



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA**

JULIANA DUMMER

ASPECTOS LITOLÓGICOS, PEDOLÓGICOS E TECTÔNICOS, ASSOCIADOS AOS
PROCESSOS EROSIVOS, NA BACIA HIDROGRÁFICA DO ARROIO MIRACATU -
RIO GRANDE DO SUL

Porto Alegre
2019

JULIANA DUMMER

**ASPECTOS LITOLÓGICOS, PEDOLÓGICOS E TECTÔNICOS, ASSOCIADOS AOS
PROCESSOS EROSIVOS, NA BACIA HIDROGRÁFICA DO ARROIO MIRACATU -
RIO GRANDE DO SUL**

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, para obtenção do título de Doutora em Geografia.

Orientador: Prof. Dr. Roberto Verdum

Porto Alegre
2019

Dummer, Juliana

Aspectos litológicos, pedológicos e tectônicos, associados aos processos erosivos, na Bacia Hidrográfica do Arroio Miracatu/ Juliana Dummer. - Porto Alegre: IGEO/UFRGS, 2019.

[123 f.] il.

Tese (Doutorado).- Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
Programa de Pós-Graduação em Geografia. Instituto de Geociências. Porto Alegre, RS - BR, 2019.

Orientador: Roberto Verdum

1. Bacia Hidrográfica do Miracatu. 2. Processos erosivos. 3. Controle tectônico. Título.

CDU 911.2

Catálogo na Publicação
Biblioteca Instituto de Geociências - UFRGS
Miriam Alves CRB 10/1947



***Dedico ao meu amado filho Caleb, minha
companhia e maior motivação na
produção final desta tese.***

AGRADECIMENTOS

“*La gratitude est l'âme du coeur*” (A gratidão é a alma do coração), já diz o provérbio francês. A caminhada foi minha, a força, de Deus e o apoio e a ajuda foram de muitas pessoas. Por isso, manifesto, aqui, minha gratidão a todos.

Agradeço ao meu esposo, Jackson, que, com muito amor, paciência e cumplicidade, esteve sempre ao meu lado, me incentivou sempre a ter calma e a persistir, pelo apoio emocional, e à minha mãe, Ivone, por acreditar nos meus sonhos e no meu potencial, por ser meu braço direito, sobretudo, após o nascimento do Caleb. À todos da família, que tornaram essa caminhada mais leve, em especial, a minha amada sobrinha Ana Clara.

Ao meu orientador, professor Dr. Roberto Verдум, por me acolher, como orientanda de doutorado. Sobretudo, pela excelência, na orientação e pela paciência, nos momentos difíceis que estes anos de doutorado me reservaram, e pela costumeira disposição, pela troca de conhecimento e pela amizade.

Fica registrada, também, minha gratidão aos professores franceses Dr. François Laurent, Dra. Jeannine Corbonnois e Dr. Jean-Pierre Peulvast, pela acolhida das discussões sobre a temática da tese.

Aos professores que compuseram a minha banca de qualificação de projeto de tese: professor Dr. Edinei Koester, professor Dr. Maurício Meurer e professor Dr. Norberto Dani, que contribuíram para o avanço e o aperfeiçoamento da tese.

Aos bolsistas de Iniciação Científica Neemias Lopes da Silva e Benôni Schuvartz, pela dedicação em trabalhos de campo, de laboratório ou de gabinete.

Agradeço aos colegas Tânia Cristina Gomes, Letícia Balejo da Costa e Reinis Osis, pelas longas conversas, pelo compartilhamento de angústias e pelo acolhimento, durante o período de doutorado sanduíche, em Le Mans, França.

Ainda, em particular, agradeço ao prof. Dr Roberto Verдум e ao prof. Dr. François Laurent, pelo convite para participar do projeto *QUALPROSUL* (Edital nº 16/2015), que viabilizou a bolsa de doutorado sanduíche, na França. Obrigada pela confiança.

Do mesmo modo, agradeço a todos os professores e funcionários do administrativo do laboratório ESO-Le Mans, que sempre me atenderam com cordialidade, em especial ao técnico François Messner.

Ao simpático e solidário casal de franceses Michèle e Paul Roussillat, pela acolhida a mim e ao meu esposo, em um continente, até então, desconhecido e que nos reservaria muitos desafios.

