficas.

Em cada ponto analisado, realizou-se a descrição das formações superficiais sempre buscando compreender os fatos que levaram ao desenvolvimento das feições cársticas. Neste sentido, procedeu-se o registro fotográfico e a localização com GPS.

c) Atividades de Laboratório

Durante a etapa das atividades de laboratório foram confeccionados os produtos cartográficos de natureza temática no Laboratório de Geologia Ambiental (LAGEOLAM) do Centro de Ciências Naturais e Exatas da Universidade Federal de Santa Maria. Estes materiais permitiram visualizar a distribuição das feições pesquisadas subsidiando a análise e interpretação dos fatos geomorfológicos. Os mapas de declividade e hipsometria foram confeccionados a partir da Base Vetorial Contínua do Rio Grande do Sul, com o auxílio do *ArcMap*.

As classes de declividade foram estabelecidas a partir da proposta do (IPT apud Oliveira, 1998), em que seus limites assumem os seguintes valores: <2%; 2-5%; 5-15%; 15-30%; 30-45%; >45%. Esta classificação ofereceu um grau de detalhamento bastante satisfatório em vista dos objetivos propostos, visto que grande parte do topo do Planalto na área de estudo apresenta uma declividade bastante suave.

Para a execução do mapa hipsométrico, adotou-se um intervalo de classes de 60 metros, valor que refletiu bem o comportamento do relevo dada a amplitude da área, que é de 376 metros. Assim, a disposição das classes altimétricas ficou da seguinte forma: de 140 a 200; 200 a 260; 260 a 320; 320 a 380; 380 a 440; 440 a 516 metros. Estas classes foram usadas para verificar a distribuição das Depressões Aplainada de Topo em relação à altimetria da área.

Procedeu-se a verificação das feições nos setores de drenagem dos principais rios que correm no município, e registrada sua cota de ocorrência. Cabe destacar o motivo pelo qual optou-se por usar apenas as Depressões em Superfície Aplainada de Topo para se verificar a relação com as cotas altimétricas. É que estas dão início ao processo de formação das cabeceiras de drenagem, assim torna-se interessante identificar em qual altitude o processo começa para posteriormente relacionar com outras variáveis.

O mapa de Unidade de Relevo e Feições Associadas foi confeccionado com base no Modelo Digital do Terreno (MDT), que permite identificar visualmente os padrões dominantes do relevo. A separação entre as Unidades de Superfície de Topo e Fundo de Vale Dissecado teve como limite a curva de nível de 380 metros. A individualização das concavidades em conectadas e desconectadas da rede de drenagem foi realizada diretamente na tela do computador.

Com relação à geologia, as feições doliniformes foram plotadas diretamente sobre o mapa geológico e realizou-se a contagem das feições nas rochas ácidas do Fácies Caxias, nas Básicas do Fácies Gramado e nas estruturas sedimentares da Depressão Periférica.

A densidade hidrográfica foi obtida pela contagem dos cursos d'água presentes numa figura geométrica quadrada, com dois centímetros de lado, equivalendo a 2,4 Km² sobre o mapa geológico a fim de se verificar a densidade de rios em cada litologia.

O procedimento de contagem seguiu alguns critérios como os adotados por Cabral (2004) em que é realizada a setorização da área pesquisada em subunidades hidrográficas, e a amostragem considera todos os quadrados inteiros dentro da área de cada subunidade de drenagem. Além disso, a contagem foi executada das cabeceiras de cada subsetor hidrográfico para a jusante.

O método para avaliação dos lineamentos foi baseado em uma rotina de trabalho voltada para extração dos lineamentos estruturais do tipo 2. (Amaro; Strider, 1994). Estes autores ressaltam a necessidade de se distinguir dois tipos de lineamentos: os lineamentos do tipo 1, referentes a estruturas penetrativas (foliações e/ou lineações); e

os lineamentos do tipo 2, que representam estruturas frágeis como juntas e falhas.

A extração dos lineamentos foi realizada a partir de imagens do radar orbital da *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) com pixel de 30m, e contou com o auxílio do aplicativo *Global Mapper 9.0*. Os lineamentos foram reconhecidos pela presença de cristas alinhadas, fundos de vale e drenagens e digitalizados manualmente diretamente na tela do monitor de vídeo, em escala aproximadamente de 1:50000 e azimute de 45º.

Os lineamentos traçados diretamente na tela do monitor do computador resultaram em um arquivo vetorial. Cada lineamento é representado pelas coordenadas de seus pontos extremos (X1, Y1); (X2, Y2) o que possibilita reconhecer sua direção e comprimento.

Neste sentido, a relação entre a direção dos lineamentos estruturais e o eixo das cabeceiras de drenagem foi realizada visualmente a partir do conhecimento prévio das direções das estruturas. Efetuou-se a comparação das cabeceiras de drenagens contida na rede hidrográfica em escala 1:50000 com as direções dos lineamentos.

O mapa de uso e ocupação do solo foi elaborado no aplicativo *Envi 4.8* a partir da classificação da imagem do satélite Landsat 7, nas bandas 2,3,4, de 17 de Agosto de 2011. O procedimento adotado foi à classificação supervisionada, que consiste na extração de amostras (pixel) dos diferentes usos do solo. Através do mapa de uso do solo, fez-se a contagem das Depressões Aplainadas de Topo que estão inseridas nas áreas agrícolas e em outros usos.

Para a obtenção do índice de fragilidade do Aquífero Serra Geral no município de São Martinho da Serra, foi usada a variável densidade de lineamentos. Do ponto de vista da hidrogeologia, a densidade de lineamentos consiste em um parâmetro bastante significativo quando se refere à recarga de aquíferos, a contaminação e a exploração de água em meios fraturados. A densidade de lineamentos foi gerada no aplicativo *ArcMap*, e tecnicamente consiste no somatório dos comprimentos totais dos lineamentos que ocorrem dentro de uma área circular arbitrada. Posteriormente a obtenção do mapa de densidade de lineamentos, o próximo passo foi executar a

reclassificação⁴ desse documento, estabelecendo-se notas de fragilidade que variam de zero a duzentos e cinquenta (0 - 250), sendo que a fragilidade cresce com o aumento dos valores numéricos. O Quadro 2.1.1 demonstra os valores de saída do aplicativo, bem como os valores usados para a reclassificação.

Quadro 2.1.1: Valores de densidade de lineamentos reclassificados.

Classes	Σ Lineamentos(m)/Área em Km ²	Valor reclassificado	Fragilidade
1 ^a	0-500	50	Muito Baixa
2 ^a	501-1000	100	Baixa
3 ^a	1001-1500	150	Média
4 ^a	1501- 2000	200	Alta
5 ^a	2001- 2700	250	Muito Alta

Fonte: Lineamentos estruturais extraídos do SRTM.

Organização: Vinicius Duarte Guareschi.

Para uma melhor compreensão dos processos geoquímicos envolvidos na formação das feições estudadas, foi realizada a confecção de lâminas petrográficas delgadas, retirada de uma amostra de rocha que foi extraída da zona de base/topo de um derrame vulcânico. As lâminas foram confeccionadas no Laboratório de Laminação do Centro de Ciências Naturais e Exatas da Universidade Federal de Santa Maria - RS, conforme Norma Técnica 006/94 do Departamento Nacional de Estradas e Rodagens (DNER).

Para a descrição das lâminas petrográficas foi utilizado um microscópio Petrográfico que se encontra no Laboratório de Mineralogia e Petrografia do Centro de Ciências Naturais e Exatas da Universidade Federal de Santa Maria e contou com o apoio do Prof.º. Dr.º. Luis Eduardo de Souza Robaina, professor do Departamento de Geociências desta Universidade. Juntamente com a descrição, foi realizado o registro fotográfico das lâminas com uma câmera fotográfica Olympus VG-110.

⁴ Os valores de reclassificação variando de 0 a 250 foram adaptados da Metodologia usada no Projeto Frag-Rio (2009). Este método baseia-se em um sistema de notas, ou seja, quanto maior for o valor da densidade de lineamentos, maior será a fragilidade, e maior será a nota atribuída na saída do aplicativo.

III DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo é apresentado a caracterização e descrição das feições cársticas identificadas e mapeadas na área de estudo e discutido sua relação com a declividade, hipsometria, solos, litologia e lineamentos morfo-estruturais. Também é verificado a associação das feições com o uso e ocupação do solo no município de São Martinho da Serra, bem como é determinada a fragilidade do aquífero Serra Geral com base na densidade de lineamentos morfo-estruturais. Por fim, é realizada uma interpretação geomorfológica para a gênese e evolução das feições.

3.1 Caracterização e Descrição das feições cársticas

No Planalto Meridional do Rio Grande do Sul sobre a formação Serra Geral, Gontan; Maciel Filho (1998), Maciel Filho; Cabral; Spinelli (1993-b) identificaram a presença de feições cársticas que se apresentam como depressões circulares fechadas (dolinas), como formas coalescentes (uvalas) e como afloramentos naturais de vitrófiros. Estes autores relatam a ocorrência de depressões fechadas com acumulação de água formando pequenas lagoas; depressões quase fechadas com formas circulares em anfiteatro; rebaixadas para escoamento das águas e, com fundo coberto por solos hidromórficos e banhados.

Neste trabalho, o levantamento das feições cársticas no município de São Martinho da Serra - RS consistiu no estudo integrado entre litologia, morfologia, hipsometria e declividade, elementos que conduziram a busca pela relação entre os processos formadores e as formas originadas.

Através do mapeamento dessas formas comuns na área de estudo, com o uso de imagens do satélite WorldView 2, registro fotográfico e interpretação visual em campo foi possível identificar e classificar as feições que ocorrem na área em três tipos de depressões que correspondem a diferentes estágios de evolução: a) Depressão em Superfície Aplainada de Topo; b) Cabeceiras de Drenagens Suspensas, e c) Depressão em Fundo de Vale.

As Depressões em Superfície Aplainada de Topo são formas circulares e alongadas, deprimidas topograficamente, que na nomenclatura cárstica corresponderiam a dolinas e uvalas. Localizam-se nas zonas mais planas do topo do Planalto (Figuras 3.1.1 e 3.1.2) onde o escoamento superficial é dificultado. Dependendo da época do ano podem conter água, sendo comum a construção de barramentos por parte dos proprietários dos campos para o armazenamento de água dentro da feição.