A todos os que me acolheram, nas Relações Internacionais da Universidade de Le Mans, especialmente, Fanny Laude-Molina.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul, meu alvo, desde a graduação, uma das melhores instituições de ensino público do país. Ao Instituto de Geociências. Ao Programa de Pós-Graduação em Geografia – UFRGS e a todos os docentes do programa, pelo aprendizado. Meus agradecimentos, também, aos funcionários técnico-administrativos do POSGEA e aos bolsistas da secretaria, sempre dispostos a nos auxiliar com a burocracia do sistema acadêmico.

À *Université du Maine*, atualmente, *Le Mans Université*, pela oportunidade do período de estágio de doutorado (Doutorado Sanduíche) por 10 meses, por meio de cooperação científica entre França e Brasil, à *École Doctorale Sociétés, Temps, Territoires – STT (Université Bretagne Loire)* e ao *Laboratoire Espaces et Sociétés – ESO/Le Mans*.

Ao Programa CAPES/Embrapa, pela concessão da bolsa de maio de 2015 à maio de 2018 e o período de licença maternidade, em 2019. Ao Técnico Administrativo Maxwell Santana Fonseca, pela agilidade e cordialidade.

Igualmente, sou grata ao Programa CAPES/Cofecub, pela concessão da bolsa de doutorado, na modalidade sanduíche, no período de junho de 2018 a março de 2019.



*“A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas pensar o que ninguém
ainda pensou sobre aquilo que todo mundo vê.”*

Arthur Schopenhauer

ASPECTOS LITOLÓGICOS, PEDOLÓGICOS E TECTÔNICOS, ASSOCIADOS AOS PROCESSOS EROSIVOS, NA BACIA HIDROGRÁFICA DO ARROIO MIRACATU - RIO GRANDE DO SUL

Autora: Geóg. Mestre Juliana Dummer

Orientador: Prof. Dr. Roberto Verdum

RESUMO

Na região sudoeste do Rio Grande do Sul, nos Municípios de São Francisco de Assis, Manuel Viana e Alegrete, há ocorrência significativa de ravinas e de voçorocas, associadas a depósitos arenosos, conhecidos como areais. A expansão das atividades agrícolas, sobretudo, do monocultivo da soja, a partir dos anos 1970, intensificou o processo de arenização, associado à erosão. O uso inadequado do solo desenvolve uma crise erosiva, nas microbacias, sendo que esta dinâmica de forte escoamento concentrado gera um aprofundamento do canal principal, o que, por sua vez, dá início ao processo de ravinamento. Esta associação induz estes fenômenos de degradação, pelo modo de exploração agrícola praticado sobre solos friáveis, preferencialmente, os de textura arenosa. No entanto, há a presença destes fenômenos erosivos, em áreas nas quais a exploração agrícola é inexistente, o que indicou a necessidade de aprofundamento dos estudos relativos às fragilidades do meio aos processos erosivos hídricos e eólicos. Desta forma, visando um maior detalhamento da gênese desses processos, esta tese tem como objetivo analisar os aspectos relacionados aos contextos litológicos, pedológicos e o condicionante estrutural – lineamentos, na gênese do processo de erosão linear. A área de estudo limita-se à Bacia Hidrográfica do Arroio Miracatu, que abrange parte dos Municípios de Manoel Viana e de São Francisco de Assis, numa área de 61.584 ha. A pesquisa desenvolveu-se em três etapas. A primeira, corresponde à análise da degradação dos solos por processos erosivos hídricos lineares, na qual realizou-se o mapeamento de 453 processos erosivos lineares passíveis de identificação, em imagens de satélite, na escala de 1:5.000, bem como foi feita a seleção de sete destes, para a sua caracterização detalhada. A segunda etapa trata da análise do condicionante tectônico, na qual foram realizadas a caracterização da drenagem, na bacia hidrográfica do arroio Miracatu, a identificação das anomalias de drenagem e a obtenção dos parâmetros morfométricos da bacia. A terceira e última etapa correspondeu à análise da relação do condicionante morfoestrutural e da morfologia da drenagem, pela caracterização dos processos erosivos lineares, relacionando-os às litologias, aos solos e aos lineamentos, como resultantes da tectônica pretérita e como condicionantes, na geração de ravinas e de voçorocas, no presente. Confirmou-se, em tese, que a bacia em estudo possui uma dinâmica erosiva presente sob o controle estrutural e tectônico, à medida que: foram identificadas litologias em posição altimétrica discordante da posição estratigráfica e exposições de formações mesozoicas (Guará), em cotas altimétricas iguais ou próximas das cotas das formações Botucatu e Serra Geral; a bacia está compreendida no interior do Muro de Manuel Viana, estrutura do tipo *horst*, na qual todas as formações litológicas que caracterizam o contexto estratigráfico estão alçadas. Neste sentido, o alçamento tectônico, na área, determinou um novo nível de base, provocando uma reestruturação na drenagem e na retomada da erosão, gerando processos hídricos, por meio da abertura de ravinamentos e de voçorocamentos. O padrão paralelo, em

alguns setores da bacia, demonstra conformação da drenagem às estruturas tectônicas, principalmente, dos relevos orientados, nas direções dos lineamentos mapeados (NE-SW). É nas áreas de intersecção de lineamentos de médio porte, nas direções NW-SE e SE-NW, que estão as áreas de maior densidade de feições erosivas lineares e, conseqüentemente, de areais, evidenciando a forte relação lineamentos - ravinamentos - areais. As direções, nas fraturas dos blocos de rochas identificados, são concordantes com os ângulos de desenvolvimento dos eixos principais ou secundários dos processos erosivos detalhados. Os estudos de campo e de laboratório, no entanto, não se esgotam aqui, mas são capazes de sustentar, em tese, que as estruturas presentes, no relevo, influenciam, tanto no desenvolvimento quanto na orientação das feições erosivas lineares e que estas, por sua vez, são tanto ativadoras quanto agravantes dos processos de arenização. As áreas mais vulneráveis demonstraram ser aquelas, nas quais a Formação Guará está exposta, na superfície, e nos solos identificados como Latossolos Vermelhos e Neossolos Quartzarênico Órticos. A sua vulnerabilidade natural à erosão, devido ao condicionante geológico estrutural e à ação das águas de escoamento superficial e subsuperficial, causa as feições erosivas lineares, que, por sua vez, dão origem ao surgimento e ao avanço dos areais.

Palavras-chave: Bacia Hidrográfica do Miracatu. Processos erosivos. Controle tectônico.

ABSTRACT

In the southwest region of Rio Grande do Sul, in the municipalities of São Francisco de Assis, Manuel Viana and Alegrete, there are significant occurrences of ravines and gullies, associated with sand deposits, known as areais. The expansion of agricultural activities, especially soybean monoculture, from the 1970s, intensified the process of sandstone associated with erosion. Inadequate land use develops an erosive crisis in the watersheds, and these strong concentrated runoff dynamics generates a deepening of the main channel and, in turn, starts the ravine process. This association induces these degradation phenomena because of the of farming exploitation that is practiced on friable soils, especially on those with sandy texture. However, these erosive phenomena are found in areas with no farm activity, which indicated the need for further studies on the environmental weaknesses of water and wind erosion processes. Thus, aiming at further detailing on the genesis of these processes, this thesis intends to analyze the aspects related to both lithological and pedological contexts and the structural condition - lineaments, in the genesis of the linear erosion process. The study area is limited to the Arroio Miracatu River Basin, which covers part of Manoel Viana and São Francisco de Assis municipalities, in an area of 61,584 ha. The research was developed in three stages. The first corresponds to the analysis of soil degradation by linear water erosion processes, in which 453 identifiable linear erosion processes were mapped in satellite images on a 1: 5,000 scale, and seven of these were selected for their detailed characterization. The second stage deals with the analysis of the tectonic condition, performing the characterization of the drainage in the Miracatu stream watershed, the identification of drainage anomalies and the description of the morphometric parameters for the watershed. Third stage corresponded to the analysis of the relationship of the morpho-structural conditioning

and the drainage morphology, by characterizing the linear erosive processes and relating them to lithologies, soils and lineaments, as a result of the past tectonics and as conditioning factors in the generation of ravines and gullies at present. It was confirmed, in theory, that the basin under study has an erosive dynamics present under the structural and tectonic control, as: lithologies were identified in disagreement with the stratigraphic position and exposures of Mesozoic formations (Guará), in altimetric dimensions that were equal or close to Botucatu and Serra Geral formations' ones; The basin is located within the Manuel Viana Wall, a horst-type structure in which all the lithological formations that characterize the stratigraphic context are raised. In this sense, the tectonic elevation in the area determined a new base level, causing a restructuring in the drainage and the resumption of erosion, generating water processes through the opening of ravines and gullies. The parallel pattern, in some sectors of the basin, shows the conformation of drainage to tectonic structures, mainly of oriented reliefs, in the directions of mapped lineaments (NE-SW). The areas of intersection of medium-sized lineaments, in both NW-SE and SE-NW directions, have the highest density of linear erosive features and, consequently, of sand are, showing the strong relationship between lineaments, ravinements and sand deposits. The angles that were identified in the fractures of the rocks agree with the development angles of both main and secondary axes of the detailed erosive processes. The field and laboratory studies, however, are not concluding here, but they are able to support, in theory, that the relief structures influence in both the development and the orientation of the linear erosive features, which, in turn, are activators and aggravators of arenization processes. The most vulnerable areas have been shown to be in which the Guará Formation is exposed, on the surface, and in both Red Latosols and Arctic Quartzarenic Neossols soils. Their natural vulnerability to erosion, due to the structural geological condition and the action of surface and subsurface runoff waters, causes linear erosive features, which, in turn, give rise to the emergence and advancement of the sands.