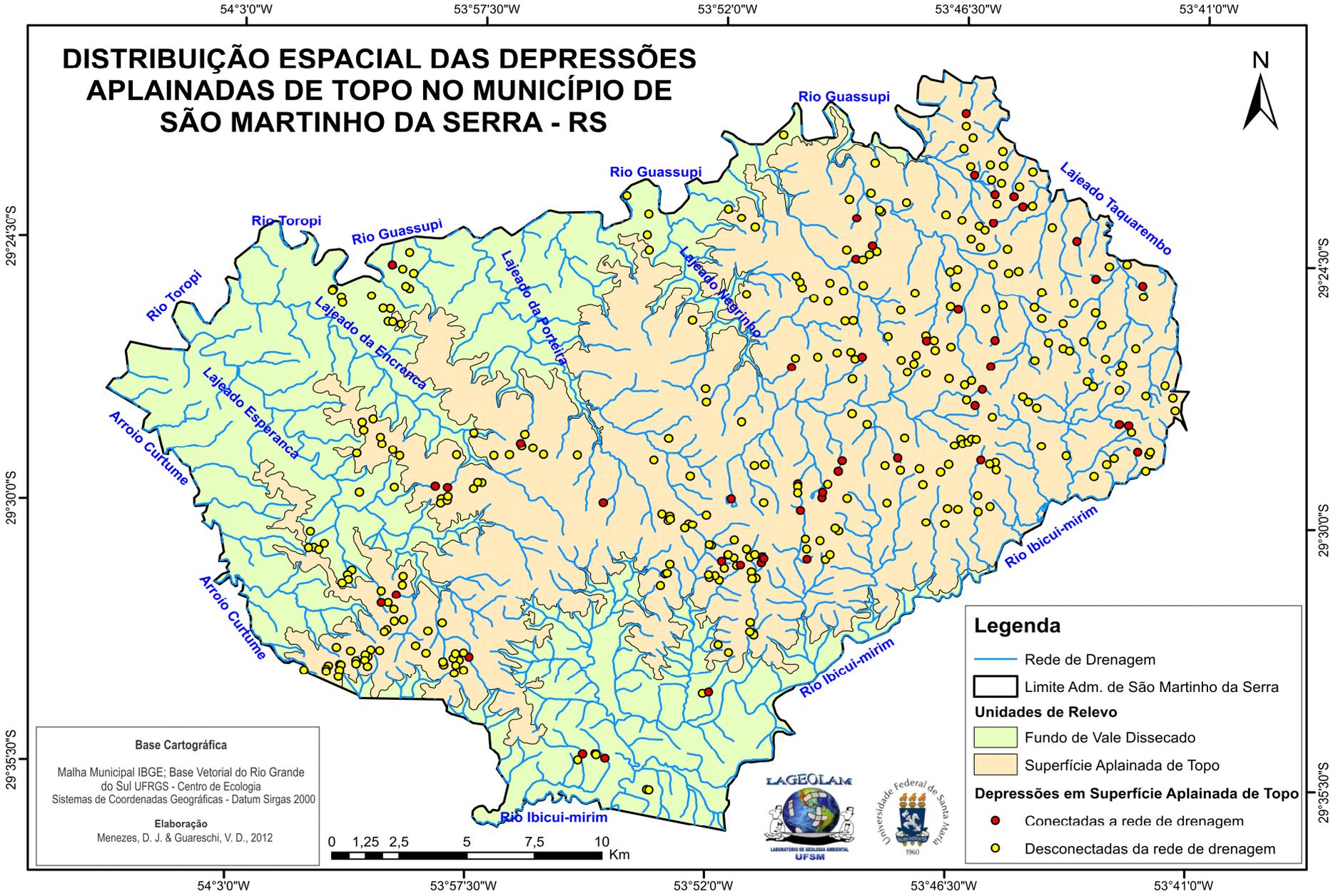


Figura 3.1.1: Depressão circular sem água e conectada a rede de drenagem. Verão de 2012. Foto: Vinícius D. Guareschi. Local: Rincão dos Negrinhos. Data: Janeiro de 2012.



Figura 3.1.2: Depressão circular com água e desconectada da rede de drenagem. Verão de 2011. Foto: Vinícius D. Guareschi. Local: Lajeadozinho. Data: Janeiro de 2011.

A maior parte das Depressões Aplainada de Topo insere-se na Unidade de Relevo denominada de Superfície Aplainada de Topo (como ilustra o Mapa 3.1.1) que se caracteriza por apresentar uma ampla área composta por colinas com formas tabulares e vertentes suaves.



A maioria destas feições (86,4%) encontra-se desconectada da rede de drenagem. A figura 3.1.3 mostra como estas depressões foram visualizadas na imagem de satélite.

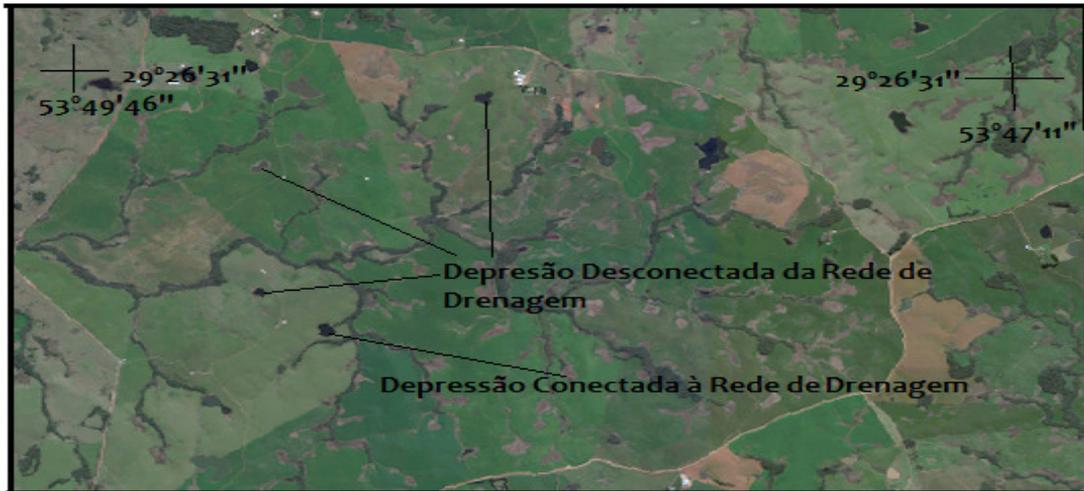


Figura 3.1.3: Visualização das Depressões Aplainada de Topo conectadas e desconectadas da rede de drenagem. Organização: Vinicius Duarte Guareschi.
Fonte: Imagem do satélite World View 2.

O segundo tipo de feição que ocorre na área foi denominado de Cabeceiras de Drenagens Suspensas, conforme Bragas et al. (2007). São unidades morfológicas côncavas que se constituem em áreas preferenciais para a convergência de água e sedimentos. Estas concavidades se apresentam em formato arredondado, ou alongado e podem estar conectadas ou não aos canais de primeira ordem semelhantes aquelas descritas por Avelar; Coelho Netto (1992). Desenvolvem-se a partir da coalescência de diversas depressões menores, indicando uma evolução destas em associação direta com lineamentos estruturais (Figura 3.1.4), assunto que será aprofundado e detalhado ao longo dos demais capítulos deste trabalho.



Figura 3.1.4: Concavidade formando uma cabeceira de drenagem pela coalescência de pequenas depressões circulares. Local: Próximo a Fazenda Posto do Rancho. Foto: Vinícius D. Guareschi. Data: Setembro de 2011.

O outro tipo de feição são as Depressões em Fundo de Vale, que tem forma de anfiteatro alongado sendo que, na maioria dos casos observados apresentam formato do vale em “U”, com fundo chato coberto por solos hidromórficos, o que proporciona característica de banhado a essas áreas. Tem como limite os patamares de derrames próximos, com dimensões variando de dezenas a centenas de metros tanto de largura como de comprimento. Uma de suas extremidades (limite a montante) coincide com o divisor de água local e a outra (à jusante) encontra-se conectada a rede de drenagem. Esta feição se desenvolve sobre um lineamento estrutural e evolui pelo forte entalhamento que sofre devido à ação da água superficial e subterrânea. Destacam-se na paisagem como áreas rebaixadas, assemelhando-se aos poljés de zonas calcárias, porém em menor dimensão (Figura 3.1.5).



Figura 3.1.5: Depressão em Fundo de Vale com forma de “U” apresentando vegetação no interior e conectada a rede de drenagem ao fundo. Foto: Vinícius D. Guareschi. Local: Lajeadozinho. Data: Janeiro de 2012.

Uma característica típica aos três tipos de feições descritas anteriormente é a associação destas formas com espécies vegetais⁵ que se adaptam a ambientes semiúmidos denominadas macrófitas. Destaca-se o caraguatá (*Bromelia balansae*) que habita os locais com relativa umidade em torno do espelho d'água ou no interior da depressão, se esta estiver sem água, como se observa nas Figuras 3.1.1 e 3.1.5.

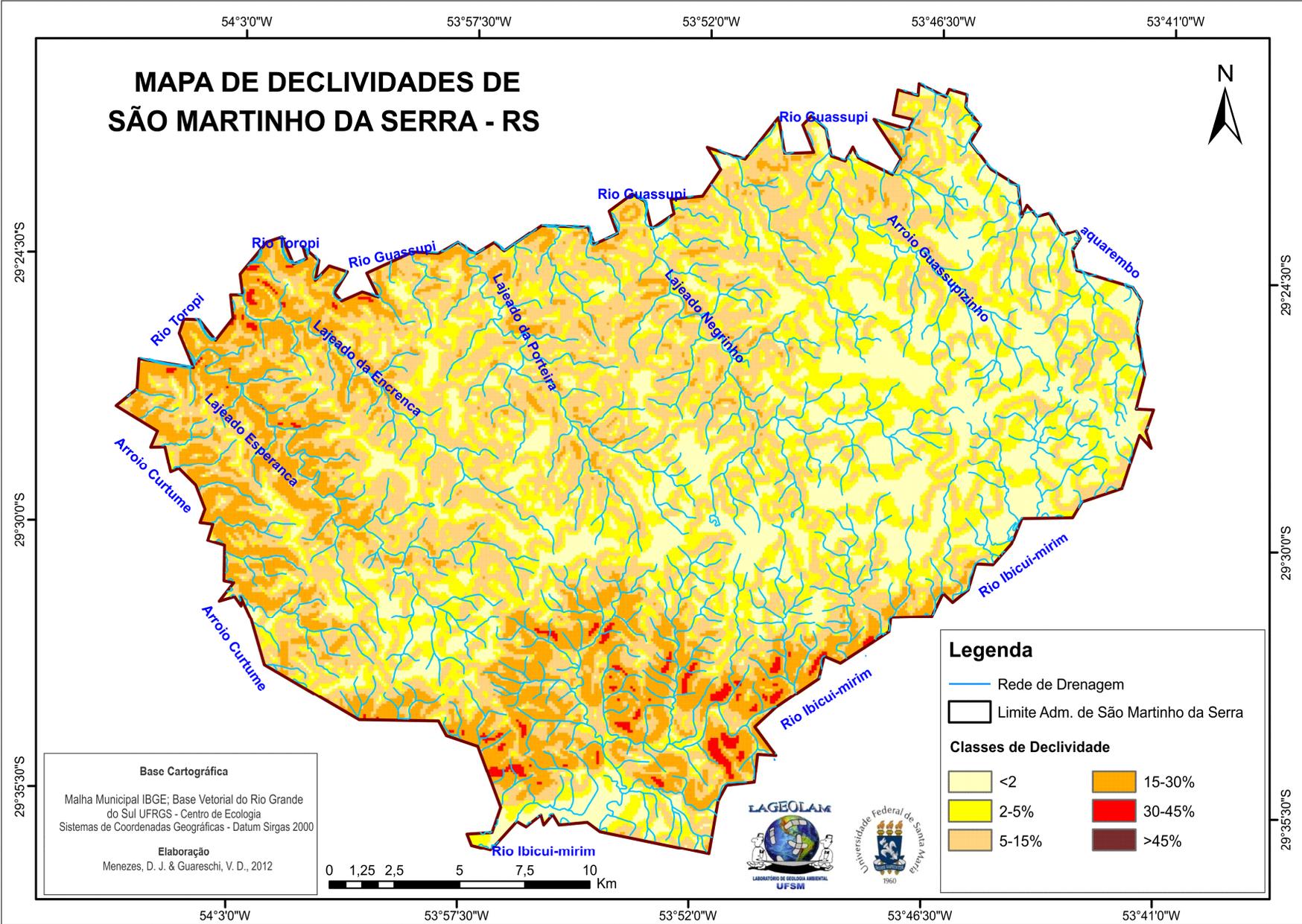
A seguir, serão caracterizadas as feições com relação a declividade; hipsometria; solos; litologia e lineamentos morfo-estruturais.

3.2 Declividade

Observando a distribuição das classes de declividade na área de estudo nota-se que as menores declividades encontram-se distribuídas nos setores mais elevados do relevo situadas no topo do Planalto em cotas altimétricas superiores de 380 metros, sendo estas as zonas em que as depressões pesquisadas são mais frequentes.

⁵ Esta associação de vegetação que ocorre no interior das feições facilita sua identificação através de imagens de satélite.

Também se verifica baixa declividade nas altitudes inferiores a 140 metros em áreas formadas por depósitos aluvionais e coluvionares ao sul do município. Já as declividades mais acentuadas ocorrem junto à superfície de entalhamento das drenagens, associadas a relevos de morros em zonas de maior dissecação, com amplitude altimétrica entre 100 e 300 metros (IPT, 1981) e na porção ocupada pelo Rebordo do Planalto, conforme ilustra o mapa 3.2.1.