Keywords: Miracatu River Basin. Erosive processes. Tectonic control.

Figura 1 –Localização da área de ocorrência de areais no Estado do Rio Grande do Sul e da Bacia Hidrográfica do Arroio Miracatu(A), e no Brasil (B) Estado do Rio Grande do Sul (C)	19
Figura 2 – Padrões de drenagem básicos (A) e modificados (B)	38
Figura 3 – Exemplos de anomalias de drenagem	40
Figura 4 – (A) Classes de falhas e estruturas tectônicas associadas; (B) Dobras	42
Figura 5 – Esquemas do critério de interpretação morfoestrutural.....	44
Figura 6 – Modelo de interpretação de <i>trend</i> estrutural.....	45
Figura 7 – (a) Fator de Assimetria da Bacia de Drenagem (FABD), que quantifica o deslocamento de um rio, em função de influências tectônico-estruturais; (b) Fator de Simetria Topográfica Transversa (FSTT), que quantifica o deslocamento de um rio, considerando a topografia gerada por influências tectônico-estruturais.....	51
Figura 8 – Parâmetros utilizados no cálculo do índice RDE, para segmento de drenagem (intervalo entre duas isoípsas consecutivas). L = comprimento da drenagem entre a cabeceira e a isoípsa à jusante; Δh = diferença de altitude entre duas isoípsas subsequentes; e Δl = projeção horizontal do comprimento do segmento de drenagem entre duas isoípsas subsequentes	52
Figura 9 – Mapa altimétrico da Bacia Hidrográfica do Arroio Miracatu.....	55
Figura 10 – Primeiro plano da foto: o compartimento mais rebaixado de coxilhas, constituídas de sedimentos e de solos arenosos, oriundos da degradação das Formações Guará e Botucatu. Segundo plano da foto: superfície de erosão, que demarca o compartimento médio de um planalto, associado à Formação Guará. Terceiro plano da foto: superfície de erosão, que demarca o compartimento mais elevado de um planalto, associado à Formação Botucatu. Bacia do Arroio Miracatu, Município de São Francisco de Assis, RS.....	56
Figura 11 – Carapaça ferruginosa em arenito da Formação Guará, identificada nas paredes dos eixos laterais (lado direito) da ravina 1. Bacia do Arroio Miracatu, Município de Manuel Viana, RS	58
Figura 12 – Afloramento de basaltos em leito de arroio. Bacia Hidrográfica do Arroio Miracatu, Município de Manuel Viana, RS	60
Figura 13 – Mapa geológico da Bacia Hidrográfica do Arroio Miracatu. A linha pontilhada localiza o transecto do perfil longitudinal A-B da Figura 11	61
Figura 14 – Mapa de solos da Bacia Hidrográfica do Arroio Miracatu.....	63
Figura 15 – Perfil esquemático representativo do modelo de evolução tectônica proposto para a seção A-B (Sudoeste/Nordeste), a partir do mapeamento das	

unidades litológicas e dos lineamentos sobrepostos e de observações de campo. Bacia do Arroio Miracatu, sudoeste do Rio Grande do Sul67

Figura 16 – Afloramento de rochas da Formação Botucatu (primeiro plano), sotaposto ao bloco da Formação Guará (segundo plano). Respectivamente, ao lado, imagem em detalhe de amostras de cada formação67

Figura 17 – Recorte do Mapa Geológico do Estado do Rio Grande do Sul, 1:750.000 (WILDNER *et al.*, 2005). A linha EF delimita, à nordeste, o Domo de Itu (Carraro *et al.*, 1972). As linhas AB e CD delimitam o Muro de Manoel Viana, alçado pela neotectônica. Os sinais + e – indicam blocos alto e baixo, respectivamente. A linha roxa pontilhada corresponde ao retângulo da área de estudo70

Figura 18 – Cerro com topo de mesa, constituído pela Formação Botucatu, com vertente convexa (linha pontilhada vermelha). A linha preta indica o limite das Unidades, estando, à subjacente, a Formação Guará, com vertente retilínea e côncava (linhas pontilhadas amarelas), seguida do areal associado à ravinamento e a voçorocamento. Bacia Hidrográfica do Arroio Miracatu, Município de São Francisco de Assis.....71

Figura 19 – Rede de drenagem da área de estudo, extraída automaticamente do modelo digital de elevação da SRTM (resolução redefinida de 30 metros) e, posteriormente, editada manualmente, sob imagens de satélite do Google Earth®.74

Figura 20 – Localização das seções transversais, utilizadas para o cálculo de Fator de Simetria Topográfica Transversal (FSTT). Área de ocorrência de assimetria elevada (círculo). Bacia Hidrográfica do Arroio Miracatu, RS75

Figura 21 – Detalhe de anomalias de drenagem, no curso principal do Arroio Miracatu. Fortes inflexões, em ângulo quase reto (setas vermelhas), causando redirecionamentos de curso do arroio, de NW para NE e vice-versa, em sua porção terminal (exemplo 1).....77

Figura 22 – Meandros com fortes inflexões, em ângulos ortogonais (círculos vermelhos) (exemplo 1).....77

Figura 23 – Anomalias de drenagem, na porção central do Arroio Miracatu. Presença de drenagem paralela (retângulo amarelo), mesmo que a bacia possua um padrão dendrítico principal (exemplo 1). Detalhe de inflexões em ângulo reto, com junção perfeita em 90° (círculo vermelho), na porção sul da bacia (exemplo 2).....78

Figura 24 – Mapa de Lineamentos estruturais da Bacia Hidrográfica do Arroio Miracatu, RS. (A) Diagrama de roseta de frequência absoluta da orientação dos lineamentos.....79

Figura 25 – Mapa geológico com a localização dos processos erosivos mapeados na bacia e ravinas selecionadas para estudo84

Figura 26 – Mapa de densidade de erosões lineares, com sobreposição da localização espacial de lineamentos. (A) Diagrama de roseta da frequência absoluta da direção

dos eixos principais de cada erosão linear. Bacia Hidrográfica do Arroio Miracatu, RS85

Figura 27 – Aferição da direção de falhas, no interior de ravinas (esquerda) Aferição da inclinação e direção do acamamento dos estratos da Formação Botucatu e Guará, localizada abaixo do solo e da formação superficial, no fundo da ravina, e que interfere, no desenvolvimento da erosão lateral (direita). Município de Manuel Viana, RS.....87

Figura 28 – (A) Imagem de satélite da Ravina 1 e de seu entorno, como delimitação das drenagens, dos lineamentos e do leito do processo erosivo. (B) Interior do eixo principal de desenvolvimento da ravina 1, com as respectivas camadas delimitadas pela linha pontilhada em vermelho (perfil exposto, à direita). Acúmulo de seixos originários da Formação Serra Geral (II) sobrepostos ao arenito de origem eólica (Formação Botucatu); (I) e sotapostos a depósitos fluviais recentes Quaternários (III); Bacia Hidrográfica do Arroio Miracatu, RS88

Figura 29 – Carapaça ferruginosa, sobreposta a um bloco de arenito Botucatu. Leito da ravina 1, Município de Manuel Viana, Rio Grande do Sul90

Figura 30 – Entorno da ravina 1. No primeiro plano, vê-se um dos eixos secundário de desenvolvimento da ravina, em um valão reativado e em intenso processo de erosão. Em linha pontilhada, está delimitado um valão preenchido, o qual um dos eixos da erosão deve avançar, futuramente. Ao fundo, a linha vermelha delimita um lineamento mapeado, indicando o ponto de soerguimento do relevo91

Figura 31 – Interior da ravina, expondo um valão em processo de entalhamento. Observa-se que a camada de depósitos sobre a rocha é pouco espessa, com cerca de 45 cm, acima da Formação Botucatu. Bacia Hidrográfica do Arroio Miracatu, RS92

Figura 32 – Fotomosaico do interior da ravina 1, mostrando as superfícies estruturais de duna consolidada - Formação Botucatu. Município de São Francisco de Assis, sudoeste do Rio Grande do Sul93