Um percentual de 83% das Depressões Aplainada de Topo encontra-se em vertentes com declividades de até 5%, enquanto que as demais (17%) ocorrem em declividades que variam entre 5 e 15%. Não são registradas Depressões Aplainada de Topo em locais com declividade acima de 15%. Já as Depressões em Fundo de Vale apresentam declividades das suas bordas laterais (patamares de derrame) variando de 5 a 15%, e no fundo raso, menor que 2%.

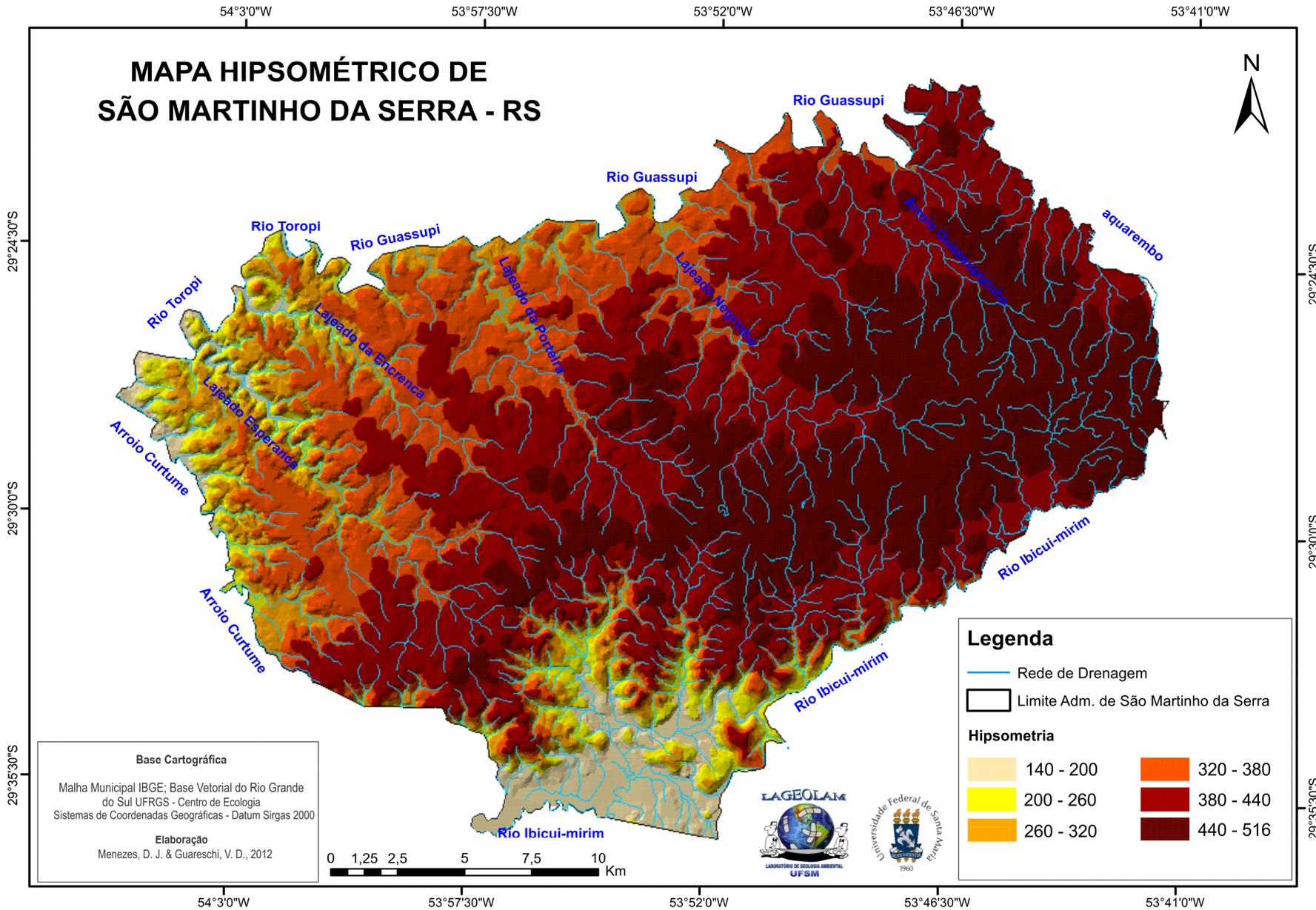
Dessa forma, pode-se concluir que as Depressões Aplainadas de Topo, maioria na área de estudo, concentram-se preferencialmente em baixas declividades, possivelmente motivada por condições de percolação lenta da água através de fraturas, diáclases e descontinuidades, que favoreceu os processos de alteração geoquímica e consequente estabelecimento das depressões fechadas.

É importante destacar que as depressões pesquisadas, independentes da modalidade em que foram classificadas, são manifestações dos processos contemporâneos de formação do relevo na Superfície Aplainada de Topo do Planalto Meridional.

3.3 Hipsometria

O relevo do município apresenta amplitude altimétrica bastante significativa, com diferença de nível em torno de 376 metros. Na maior parte da área estes valores se distribuem em grandes distâncias o que denota declividades não muito acentuadas exceto no Rebordo do Planalto onde ocorre grande diferença de altitude e altas declividades.

Os valores altimétricos adotados para a confecção do mapa hipsométrico, (Mapa 3.3.1) determinados a partir da Base Cartográfica Vetorial Contínua do Rio Grande do Sul, em escala 1:50.000 foram os seguintes: 140 a 200; 200 a 260; 260 a 320; 320 a 380; 380 a 440; 440 a 516 metros.



Este intervalo de classes hipsométricas possibilitou a visualização do nível altimétrico em que predominam os processos de formação das feições pesquisadas, conforme mostra a tabela 3.2.1

Tabela 3.3.1 - Número de ocorrências e cotas altimétricas das Depressões em Superfície Aplainada de Topo por setores de drenagem⁶.

SETORES DE DRENAGEM	NDSAT	AMOSTRAS: Nº / %		HIPSOMETRIA (M) E Nº DE OCORRÊNCIAS
Lajeado Guassupizinho	38	38	100	440-516 (28) 380-440 (10)
Lajeado Negrinho	49	49	100	440-516 (37) 380-440 (09) 320-380 (03)
Lajeado da Porteira	27	27	100	440-516 (06) 380-440 (08) 320-380 (03) 260-320 (01)
Lajeado da Encrenca	7	7	100	380-440 (07)
Lajeado da Esperança	42	42	100	440-516 (06) 380-440 (25) 320-380 (11)
Ibicuí-Mirim*	58	58	100	440-516 (56)

*Trata-se de cursos d'água tributários do Rio Ibicuí-Mirim. Pois este rio serve de limite entre os municípios de São Martinho da Serra e Itaara.

Fonte: Base Cartográfica Vetorial Contínua do Rio Grande do Sul. Escala 150000.
Organização: Vinícius D. Guareschi.
NDSAT- Número de Depressões em Superfície Aplainada de Topo.

Com base nos dados da tabela (3.3.1) é possível verificar que os níveis altimétricos em que ocorre ampla maioria das Depressões de Topo (feições doliniformes) situa-se acima de 440 metros. Das 221 depressões mapeadas nos setores de drenagem dos referidos rios, 63%, ou seja, 139 feições encontram-se nesta faixa de altitude. O segundo nível de maior ocorrência das feições está localizado na faixa hipsométrica de 380 a 440 metros, perfazendo 28% do total.

⁶ Optou-se por trabalhar com setores de drenagem em detrimento de bacias hidrográficas, pelo motivo da área de estudo se tratar de um município, ou seja, uma unidade político-administrativa.

No entanto, abaixo do nível de 380 metros, a frequência das feições doliniformes apresenta uma considerável redução. Isso evidencia uma mudança do substrato rochoso com influência frente aos processos de intemperismo e padrões de denudação.

3.4 Solos

No município de São Martinho da Serra, na porção do topo do Planalto destacam-se os solos do tipo Neossolo Regolítico, Argissolo Vermelho-Amarelo, e em menor percentual Gleissolos⁷. O primeiro distribui-se nos locais onde os processos pedogenéticos ainda não foram efetivos como as zonas de maior declividade combinado com uma litologia mais resistente aos processos intempéricos, caracterizando-se como solos rasos ou profundos e de formação muito recente. O Neossolo Regolítico apresenta horizonte A assentado sobre a rocha totalmente alterada (horizonte C ou Cr) e contato lítico em profundidade maior do que 50 cm, admitindo horizonte Bi (B incipiente) com espessura maior que 10 cm (STRECK et al., 2008). Observa-se este tipo de solo nas laterais íngremes, ou patamares de derrames, que servem de limite para as depressões de Fundo de Vale, geralmente associados a afloramentos rochosos.

De acordo Streck et al. (2008), os Argissolos são solos geralmente profundos a muito profundos, variando de bem drenados a imperfeitamente drenados, com presença de horizonte B textural. Estes solos apresentam tipicamente um perfil com gradiente textural, onde o horizonte B é significativamente mais argiloso do que o horizonte A e E.

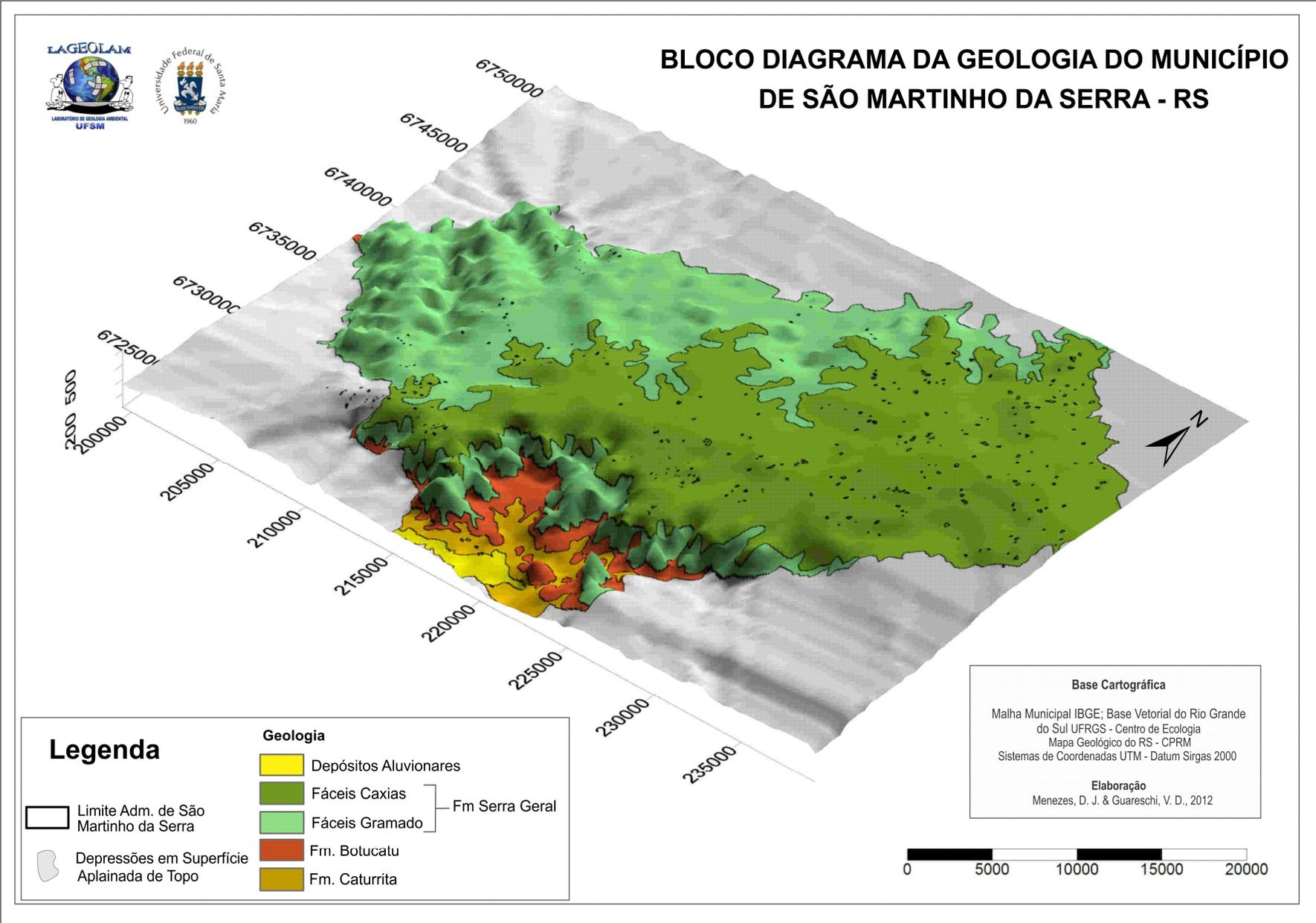
⁷ O termo Gleissolo refere-se ao processo de gleização (dissolução do ferro) atuante em ambientes alagadiços (STRECK et al., 2008).