Figura 33 – Imagem de satélite da Ravina 2 e de seu entorno (A), como delimitação das drenagens, dos lineamentos e do leito do processo erosivo. Em (B), o interior do eixo principal de desenvolvimento da ravina 2, na qual ocorre forte inflexão, no canal, a N67°E, seguindo o ângulo da falha, no bloco de arenito Guará (delimitado pela linha pontilhada vermelha), concordante com o ângulo de desenvolvimento de lineamento demarcado, na figura à esquerda (marcada pela linha vermelha contínua). Bacia Hidrográfica do Arroio Miracatu, RS.....94

Figura 34 – Fotomosaico do interior da ravina 2, mostrando as superfícies estruturais de duna consolidada - Formação Botucatu. Bacia Hidrográfica do Arroio Miracatu, RS95

Figura 35 – Imagem de satélite da Ravina 3 e de seu entorno (A), como delimitação das drenagens, dos lineamentos e do leito do processo erosivo. Em (B), visão lateral da ravina 3, com vista para os eixos laterais direitos, pelos quais a erosão avança (setas indicativas em vermelho). Bacia Hidrográfica do Arroio Miracatu, RS.....96

Figura 36 – Formação Guará (Jurássico - Sistema Fluvial). Arenito com feição de canal. Elemento arquitetural: acreção lateral (LA). Bacia Hidrográfica do Arroio Miracatu, RS.....	97
Figura 37 – Vista geral da Ravina 4 e de seu entorno, como delimitação das drenagens, dos lineamentos e do leito do processo erosivo (A). Em (B), detalhe da cabeceira do leito percorrido a campo (delimitado em vermelho,  esquerda), que segue duas direções principais: uma, a N50O (desenvolvimento remontante, seta azul) e outra, a N31E (desenvolvimento lateral, seta amarela). Nota-se a presença de <i>pipings</i> , na confluência dos dois lineamentos, identificados na cabeceira da ravina. Bacia Hidrográfica do Arroio Miracatu, RS.....	98
Figura 38 – Formação Guará (Jurássico - Sistema Fluvial). Arenito com feição de canal com estratificação plano-paralela e estratificação cruzada tangencial. Afloramento no município de Manuel Viana, noroeste do Rio Grande do Sul.....	99
Figura 39 – Vista geral da Ravina 5 e de seu entorno, como delimitação das drenagens, dos lineamentos e do leito do processo erosivo (A). Em (B), vista lateral esquerda, em campo, dos eixos de desenvolvimento da ravina 5. Município de São Francisco de Assis, sudeste do Rio Grande do Sul	100
Figura 40 – Estrutura sedimentar, com características de estratificações cruzadas truncantes, de origem fluvial (Formação Guará – Jurássico). Município de São Francisco de Assis, Rio Grande do Sul.....	101
Figura 41 – Vista geral da Ravina 6 e de seu entorno, como delimitação das drenagens, dos lineamentos e do leito do processo erosivo (A). Em (B), vista lateral direita parcial da erosão e seus eixos de desenvolvimento. Município de São Francisco de Assis, sudeste do Rio Grande do Sul.....	102
Figura 42 – Estrutura sedimentar, com características de estratificações cruzadas acanalada/ tangencial (St) e estratificação cruzada de baixo ngulo (Sl), de origem fluvial (Formação Guará – Jurássico) cabeceira da ravina 6. Município de São Francisco de Assis, Rio Grande do Sul. No detalhe (A), clastos argilosos	103
Figura 43 – Bloco da Formação Guará, no entorno da Ravina 6, cujas fraturas ocorrem na direção principal N12E e secundária N45W, concordantes com as drenagens delimitadas, ao fundo (linhas azuis). Município de São Francisco de Assis, sudoeste do Rio Grande do Sul.....	104
Figura 44 – Vista geral da Ravina 7 e de seu entorno, como delimitação das drenagens, dos lineamentos e do leito do processo erosivo (A). Em (B), vista a partir da jusante da ravina. Bacia Hidrográfica do Arroio Miracatu, RS.....	105

QUADROS

Quadro 1 – Caracterização dos padrões de drenagem básicos e modificados, com seus significados geológicos correspondentes38

Quadro 2 – Valores do Fator de Simetria Topográfica Transversal (FSTT) obtidos para o Arroio Miracatu75

Quadro 3 – Relação Declividade-Extensão total (RDE total) para drenagens selecionadas da bacia do Arroio Miracatu.....76