Em São Martinho da Serra esses solos ocorrem em porções do terreno com índices de declividade mais baixos, que oferecem condições que viabilizam os processos pedogenéticos do tipo argilização.

No interior das Depressões em Fundo de Vale aparecem os solos do tipo Gleissolos, com propriedades hidromórficas. Estes solos são mal drenados de cor cinza ou preta (STRECK, 2008), e encontram-se coberto por matéria orgânica. Algumas dessas feições mostram evidência da forte influencia da água subterrânea conferindo característica de banhado a essas formas.

3.5 Litologia

As Unidades Geológicas que ocorrem na área de estudo, de acordo com a Wildner (2008), da base para o topo são: Formação Caturrita; formação Botucatu, sequências sedimentares que afloram no Rebordo do Planalto e rochas vulcânicas básicas e ácidas da Formação Serra Geral, fácies Gramado e Caxias, respectivamente. As unidades mais recentes correspondem aos depósitos aluviais situados ao longo dos Rios que se dirigem para a Depressão Periférica (Figura 3.5.1).



As rochas vulcânicas ácidas constituem-se na camada mantenedora da topografia, pois conferem uma maior resistência aos processos de intemperismo em detrimento das rochas vulcânicas básicas, sendo constituídas por riódacitos, riólitos granofíricos e vitrofiros (WILDNER, 2008; SARTORI; MACIEL FILHO; MENEGOTTO 1975; SARTORI; MACIEL FILHO 1978; GONTAN; MACIEL FILHO, 1993) e, como verificado em campo e em material cartográfico situam-se em cotas altimétricas superiores a 420 metros.

A tabela 3.5.1 mostra a distribuição das Depressões Aplainadas de Topo no município. Os dados permitem relacionar as ocorrências destas feições com a litologia da área.

Tabela 3.5.1 - Depressões Aplainada de Topo.

	Número de ocorrências	Percentual (%)
Rochas vulcânicas ácidas: Fácies Caxias	291	83%
Rochas vulcânicas básicas: Fácies Gramado	51	14,5%
Rochas sedimentares	8	2,0 %

Organização: Vinícius D. Guareschi

A partir da tabela 3.5.1 verifica-se que a ampla maioria das feições doliniformes encontram-se sobre as rochas ácidas. Tal constatação permite a seguinte indagação. Qual a influência que a litologia exerce para a gênese das formas? Por que as rochas ácidas ricas em sílica, e, portanto mais resistentes aos processos de intemperismo são as que registram a grande maioria das feições doliniformes?

Na busca pela gênese das formas foram levantados 46 pontos de observação dentro do perímetro municipal, localizados em cortes de estrada; depressões circulares e alongadas; zonas de afloramento rochoso e cursos d' água. A escolha destes locais foi motivada pela busca de possíveis elementos como zonas de contato entre derrames junto às feições pesquisadas, sinal de alteração em materiais de superfície, evidência de controle estrutural e peculiaridades da área, ou seja, qualquer informação que auxiliasse na investigação proposta.

As figuras 3.5.2 e 3.5.3 mostram porções distintas dos derrames ácidos com sinais de alteração.



Figura 3.5.2: Afloramento vítreo evidenciando a zona da base do derrame. Foto: Vinícius D. Guareschi. Local: Rincão dos Negrinhos. Data: Setembro de 2011.



Figura 3.5.3: Material argiloso alterado de topo de derrame com presença de vesículas. Foto: Vinícius D. Guareschi. Local: Lajeadoinho. Data: Setembro de 2011.

A figura 3.5.3 ilustra a alteração no topo de um derrame, situado a 500 metros de altitude. Nesta cota altimétrica, a poucos metros deste ponto encontra-se uma Depressão em Superfície Aplainada de Topo contendo água localizada sobre esta porção do derrame. Já a figura 3.5.2 mostra a base de um derrame situado a 445 metros de altitude com afloramento de vitrófiro, moderadamente alterado. Este

afloramento rochoso encontra-se no interior de uma Depressão em Fundo de Vale, a qual apresenta as características típicas desta unidade como descrito anteriormente.

Em todos os pontos levantados em campo, foi constatado que as feições estão condicionadas a zonas de contato de derrame, fato que foi comprovado através da análise microscópica de lâminas petrográficas. Para tanto, foram confeccionadas duas lâminas, uma extraída de uma amostra retirada da porção da base/topo⁸ de um derrame e a outra da porção central. Na primeira lâmina é possível evidenciar traços de decomposição através da forte alteração dos minerais (aparentando ser feldspato), com massa de cor vermelha (Figura 3.5.4).



Figura 3.5.4: Fotomicrografia a luz polarizada (2,5X LN, dimensões do campo: 3,6 x 5,4mm) de uma amostra de topo/base de derrame. A área circular no centro da foto ilustra alteração dos minerais. Presença de vidro vulcânico em processo de desvitrificação para argilomineral.

A partir da análise da Figura 3.5 são fortes as evidências que levam a crer na alteração do vidro vulcânico como proposto por Maciel Filho; Cabral; Espinelli (1993), Gontan; Maciel Filho (1998), Gontan (2002). Neste sentido, de acordo com Bigarella (2007) o feldspato constitui um dos primeiros minerais a ser afetado pelo intemperismo. O ataque dá-se nos interstícios da rocha e também nos planos de clivagem dos minerais.

O início da alteração caracteriza-se pelo aparecimento de uma nebulosidade esbranquiçada sobre a área atacada do mineral. Pela hidrólise forma-se um silicato hidratado de alumínio (mineral argiloso), sílica solúvel e íons alcalinos e/ou alcalinos

⁸ A análise macroscópica revela amostra do tipo Afanítica, com textura amigdalóide abundante, cerca de 30%, preenchida por zeolitas.

terrosos. O processo de alteração tem continuidade com a dissolução da sílica amorfa, que é cerca de 20 vezes mais solúvel que o quartzo (CARROLL apud MACIEL FILHO; CABRAL; SPINELLI, 1993) Neste sentido, a ideia de se tratar de uma área cárstica fica reforçada, pois verifica-se evidência de dissolução da sílica (Figura 3.5.4) combinada com a existência de um conjunto de feições resultante dos processos de denudação química e física, como preconizado por diversos autores, entre eles (FORD; WILLIAMS, 2007; HARD, 2003).

Na lâmina cuja amostra foi retirada da porção central do derrame ácido, a microscopia revela o predomínio de minerais félsicos, com intercrescimento de quartzo e feldspato. Também é possível visualizar minerais máficos, como o piroxênio apresentando óxido de ferro nas fraturas e bordas. Os cristais são opacos e anédricos, e a distribuição dos minerais ocorre aproximadamente nas seguintes proporções: 15% de piroxênio; 5% de minerais opaco e 80% intercrescimento de quartzo, feldspato e plagioclásio. A amostra é um dacito onde não foi verificado sinais de alteração (Figura 3.5.5).

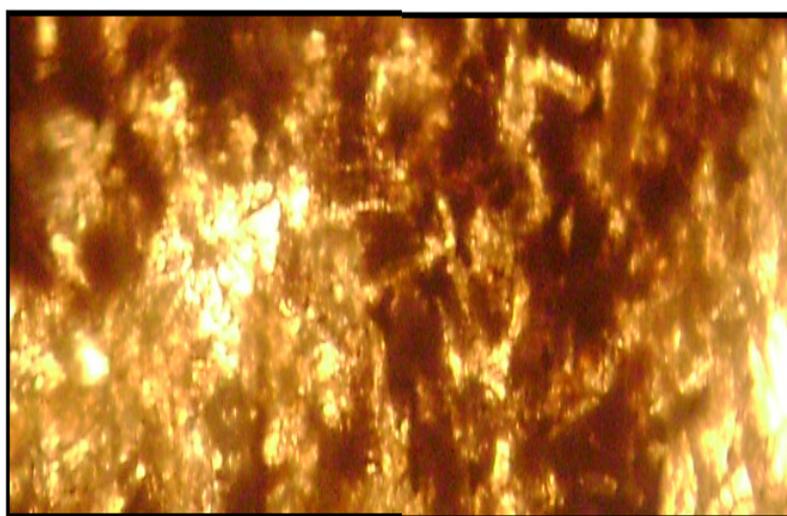


Figura 3.5.5: Fotomicrografia a luz polarizada (2,5X LN, dimensões do campo: 3,6 x 5,4mm) de uma amostra de centro de derrame. Os cristais apresentam ângulos agudos, o que revela que não foram atacados pelo intemperismo.

No domínio das rochas básicas, a ocorrência das feições doliniformes é bastante restrita, como foi mostrado anteriormente na tabela 3.5.1. As circunstâncias para isso podem ter explicação no padrão de dissecação desta superfície.

Uma variável que pode fornecer subsídios para a compreensão deste fato é a Densidade de Rios. Esta variável apresenta uma relação direta com as ondulações

do relevo, sendo possível afirmar que quanto maior for a densidade de rios maior será o grau de dissecação de uma determinada área e maior a energia de seu relevo.

Tabela 3.5.2 - Densidade de Rios tomada da montante para a jusante.

Setor de Drenagem	Amostras		Número de cursos em 2,4 Km ²		Número de cursos por ha		Densidade de rios		Relação Número de cursos (Km ²) / Amostras	
	Ácidas	Básicas	Ácidas	Básicas	Ácidas	Básicas	Ácidas	Básicas	Ácidas	Básicas
Rio Lajeado Guassupizinho	1 2 3		8 6 5		0,03 0,025 0,020		3,3 2,5 2,0		6,3	
Lajeado Negrinho	1 2 3	1	7 8 7	6	0,029 0,03 0,029	0,025	2,9 3,3 2,9	2,5	7,3	6
Lajeado da Porteira	1 2	1 2 3	7 7	5 6 3 4	0,029 0,029	0,020 0,025 0,012 0,016	2,9 2,9	2,4 2,5 1,25 1,6	7	6
Lajeado da Encrenca	1	1 2 3	1	6 5 5	0,0041	0,025 0,020 0,020	0,41	2,5 2,0 2,0	1	5,3
Lajeado da Esperança	1	1	6	10	0,025	0,041	2,0	4,1	6	10
Total	17	17	62	50	0,250	0,204	24,93	20,85	1,62	1,60

Organização: Vinícius D. Guareschi

Os dados da tabela 3.5.2 revelam que no domínio das rochas ácidas ocorre uma maior Densidade de Rios possivelmente motivada pelos padrões de lineamentos e pela altitude destes derrames sendo nas rochas ácidas que se encontram grande parte das cabeceiras de drenagem dos principais rios que drenam o município. Isso permite deduzir que no domínio destas rochas os processos de esculturação da paisagem estão bastante atuantes, porém impondo um grau de dissecação moderada ao relevo, sem incisão violenta dos cursos d'água, com vertentes de lenta evolução (ROSS, 2007) como consequência da maior resistência frente aos processos de alteração destas unidades.

Isto pode explicar o fato das depressões estudadas concentrarem-se nas rochas ácidas e permite inferir que nas rochas básicas os processos de denudação

em tempos geológicos pretéritos já destruíram estas formas, evidenciado pelo alargamento e aprofundamento dos vales, como ilustra a figura 3.5.6.



Figura 3.5.6: Paisagem no domínio das rochas básicas. Observa-se o forte entalhamento dos vales e grande amplitude das vertentes, devido aos processos de denudação, fatores que promoveram o arrasamento das feições doliniformes. Local: Fazenda do Mate. Data: Janeiro de 2012. Foto: Vinicius D. Guareschi.