TABELAS

Tabela 1 – Propriedades das morfoestruturas, conforme a variação topográfica45

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 Justificativa.....	18
1.2 Caracterização e relevância da área de estudo	19
1.3 Objetivos	21
1.3.1 Geral.....	21
1.3.2 Específicos.....	22
2 DEGRADAÇÃO DOS SOLOS E OS PROCESSOS EROSIVOS	23
2.1 Processo da erosão hídrica.....	25
2.2 Condicionantes naturais e sociais associados à erosão	28
3 O CONDICIONANTE TECTÔNICO E AS MORFOESTRUTURAS, NA GÊNESE DOS PROCESSOS EROSIVOS LINEARES	33
3.1 A análise das anomalias, na drenagem	37
3.2 Análise da morfoestrutura	41
3.3 Conclusão Parcial	46
4 METODOLOGIA	48
5 ASPECTOS LITOLÓGICOS, PEDOLÓGICOS E TECTÔNICOS, ASSOCIADOS À ESTRUTURA GEOMORFOLÓGICA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO ARROIO MIRACATU	55
5.1 Aspectos da composição litológica.....	55
5.2 Aspectos do contexto pedológico.....	62
5.3 Associações lito-morfológicas, na estruturação da bacia	65
5.4 A influência da tectônica, nos aspectos morfométricos da bacia	71
5.5 Conclusão parcial.....	80
6 ASPECTOS LITOLÓGICOS, PEDOLÓGICOS E TECTÔNICOS, ASSOCIADOS AOS PROCESSOS EROSIVOS, NA BACIA HIDROGRÁFICA DO ARROIO MIRACATU.....	83
6.1 Conclusão Parcial	105
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	109
REFERÊNCIAS.....	113

1

INTRODUÇÃO

A degradação dos solos é uma das formas de degradação mais preocupantes, uma vez que os solos não são facilmente regenerados, pois seus processos de formação e de recuperação são lentos. Segundo informações da Convenção das Nações Unidas de Combate à Desertificação (UNCCD, 2013), a "severa degradação do solo" já afeta 168 países, quando, em meados da década de 1990, eram 110 os que se declaravam afetados. Dentre as formas de degradação do solo, destaca-se a erosão hídrica, que pode acarretar prejuízos de ordem econômica, ambiental e social. A erosão, além de causar o empobrecimento do solo e o declínio da produtividade agrícola, aumenta os custos de produção, com a necessidade de um maior aporte de nutrientes para a produção agrícola. A erosão pode provocar o deslocamento da população, uma vez que, assim que o solo se esgota, por consequência da erosão, as sociedades humanas tendem a mudar para terras mais produtivas. Ainda segundo a Convenção, a erosão é responsável pela perda anual de 24 milhões de toneladas de camadas de topo dos solos, ou três toneladas per capita (UNCCD, 2013).

Dentre as causas da erosão dos solos, a ação da(s) sociedade(s) humana(s) tem sido um dos fatores fundamentais, na aceleração de processos erosivos. Elas também têm contribuído para a erosão do solo, ao realizar a remoção da vegetação, a superexploração, o sobrepastejo, a atividades agrícolas e industriais, entre outros.

Os fatores naturais ou condicionantes do meio, que dizem respeito às características do relevo, da declividade, da concentração de altos índices pluviométricos e das características físico-químicas do solo, bem como da presença de lineamentos¹ e de falhas, aumentam a susceptibilidade deste à erosão. Esta susceptibilidade favorece diferentes formas de erosão, segundo o grau de carregamento de partículas do solo (EMBRAPA, 2006).

Na região sudoeste do Rio Grande do Sul, nos Municípios de São Francisco de Assis, Manuel Viana e Alegrete, há ocorrência significativa de ravinas e de voçorocas,

¹ Os lineamentos são famílias de feições naturais, na superfície terrestre, em forma alinhada, refletindo uma descontinuidade estrutural, em subsuperfície do tipo falha. Podem ser caracterizados como feições lineares mapeáveis da superfície terrestre, simples ou compostas, contínuas ou descontínuas, alinhadas em arranjo retilíneo ou suavemente curvo, diferindo distintamente do padrão das feições adjacentes (SOARES *et al.*, 1982a)

associadas a depósitos arenosos, conhecidos por areais. Essas áreas são, há décadas, objeto de estudo, por pesquisadores da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), do Grupo de Pesquisa Arenização/Desertificação: questões ambientais, na investigação da origem e da gênese dessas morfologias arenosas. Estudos sistemáticos têm comprovado que a gênese dos areais, na região, é de origem natural. Segundo Suertegaray (1987), Verdum (1997), Suertegaray *et al.* (2001) e Guasselli *et al.* (2009) a formação dos areais, no sudoeste do Rio Grande do Sul, interpretada a partir de estudos geomorfológicos, associada à dinâmica hídrica e eólica, indica que estes resultam, inicialmente, de processos hídricos. Estes processos, relacionados a uma topografia favorável, permitem, numa primeira fase, a formação de ravinas e de voçorocas. Na continuidade, ampliam-se, por erosão lateral e regressiva, conseqüentemente, alargando suas bordas e ampliando seu comprimento.