3.6 Lineamentos morfo-estruturais

A partir da interpretação das imagens SRTM para o município de São Martinho da Serra, foram identificados e mapeados 1230 lineamentos morfo-estruturais (falhas e fraturas). Com base no diagrama de rosetas ilustrado pela figura 3.6.1 e na análise dos dados, as estruturas foram divididas em quatro famílias diferentes: NW-SE (110° a 160° ou 290° a 340°); E-W (70° a 110° ou 250° a 290°); N-S (340° a 20° ou 160° a 200°) e NE-SW (20° a 70° ou 200° a 250°).

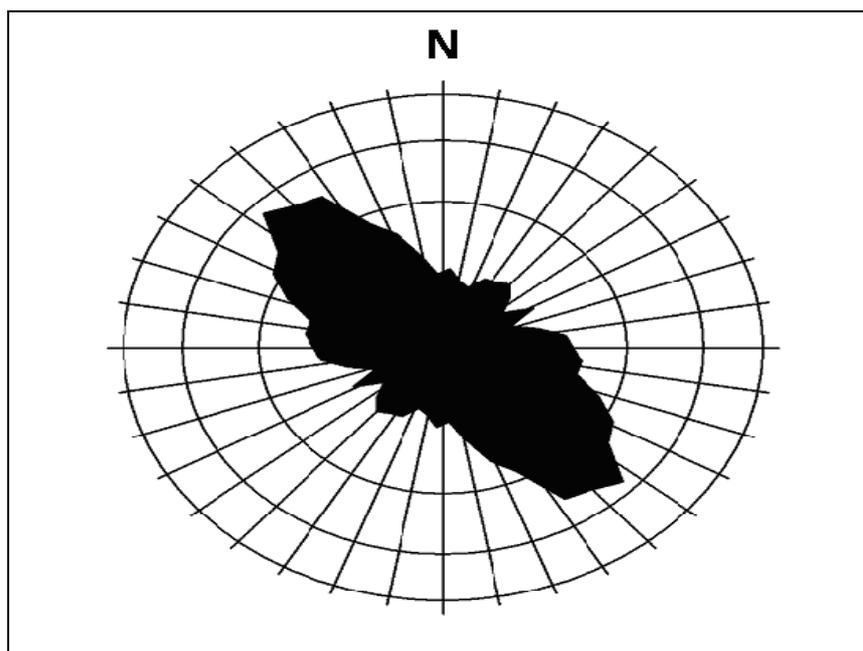


Figura 3.6.1: Diagrama de Rosetas mostrando as direções preferenciais dos lineamentos estruturais no município de São Martinho da Serra - RS. Elaboração: Vinícius D. Guareschi. Fonte: Imagem SRTM, 2010.

A grande maioria dos lineamentos encontra-se segundo a direção NW-SE, (110° a 160° ou 290°-340°) sendo que do total mapeado, 59% estão nesta direção. Logo após aparecem os lineamentos no sentido E-W, representando um total de 18% dos lineamentos da área. Em menor número ocorrem os lineamentos de direções N-S e NE-SW, com 12% e 11% do total de lineamentos, respectivamente. Com relação aos comprimentos médios dos lineamentos, se verifica uma pequena diferença entre as famílias. A tabela 3.6.1 mostra as famílias de lineamentos, população e comprimento médio.

Tabela 3.6.1 - Classes de lineamentos, população e comprimento médio.

CLASSE	POPULAÇÃO	MÉDIA DOS COMPRIMENTOS (Km)
NW-SE	725	759
N-S	146	671
NE-SW	139	684
E-W	220	675

Organização: Vinicius D. Guareschi.
Fonte: SRTM.

Além dos lineamentos NW-SE apresentarem o maior comprimento médio, esta família também tem as estruturas com maior comprimento linear, muitos destes

condicionam o curso dos principais rios que correm no município como os Arroio Lajeado Guassupizinho, Lajeado Negrinho, Lajeado da Porteira, Lajeado da Encrenca e Lajeado da Esperança.

A partir dos arquivos vetoriais dos lineamentos estruturais foi possível verificar a relação entre estes e as cabeceiras de drenagem. A tabela 3.6.2 relaciona o eixo das cabeceiras de drenagem com a família de lineamentos predominante na área de estudo.

Tabela 3.6.2: Orientação dos eixos das cabeceiras de drenagem alinhados na direção NW-SE.

Setor de Drenagem	Nº de Casos Direção (NW-SE)	Total de Cabeceiras	Percentual
Arroio Lajeado Guassupizinho	5	23	21,7
Arroio Lajeado Negrinho	16	49	32,6
Arroio Lajeado da Porteira	7	27	25,9
Arroio Lajeado da Encrenca	3	17	17,6
Arroio Lajeado da Esperança	10	42	23,8
Total	41	158	25,9

Organização: Vinícius D. Guareschi.

Fonte: Base Vetorial Contínua do Rio Grande do Sul e SRTM.

O controle estrutural foi verificado registrando-se o percentual de cabeceiras com eixo de drenagem na direção NW-SE. Em relação ao total de 158 cabeceiras de drenagem nos setores dos rios mencionados na tabela acima, 41 (25,9%) estão alinhadas ou exibem eixo de drenagem dispostos na mesma direção da principal família de lineamentos, fato que mostra o controle estrutural destas feições.

A comparação direta entre orientação de fraturas e eixo de drenagem se mostrou baixa, fato já constatado por Avellar; Coelho (1992) no sudeste brasileiro e por Paisani; Pontelli; Geremia (2006) no sudoeste do Paraná sob a Formação Serra Geral, revelando uma correlação estatística não linear. Isso não significa que as demais cabeceiras (74,1%) não sejam controladas por fraturas. Elas podem exibir orientações de eixos de drenagem coincidentes com as direções das demais

fraturas, fato comprovado pelo paralelismo dos cursos d'água de primeira ordem verificado em material cartográfico e nas observações de campo.

A figura 3.6.2 ilustra uma Depressão em Superfície Aplainada de Topo evoluindo para uma Cabeceira de Drenagem Suspensa, através de alinhamentos estruturais. Este fato demonstra a importância dos lineamentos estruturais para o desenvolvimento e evolução das feições morfológicas pesquisadas.

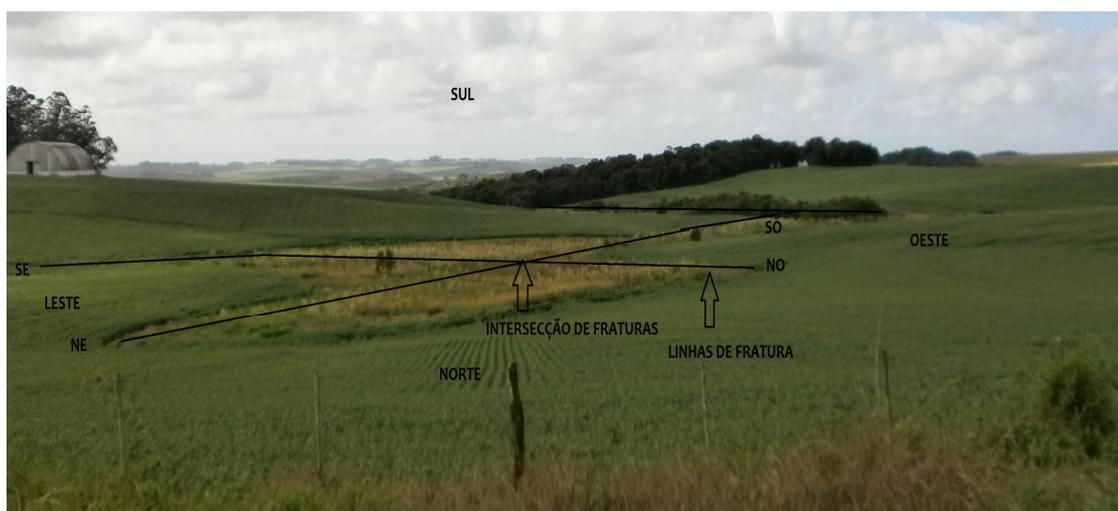


Figura 3.6.2: Depressão em Superfície Aplainada de Topo evoluindo para Cabeceira de Drenagem Suspensa. Esta evolução ocorre seguindo alinhamentos estruturais no terreno. Foto: V. Guareschi. Local: Granja São Marcos. Data Janeiro de 2012.

Neste caso a evolução ocorre pela coalescência de depressões circulares que se desenvolvem inicialmente sobre linhas de falhas. Como os lineamentos (fraturas e/ou falhas) são locais de circulação superficial e subterrânea de água, as feições acabam rompendo sua circularidade e alongando-se no sentido destas estruturas. Quando a depressão tem origem em zonas que apresentam intercruzamento de fraturas, a tendência é que a evolução ocorra de forma mais acelerada, já que estas zonas armazenam e transmitem maior quantidade de água, fato que favorece a alteração geoquímica e o transporte mecânico dos materiais que prossegue ao longo do limite cristal (WRAY, 1997; FORD; WILLIAMS 2007).

Como ilustrado acima, a continuidade da evolução deve se dar (segundo a direção destes lineamentos) de duas formas, uma que tende a expandir a cabeça do canal em direção ao divisor de água, ou seja, através de erosão remontante, e outra que promoverá o aprofundamento e alargamento da feição dando início ao novo estágio de evolução, constituindo uma Depressão em Fundo de Vale, fato já

constatado por Avellar; Coelho Netto (1992) e Coelho Netto (2003) na Bacia Hidrográfica do Ribeirão Santana entre os estados de MG e RJ.

Na área de estudo é possível perceber o nítido alinhamento das Depressões em Superfície Aplainada de Topo⁹ segundo a direção dos lineamentos, indicando que o seu desenvolvimento foi favorecido pela perda vertical de água através destas estruturas e de suas intersecções o que corrobora com os estudos de Felizola; Boulet (1994).

As disjunções horizontais e verticais frutos da morfologia interna dos derrames também podem conter água. Estas disjunções, quando interceptadas por zonas de falhas e/ou fraturas constituem pontos importantes de armazenamento e transmissão de água. Na área de estudo estas discontinuidades formam o Sistema Aquífero Serra Geral. A figura 3.6.3 ilustra em um corte na estrada as disjunções sub-horizontais da porção central de um derrame vulcânico ácido.



Figura 3.6.3: Afloramento de rocha vulcânica em patamar de derrame com disjunções sub-horizontais e camadas apresentando mergulho suave para Sudoeste. Foto: Vinicius D. Guareschi. Local: Passo do Negrinho. Data: Janeiro de 2012.

Este afloramento localiza-se a meia encosta a uma altitude de 430 metros. O derrame vulcânico é cortado por um sistema de fraturas de direção NO-SE e NE-SO, este último corta perpendicularmente o referido derrame. Bem próximo deste ponto, no sopé da vertente, cerca de 150 metros, local onde ocorre o cruzamento dos

⁹ As depressões foram mapeadas através de imagem de satélites, e os lineamentos estruturais foram extraídos a partir de uma imagem SRTM. Dessa forma, é possível plotar as depressões sobre os lineamentos a fim de verificar a relação entre estes e as depressões.

lineamentos, encontra-se uma depressão circular contendo água mesmo em época de estiagem (Figura 3.6.4).

Este fato reforça a ideia de que as discontinuidades (tectônicas e morfológicas) funcionam como vias de infiltração e exfiltração de fluxos d'água e contribuem para o desenvolvimento e evolução das feições na medida em que favorecem aos processos de alteração e remoção de materiais. Uma vez estabelecidas na paisagem, essas formas passam a atuar como “depressões por ponto de recarga” (FORD; WILLIAMS; 2007) e funcionam como pontos de drenagem centrípeta para o “runoff” alogênico. Desta forma, tanto maior a contribuição para a captação quanto maior se tornarem essas depressões fornecendo e/ou recebendo água do aquífero em determinados períodos do ano.



Figura 3.6.4: Depressão úmida no sopé da vertente. A umidade deve-se a exfiltração de água que escoam pelas discontinuidades da rocha. Foto: Vinicius D. Guareschi. Local: Passo do Negrinho. Data: Janeiro de 2012.

A figura acima mostra a existência de água no interior da depressão embora nesta data o Estado do Rio Grande do Sul estivesse enfrentando um período de estiagem devido a ocorrência do fenômeno La Nina evidenciando assim a grande capacidade de armazenamento de água no interior das discontinuidades litológicas.

3.7 Atividades antrópicas

As formas de uso do solo no município de São Martinho da Serra podem ser visualizadas no mapa de Uso e Ocupação do Solo (Mapa 3.7.1).

O mapa 3.7 foi confeccionado a partir da classificação da imagem do satélite Landsat 7 nas bandas 2, 3 e 4 de 17 de Agosto de 2011. A distribuição das classes de uso do solo pode ser observada na tabela 3.7.1.

Tabela 3.7.1 - Classes de Usos do Solo no município de São Martinho da Serra.

Classe de Uso	Total em Km²	Percentual (%) da área municipal
Agricultura	186,21	27,79
Água	3,90	0,58
Campo	246,98	36,86
Floresta	190,95	28,5
Solo Exposto	41,83	6,24

Organização: Vinícius Duarte Guareschi.

Fonte: Imagem de Satélite Landsat 7. Data: Agosto de 2011.

Avaliando os dados da tabela 3.7.1 verifica-se que o uso do solo em Agricultura¹⁰ está em terceiro lugar em área, sendo superado pela área de Floresta e Campo. Esta última classe ocupa grande parte do município de São Martinho da Serra.

Observando o mapa 3.7.1 vê-se que a agricultura ocupa uma vasta área do município distribuindo-se de forma quase contínua do centro para o leste sob um relevo suavemente ondulado, justamente onde predominam as feições pesquisadas, bem como onde se concentra grande parte das nascentes dos Rios Lajeado Guassupizinho, Lajeado Negrinho, Lajeado da Porteira e Lajeado da Encrenca. Neste setor se observa extensas áreas ocupadas por solo exposto desenhando formas geométricas bem definidas o que possivelmente indica o preparo do solo para o plantio, ou as culturas se encontravam em um estágio de pouco desenvolvimento na data da captura da cena.

Nesta porção do município as florestas ou matas galerias encontram-se fragmentadas ao longo dos rios, e em muitos trechos são inexistentes fruto das atividades antrópicas. O restante das florestas distribui-se nas margens dos rios que drenam o Rebordo do Planalto, com declividades acima de 30% e no oeste do município na margem direita do Rio Lajeado da Esperança.

¹⁰ Segundo dados do IBGE, São Martinho da Serra está entre os maiores produtores de soja do Estado do Rio Grande do Sul, com uma área plantada no ano de 2010 de 24100 hectares, equivalente a 36 % da área municipal. A soja tem sido a cultura que ocupa a maior extensão de terra no município.

É possível ter uma ideia da interferência antrópica na paisagem e consequentemente nas feições pesquisadas através da análise da tabela 3.7.2, que mostra o percentual das Depressões em Superfície Aplainada de Topo que estão inseridas em áreas agrícolas.

Tabela 3.7.2 - Comparação do número de Depressões em Superfície Aplainada de Topo (DSAT) inseridas em áreas agrícolas e nos demais usos do solo.

Setor de Drenagem	DSAT em áreas agrícolas (número)	DSAT em outros usos (número)	DSAT localizadas em áreas agrícolas (%)
Arroio Lajeado Guassupizinho	22	9	15
Arroio Lajeado Negrinho	56	5	38,8
Arroio Lajeado da Porteira	10	4	6,9
Arroio Lajeado da Encrenca	4	5	2,7
Arroio Lajeado da Esperança	14	15	9,7
Total	106	38	73,1

Fonte: Imagem Landsat 7 classificada. Data: Agosto de 2011.
Organização: Vinícius Duarte Guareschi.

Com base nos dados da tabela 3.7.1 é possível verificar que 73,1% das Depressões de Topo estão localizadas nos setores utilizados como áreas agrícolas. Quando se considera o total das feições deste tipo no município, constata-se que 87% estão no interior de áreas agrícolas. A utilização mais intensa do solo é verificada nos setores dos Arroios Guassupizinho e Lajeado Negrinho, fato bastante visível quando se verifica o percentual de Depressões em Superfície Aplainada de Topo no interior das áreas agrícolas.

Como o município de São Martinho da Serra localiza-se sobre o aquífero Serra Geral, as atividades agrícolas oferecem um alto risco de contaminação das águas subterrâneas pelos insumos usados na produção. A densidade de lineamentos constitui-se em uma variável que pode fornecer subsídios para determinar o grau de fragilidade das águas subterrâneas. Dessa forma, quanto maior for a densidade de lineamentos em uma determinada região, maior será a fragilidade do aquífero em relação a contaminação das águas subterrâneas. O mapa

3.7.2 ilustra a distribuição das fragilidades na área de estudo, a partir da densidade de lineamentos morfo-estruturais.

Observando o mapa acima é possível visualizar que predominam em área as classes de fragilidade, média, alta e muito alta, o que indica grande vulnerabilidade ao Sistema Aquífero Serra Geral. Considerando o total das Depressões de Topo mapeadas na área de estudo, verifica-se que 86 (24,5%) localizam-se em zonas que apresentam - alta e muito alta fragilidade. O fato dessas depressões localizarem-se em área muito fraturadas, reforça a teoria de que elas estão intimamente ligadas a presença de lineamentos estruturais.

A seguir serão apresentados alguns casos que exemplificam os impactos ambientais que afetam estas feições relacionados ao uso da área onde estão estabelecidas. A figura 3.7.1 mostra uma Depressão de Topo com a construção de barramento (taipa) para o armazenamento de água que serve para as atividades diárias e dessedentação de animais.



Figura 3.7.1: Depressão de Topo contendo água, e entorno bastante alterado pelas atividades antrópicas. Foto: Vinicius D. Guareschi. Local: Fazenda Capão Redondo. Data: Setembro de 2011.

Como a cultura da soja assume grande extensão concentrando-se na porção do município de maior ocorrência das feições estudadas, é comum muitas delas ficarem em meio as lavouras no período do plantio até a colheita do produto. Dessa forma, como constituem-se em pontos de recarga do aquífero, devido a sua localização recebem por escoamento superficial água contendo insumos agrícolas proveniente dessas plantações, o que pode contaminar as águas subterrâneas.

A figura 3.7.2 mostra uma Depressão em Superfície Aplainada de Topo com formato alongado contendo água localizada junto a uma área de plantação de soja.



Figura 3.7.2: Depressão Aplainada de Topo localizada no interior de uma lavoura de soja. Foto: Vinicius D. Guareschi. Local: Rincão dos Negrinhos. Data: Janeiro de 2012.

Observa-se bem ao fundo da foto um barramento (taipa) para manter a água no interior da depressão. Este barramento foi construído onde deveria ocorrer o desague natural e está impedindo que a feição continue sua evolução e conecte-se com o curso d'água que passa bem próximo. Por outro lado, a maioria destas “barragens” não possuem vertedouro, e em períodos de grande pluviosidade podem se romper acarretando em processos erosivos como sulcos e ravinas.

Outra situação que ilustra a interferência antrópica nas feições diz respeito à instalação de drenos para retirada de água dos “banhados” no interior das Depressões em Fundo de Vales procurando aumentar a área para plantio (Figura 3.7.3).



Figura 3.7.3: Depressão em Fundo de Vale drenada para a plantação de soja. Foto: Prof.^a Dr.^a. Andréa Valli Nummer. Local: Próximo a Fazenda Posto do Rancho. Data: Janeiro de 2012.

Os drenos consistem na abertura de um pequeno canal por onde a água flui para fora da depressão. Há casos em que este sistema de drenagem foi utilizado para construção de estradas que cortam estas Depressões de Fundo de Vale, através da colocação de bueiros que “levantam e sustentam a estrada”.

Como ilustra a figura 3.7.3 de um lado da estrada, a Depressão foi drenada para expandir a área de plantio. Esta água foi conduzida pelos drenos localizados na base da estrada para o outro lado que é utilizada como pastagem natural (campo). Observa-se também a captação de água do interior das feições para irrigação de áreas vizinhas. A figura 3.7.4 mostra um caso de captação de água com utilização de bomba elétrica localizada no interior de uma Depressão de Fundo de Vale.



Figura 3.7.4: Bomba de captação de água no interior de uma Depressão em Fundo de Vale. Foto: Vinicius D. Guareschi. Local: Lajeadozinho. Data: Setembro de 2011.

Esta feição encontra-se no fundo do vale, na porção da base do derrame, com diaclasamento horizontal nas suas laterais, ponto de saída da água que infiltra no topo da colina. No interior da depressão ocorrem diversos “olhos d’água” (pequenas poços) onde a bomba de captação foi instalada. Em períodos de estiagem o nível da água nestes poços se deve provavelmente a influência da água subterrânea.

A tabela 3.7.3 relaciona os prováveis impactos ambientais na paisagem decorrente das práticas mostradas anteriormente.

Tabela 3.7.3 - Manejo da paisagem e prováveis impactos ambientais.

Manejo da paisagem	Impactos Ambientais
Agricultura no entorno das feições	Carreamento de poluentes para dentro das feições, que constituem-se em pontos de recarga do aquífero Serra Geral. O escoamento superficial transporta agrotóxicos e nutrientes (NPK) para o interior das depressões alterando os padrões químicos da água.
Drenagem das Depressões de Fundo de Vale	<ul style="list-style-type: none"> - A retirada da umidade dos “banhados” pode causar rebaixamento no entorno da depressão, ocasionando colapso em estruturas recentes como estradas. - Desequilíbrio no balanço hídrico, com prejuízos aos cursos d’água, pois estas zonas constituem-se nas cabeceiras de drenagem e funcionam como nascentes. - Danos aos ecossistemas devido à substituição das condições ambientais naturais por monoculturas.
Construção de Taipas para manter a água nas depressões	<ul style="list-style-type: none"> - Desequilíbrio no balanço hídrico pelo aumento da evaporação. A água retida nas feições poderia estar alimentando os rios em períodos de estiagem. - A situação de água parada favorece a concentração de poluentes que infiltram nas fraturas e atingem o aquífero.
Desmatamento	<ul style="list-style-type: none"> - Deixa o solo exposto, favorecendo os processos de erosão nas porções mais elevadas e assoreamento das Depressões de Topo; - Desequilíbrio no balanço térmico e hídrico; - O desmatamento impede ou retarda o crescimento de uma vegetação de maior porte no interior das Depressões em Fundo de Vale;
Bombeamento de água	<ul style="list-style-type: none"> - O bombeamento excessivo de água pode causar colapso de estruturas recentes; - Rebaixamento do nível freático do aquífero; - Possibilidade da ingestão de água imprópria para o consumo humano.

Organização: Vinícius D. Guareschi.

3.8 Interpretação Geomorfológica para gênese e evolução das feições

A partir da combinação das informações cartográficas produzidas a cerca da geologia, lineamentos estruturais, hipsometria, declividade e trabalhos de campo foi possível chegar ao entendimento prévio sobre a origem e evolução das feições cársticas na Formação Serra Geral, mais especificamente no município de São Martinho da Serra. O bloco diagrama da figura 3.8.1 ilustra a proposta de sequência evolutiva das feições na área de estudo.

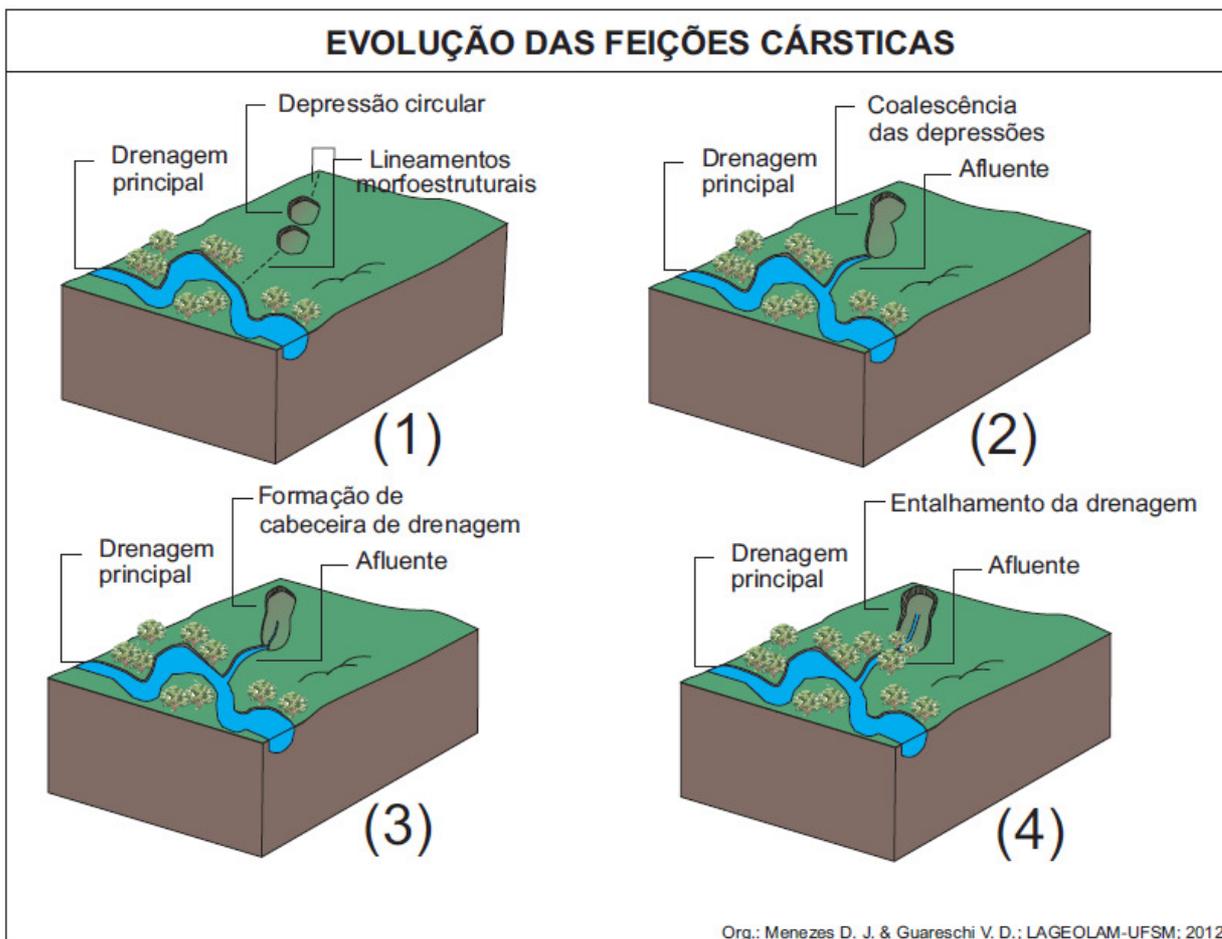


Figura 3.8.1: Gênese e Evolução das Feições Cársticas. 1) Depressão Aplainada de Topo; 2) Coalescência das depressões circulares; 3) Cabeceiras de Drenagens Suspensas; 4) Depressão em Fundo de Vale.

Fonte: Levantamento de Campo.

A formação do relevo atual tem início com um nível de derrame vulcânico encobrindo a paleotopografia. Os pontos do terreno interceptados por lineamentos morfo-estruturais (falhas, fraturas, juntas) constituem-se em zonas de fraqueza sendo mais susceptíveis a percolação e armazenamento de água que por dissolução da sílica amorfa (vidro vulcânico da base dos derrames ácidos) e carreamento hidrodinâmico dos materiais promove o alargamento dos condutos, originando pequenas depressões circulares, ocasionada pelo colapso de solo e rocha, como ilustrado na situação 1 (Depressão em Superfície Aplainada de Topo) do bloco diagrama da figura 3.8.1. Estas feições desenvolvem-se nos locais de baixa declividade do topo do planalto onde existem condições mais favoráveis para o armazenamento e migração lenta da água em subsuperfície.

A figura 3.8.2, mostra a segunda fase de evolução das feições, que tem início quando duas ou mais depressões rompem¹¹ a sua circularidade e unem-se formando uma espécie de canal que escoar na direção de um lineamento estrutural mais pronunciado (profundo) como ilustra a situação 2 do bloco diagrama da figura 3.8.1.



Figura 3.8.2: Coalescência de duas depressões circulares e formação de um canal, que vai ao encontro da rede de drenagem. Foto: Andréa Valli Nummer. Local: Passo do Negrinho. Data: Janeiro de 2012.

A rede de drenagem, e especialmente os rios de primeira ordem, desenvolvem-se controlados pela malha de lineamentos. Como processo natural de evolução do relevo, os rios tendem a aprofundar o vale, fato que modifica o nível de base local¹² e conseqüentemente a declividade da vertente. Esse aumento da inclinação acelera o fluxo superficial de água ao longo da vertente e no interior da depressão e, com isso a capacidade erosiva é potencializada promovendo a coalescência das feições. Este processo tem embasamento na Lei do Ajuste das Declividades de Gilbert (1877), sendo semelhante ao que é descrito por Coelho Netto (1992, citado por COELHO NETTO, 2003) na bacia do Rio Bananal (SP/RJ).

A terceira fase de evolução compreende a formação das Cabeceiras de Drenagem, como resultado da denudação mais eficiente nas áreas mais fraturadas (Formação da cabeceira de drenagem). As vertentes adquirem formas côncavas, o que sugere predomínio das forças de denudação em relação ao entalhamento. A

¹¹ A medida que as Depressões Aplainadas de Topo rompem a circularidade é possível que nesta fase já ocorra a conexão com a rede de drenagem, se esta passar próxima, ou se o lineamento em que a feição está instalada se estenda até a drenagem. Foram observados em campo depressões conectadas e desconectadas da rede de drenagem.

¹² O termo local se refere ao entorno próximo as depressões.

expansão das cabeceiras ocorre por recuo paralelo das vertentes, como proposto por Penck (1953, 1924). Formam-se pequenos canais dígito controlados por lineamentos de menor expressão (secundários) como juntas, diáclases e fraturas (Figura 3.8.3).



Figura 3.8.3: Formação das cabeceiras de drenagem. O desenvolvimento é controlado pelos lineamentos morfo-estruturais. Foto: Andréa Valli Nummer. Local: Próximo a Granja Silvânia. Data: Janeiro de 2012.

O próximo e último estágio de desenvolvimento das feições compreende a evolução das Cabeceiras de Drenagem para Depressões em Fundo de Vale (situação 4 do diagrama). Este processo ocorre possivelmente quando a incisão atinge uma camada menos resistente (vitrófiros ou rochas vulcânicas básicas). Nota-se a importância desempenhada pela resistência litológica como fator preponderante para a ocorrência deste processo, como preconizado por Hack (1960).

O vale torna-se profundo e tende ao alargamento, configurando uma depressão em semicírculo em formato de anfiteatro. As vertentes tendem a forma convexa evidenciando um maior entalhamento em detrimento da denudação, corroborando com a Teoria de Penck (1924). A figura 3.8.4 ilustra uma Depressão em Fundo de Vale, na qual se observa afloramento de rocha nas suas laterais.



Figura 3.8.4: Depressão em Fundo de Vale com vertentes convexas e fundo raso. Nas laterais desta feição ocorre o afloramento de rochas mais resistentes a alteração (Riolitos ou Granífiros). Foto: Vinicius D. Guareschi. Local: Passo do Negrinho. Data: Janeiro de 2011.

À medida que ocorre a ligação da Depressão em Fundo de Vale com a rede de drenagem, esta gradualmente vai sofrendo influencia da água subterrânea e transforma-se em “banhado”. Conforme a umidade no fundo aumenta a feição passa a sustentar uma vegetação arbórea, que corresponde a mata ciliar que avança da rede de drenagem em direção ao novo canal hidrográfico (Figura 3.8.5).



Figura 3.8.5: Depressão em Fundo de Vale com banhado. Com o aumento da umidade, vai ocorrendo uma sucessão ecológica no interior da depressão. As espécies típicas como o caraguatá vão sendo substituídas por espécies de maior porte. Foto: Vinicius D. Guareschi. Local: Lajeadozinho. Data: Janeiro de 2011.

IV CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta pesquisa teve como objetivo identificar e compreender a gênese e evolução das feições cársticas que ocorrem no município de São Martinho da Serra – RS. Neste sentido, foi realizada a identificação e mapeamento das depressões circulares e alongadas que ocorrem na área de estudo através de imagens de satélite e trabalhos de campo. Estas feições foram correlacionadas com diversas variáveis como declividade, hipsometria, geologia e lineamentos morfo-estruturais.

Com base nestas análises, foi possível classificar estas feições em três tipos segundo seus estágios de evolução morfológica: a) Depressão Aplainada de Topo; b) Cabeceira de Drenagem Suspensa; e c) Depressão em Fundo de Vale.

As Depressões em Superfície Aplainada de Topo apresentam formas circulares a alongadas e assemelham-se as dolinas e uvalas dos relevos calcários. Esta feição desenvolve-se nas partes mais planas do topo do Planalto, na unidade de relevo denominada de Superfície Aplainada de Topo e dividem-se em conectadas e desconectadas da rede de drenagem. As feições desconectadas, encontram-se em uma fase inicial de evolução em relação as que estão conectadas, fato que evidencia o rompimento da circularidade e formação de um proto-canal que dá vazão a rede hidrográfica e marca uma etapa de transição que leva ao desenvolvimento das Cabeceiras de Drenagens Suspensas.

Por sua vez, as Cabeceiras de Drenagem Suspensas são unidades morfológicas côncavas que se desenvolvem a partir da coalescência de diversas depressões menores, indicando um estágio mais avançado de evolução em relação às Depressões Aplainadas de Topo.

Já as Depressões em Fundo de Vale, apresentam forma em anfiteatro alongado com fundo chato e coberto por solos hidromórficos, representando um estágio mais avançado de evolução em relação aos dois tipos de feições descritas anteriormente.

Com relação à distribuição das feições, verifica-se que a grande maioria das Depressões Aplainadas de Topo localizam-se em declividades menores que 5%, em uma faixa de altitude acima de 380 metros, sugerindo que em cotas superiores a esta altitude são deflagrados os processos que dão origem as feições cársticas. Esta situação favorece a infiltração da água em detrimento do escoamento

superficial. Este padrão de escoamento permite a percolação lenta da água nas descontinuidades geológicas como falhas, fraturas e disjunções horizontais, favorecendo os processos de alteração geoquímica e remoção mecânica de materiais no interior dos condutos. Esse processo ocorre preferencialmente nas rochas vulcânicas ácidas com presença de vitrófiros em sua base e lineamentos estruturais de direção predominantemente NW-SE.

Embora tenha ficado constatada uma associação direta entre as feições e os lineamentos estruturais, estes isoladamente não poderiam explicar a grande concentração das feições na unidade de relevo Depressão Aplainada de Topo, já que não é verificada diferença significativa na densidade dos lineamentos em relação a unidade Fundo de Vale Dissecado a ponto de justificar tal hipótese. Portanto, a explicação para tal fato apresenta cunho litológico. A unidade Depressão Aplainada de Topo coincide com os derrames ácidos, que mesmo ricos em sílica apresentam vitrófiros na porções de base e topo de derrame, constituindo-se em zonas muito alteráveis frente à presença da água. Neste sentido, os lineamentos estruturais como falhas e fraturas atuam como agentes facilitadores da percolação de água nestas zonas, contribuindo assim de forma decisiva para a gênese e evolução das feições.

O comportamento diferenciado das litologias ácidas e básicas frente aos agentes de intemperismo explica a quase inexistência das feições pesquisadas no domínio das rochas básicas. Observa-se nessa litologia a ocorrência de vales profundos e largos bastante dissecados evidenciando que os processos de denudação já destruíram estas feições.

Cabe reforçar a importância desempenhada pela intersecção de fraturas para a origem das Depressões Aplainadas de Topo, bem como para a transição destas para Cabeceiras de Drenagem Suspensas. Outro fator importante diz respeito a recarga do Aquífero Serra Geral, que ocorre por meio de falhas, fraturas e descontinuidades, bem como através das feições, principalmente nas Depressões Aplainadas de Topo, que desempenham um papel muito importante para a população local servindo de fonte de água para animais e uso geral.

Constatou-se que as atividades agrícolas representam uma das principais ameaças de contaminação da água subterrânea, visto que 87% das Depressões Aplainadas de Topo estão localizadas em áreas de plantio. Esta informação quando combinada com a fragilidade natural do aquífero obtida através da densidade de

lineamentos expressa o risco de contaminação das águas subterrâneas. Verificou-se que 24,5% das Depressões Aplainadas de Topo localizam-se em zonas que foram classificadas como de alta e muito alta fragilidade.

A área de estudo apresenta características suficientes para ser considerada carste, pois como tal possui formas muito semelhantes, como depressões circulares e alongadas similares às dolinas e uvalas de terrenos cársticos, bem como grandes áreas rebaixadas semelhantes aos poljés, com afloramento de rocha nas laterais e fundo com solos hidromórficos. Enfim, observa-se a composição de feições que se desenvolvem sob forte controle estrutural, com permeabilidade dependente de fraturas e descontinuidades litológicas, traços de dissolução e fragilidade ambiental intrínseca devido à alta densidade de fraturamentos. Pode-se concluir que estas depressões constituem-se em uma importante componente na evolução geomorfológica desta porção do Planalto, de modo que são necessários mais estudos que venham acrescentar conhecimento em relação aos processos geoquímicos associados aos minerais envolvidos, bem como o papel das mudanças climáticas no tempo geológico e sua relação com a gênese e evolução das formas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, A.A. A Teoria Geomorfológica e sua Edificação: Análise Crítica. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, [S.l.]: ano 4, n. 2, p. 51-67, 2003.

AVELAR, A. S.; COELHO NETTO, A. L. Fraturas e desenvolvimento de unidades geomorfológicas côncavas no médio vale do Rio Paraíba do Sul. **Revista Brasileira de Geociências**, v.22, n.2, p.222-227, 1992.

Bellieni, G., et al. Mineralogical and petrochemical aspects, **Journal of Petrology** [S.l.]: n, 27, 915-944, 1986.

BIGARELLA, J. J.; BECKER, R. D.; SANTOS, G. F. Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais. In:_____. **Paisagem Cárstica**, vol 1, ed. UFSC: Florianópolis, 1994. cap. 5, p. 241-308.

CABRAL, I. de L. L. **Depressões Interfluviais e voçorocas articuladas a rede de drenagem**: O exemplo das Bacias dos Rios Ibicuzinho, Areal do Paredão, Cacequi, Santa Maria e Ibicuí. 2004. 187f. Tese (Doutorado em Geografia Física) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

CARVALHO JÚNIOR, O. A.; et al. Ambientes Cársticos. In: FLORENZANO, T.G **Geomorfologia**: Conceitos e Tecnologias Atuais. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.

CASSETI, V. **Geomorfologia**. [S.l.]: [2005]. Disponível em: <<http://www.funape.org.br/geomorfologia/>>. Acesso em: 20 de junho de 2011.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. 2 ed. São Paulo: Edgard Blucher. 1980. 188 p.

COELHO NETTO, A. L. Evolução de cabeceiras de drenagem no médio vale do Rio Paraíba do Sul (SP/RJ): a formação e o crescimento da rede de canais sob controle estrutural. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, n. 2, p. 69-100, 2003.

DERRUAU, M. **Précis de Geomorfologie**. Paris: Masson & Cie, 1972. 415 p.

EMPRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2 ed., Brasília: Embrapa, 2006. 306 p.

Felizola, H. F.; Boulet, B. Evolution and opening of closed depressions developed in a quartz-kaolinitic sedimentary substratum at Taubaté basin (São Paulo, Brazil), and analogy to the slope evolution. *Geomorphology*, v.16 p.77-86, 1994.

FLORENZANO, T. G. Introdução à Geomorfologia. In:_____. **Geomorfologia: Conceitos e Tecnologias Atuais**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.

FORD, D.; WILLIAMS, P. **Karst hydrogeology and geomorphology**. Chichester: J. Wiley & Sons, 2007, 576 p.

GONTAN, J. E. N. **Mapeamento e caracterização de feições pseudo-cársticas em duas áreas do Rio Grande do Sul, através de técnicas e sensoriamento remoto e SIG**. 2002. 81f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2002.

GONTAN, J.E.N., MACIEL FILHO, C.L. Levantamento das feições cársticas no planalto vulcânico do Rio Grande do Sul – Área de São Martinho da Serra. In: Congresso Uruguayo De Geologia, 2., 1998, Punta Del Leste. **Anais...** Punta Del Leste: SUG, 1998. p. 442-446.

HALLIDAY, W.R. Pseudo Karst. In: GUN J. (Ed.). **Encyclopedia of Caves and Karst Science**, New York: Fitzroy Dearborn. 2004. P1321 a 1331.

HARDT, R. Sistema cárstico e impactos antrópicos: considerações sobre o manejo. In: Simpósio de Pós-Graduação em Geografia do Estado de São Paulo, 1., 2008, Rio Claro. **Anais...** Rio Claro: UNESP, 2008, p. 1295-1309.

_____. Exemplos Brasileiros de carste em arenito: Chapada dos Guimarães (MT) e Serra de Itaqueri (SP). In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 28., 2009, Campinas. **Anais eletrônicos...** Campinas: SBE, 2009. Disponível em: <http://www.sbe.com.br/espeleo-tema/espeleo-tema_v20_n1-2_007-023.pdf>. Acesso em: 10 de jun. de 2010.

_____. **Formas Cársticas em Arenito**. 2003. 47f. Monografia de Especialização. UNESP, 2003.

HARDT, R.; PINTO, S.A.F. Carste em litologias não carbonáticas. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, [S.l.]: v. 10, n. 2, p. 99-105, 2009.

HUGGETT, R. **Fundamentals of Geomorphology**. Second Edition. London and New York: Routledge, 2007. 447 p.

JENNINGS, J. N. **Karst**: An Introduction to Systematic Geomorphology. Cambridge and London: MIT Press, 1971.

KOHLER, H.C. Geomorfologia Cárstica. In: GUERRA, J. T.; CUNHA, S. B. **Geomorfologia**: Uma Atualização de Bases e Conceitos. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2005.

LEINZ, V.; AMARAL, SE. **Geologia Geral**. 11ed. São Paulo: Editora Nacional. 1989. 399 p.

LETENSKI, et al. Geoturismo no Parque Estadual de Vila Velha: nas trilhas da dissolução. **Revista Científica da Seção de Espeleoturismo da Sociedade Brasileira de Espeleologia**, Campinas, v. 2, n. 1, p. 5-15, jun. 2009.

MACIEL FILHO, C. L.; CABRAL, I. L. L.; SPINELLI, J. Estruturas Morfológicas de Colápsio em Sedimentos Inconsolidados no Rio Grande do Sul. In: SIMPÓSIO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, 5., 1993, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Universidade de São Paulo, 1993a, p. 209-211.

_____. Feições Semelhantes à Morfologia Cárstica no Planalto Vulcânico do Rio Grande do Sul. In: SIMPÓSIO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, 5., 1993b, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Universidade de São Paulo, 1994, p. 147-150.

_____. **Carta Geotécnica de Santa Maria**. Santa Maria: Imprensa Universitária, 1990, p.11-12.

MARCHIORI, J. N. C. Fitogeografia do Rio Grande do Sul. Enfoque histórico e sistemas de classificação. Porto Alegre: Ed. Est, 2002. 114 p.

MARQUES, J. S. Ciência Geomorfológica. In: GUERRA, J.T.; CUNHA, S. B. **Geomorfologia**: Uma Atualização de Bases e Conceitos. (org). 6º Ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2005.

NIMMER, E. Clima. Rio de Janeiro. In: IBGE. **Geografia do Brasil**: Região Sul, 1977. p.35-79.

NETTO, A.L.C. Evolução de cabeceiras de drenagem no Médio Vale do Rio Paraíba do Sul (SP/RJ): a formação e o crescimento da rede de canais sob controle estrutural. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, [S.l.]: ano 4, n. 2, p. 69-100, set. 2003.

ROBAINA, L.E.S.; BAZZAN, T. Feições cársticas em rochas siliciclásticas no oeste do Estado do Rio Grande do Sul – Brasil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, [S.l.]: v. 9, n. 2, p.53-64, 2008.

ROISEMBERG, A.; VIERO, P. A.; O vulcanismo mesozóico da Bacia do Paraná no Rio Grande do Sul. In: HOLZ, M.; ROS, L. **Geologia do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Ed. da URGs, 2000.

ROSS, J.L.S. **Geomorfologia: ambiente e planejamento**. 8. ed. São Paulo: Contexto, 2007. p. 84.

PAISANI, J. C.; OLIVEIRA, M. A. T. Dinâmica da área de contribuição para a formação de escoamento superficial saturado - cabeceira de drenagem da Colônia Quero-Quero - Palmeira (PR). **Revista Brasileira de Geociências**, v. 18, n. 2, p. 261-284, 1999.

PAISANI, J.C., PONTELLI, M.E., GEREMIA, F. Cabeceiras de drenagem da Bacia do Rio Quatorze – Formação Serra Geral (SW do Paraná): Distribuição espacial, propriedades morfológicas e controle estrutural. **RA'eGA**, Curitiba, n. 12, p. 211-219, 2006.

PAISANI, J.C.; PONTELLI, M.E.; ANDRES, J. Superfícies aplainadas em zona morfoclimática subtropical úmida no planalto basáltico da Bacia do Paraná (SW Paraná / NW Santa Catarina): Primeira aproximação. **Geociências**, Curitiba: v. 27, n. 4, p. 541-553, 2008.

PEULVAST, J.P.; SALES, V.C. Aplainamento e geodinâmica: revisitando um problema clássico em geomorfologia. **Mercator**, Fortaleza: v.1, n. 1, jan/jun. 2002.

PILO, L.B. Geomorfologia Cárstica. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, [S.l.]: v. 1, n. 1, p. 88-102, 2000.

PULIDO, M.D. **Química do Carste**. São Paulo: [s.n.], 2007. 57 p.

SANTOS, J.M.; SALGADO, A.A.R. Gênese da superfície erosiva em ambiente semiárido - Milagres/BA: Considerações preliminares. **Revista de Geografia**, Recife, v. especial, n. 1, p. 236-247, set. 2010.

SHUTTLE RADAR TOPOGRAPHY MISSION – SRTM. Disponível em <<http://www.dsr.inpe.br/topodata/>>. Acesso em 5 de maio de 2009.

STRIEDER, A.J.; AMARO, V.E. Estruturas de Lineamentos Extraídos de Imagens de Sensores Remotos. EGATEA. Revista da Escola de Engenharia, Porto Alegre. v. 25, nº 4, julho-agosto de 1997. p. 109-117.

UAGODA, R. Reconhecimento geomorfológico de relevo cárstico em rochas quartzíticas: Bacia Hidrográfica do Ribeirão Santana, Médio Vale do Rio Paraíba do Sul. 2006. 89 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Geografia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

VITTE, A, C. Considerações sobre a teoria da *etchplanação* e sua aplicação nos estudos das formas de relevo nas regiões tropicais quentes e úmidas. **Revista Terra Livre**, n 16, p. 11-24, 1º sem/2001.

WILDNER, W. **Mapa Geológico do Estado do Rio Grande do Sul**. CPRM. Escala de 1:750.000. 2008.

WRAY, R. A. L. Quartzite dissolution: karst or pseudokarst? **Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifers**, n1, 9 p, april, 2003.

ZALAN, P. V. Bacia do Paraná. In: RAJA GABAGLIA, G.P. & MILANI, E.J. (Coord.). **Origem e Evolução das Bacias Sedimentares**. Rio de Janeiro: PETROBRÁS, 1990. p. 135-168.