Por outro lado, à jusante destas ravinas e voçorocas, em decorrência dos processos de transporte de sedimentos, pela água, durante episódios de chuvas torrenciais, formam-se depósitos arenosos, em forma de leque. Com o tempo, esses leques agrupam-se e, em conjunto, originam um areal. O vento que atua sobre essas areias, em direções preferenciais, dos quadrantes NE, E e S, permite a ampliação do areal.

A expansão das atividades agrícolas, sobretudo, do monocultivo da soja, a partir dos anos 1970, intensificou o processo de arenização, associado à erosão. Em um primeiro grau de degradação, a presença de ravinas e de voçorocas, segundo Suertegaray *et al.* (1996), é mais frequente sobre as áreas de culturas e de pastagens, com uma estreita relação entre a rarefação da vegetação herbácea e o aprofundamento dos cursos d'água. O uso inadequado desenvolve uma crise erosiva, nas microbacias, sendo que esta dinâmica de forte escoamento concentrado gera um aprofundamento do canal principal e, por sua vez, o início do processo de ravinamento. Esta associação induz estes fenômenos de degradação, pelo modo de exploração agrícola praticado sobre solos friáveis, preferencialmente, aqueles de textura arenosa.

No entanto, no mesmo estudo, destaca-se a presença do fenômeno em áreas nas quais a exploração agrícola é inexistente, indicando a necessidade de

aprofundamento dos estudos sobre as fragilidades do meio aos processos erosivos hídricos e eólicos.

Verdum (1997) aprofundou o estudo sobre a fragilidade estrutural do potencial ecológico, da pressão exercida pelos modelos de exploração agrícola sobre a biomassa vegetal dos campos herbáceos, da dinâmica hidrológica da bacia hidrográfica do arroio Miracatu e dos principais processos morfogenéticos que caracterizam a crise erosiva, nesta bacia. Especificamente, quanto à dinâmica hidrológica e aos principais processos morfogenéticos, este estudo mostrou, de um lado, a importância dos lençóis freáticos, na alimentação da rede hidrográfica, e, por outro lado, a relação entre os eventos atmosféricos de forte intensidade e as cheias, revelando que as fases de escoamento superficial concentrado e na forma de lençol são bruscas e potentes. Estas fases são eficazes para provocar os processos morfogenéticos sobre a estrutura do meio, cuja fragilidade já havia sido sublinhada em estudos anteriores, notadamente em Suertegaray (1987).

Andrades Filho *et al.* (2007), ao analisar a ocorrência de areais em quatro bacias hidrográficas da região, sobrepondo os planos de informação dos lineamentos estruturais dos areais e das drenagens, evidenciou a relação entre estas variáveis. O autor concluiu que os areais estão relacionados, principalmente, com as drenagens secundárias e estão associados, de forma indireta, aos lineamentos de menor extensão, afirmando a predominância da orientação SE-SW. Os autores consideram, portanto, que há a possibilidade de que os lineamentos estruturais estejam contribuindo, na formação de areais, na medida em que estes têm sua origem associada à formação de degraus de abatimento e aos fluxos concentrados em canais (ravinas e voçorocas), identificados também por Uagoda (2004).

Segundo este autor, as ravinas e as voçorocas se desencadeiam em cabeceiras fluviais e em cursos d'água de primeira ordem, recobertos por um pacote arenoso inconsolidado, os quais, mais recentemente, apresentam um processo de reativação erosiva, processo, este, que, ao aprofundar o talvegue dos canais fluviais, transporta sedimentos para a jusante, contribuindo na formação dos areais.

Diante do exposto, na presente tese se propõe, como hipótese, que, além das características naturais do meio, associadas ao substrato essencialmente arenoso da Bacia Sedimentar do Paraná, presente nesta região, e aos usos agrícolas, com a intensificação de monocultivos, sobre solos friáveis, a partir dos anos de 1970, há um

controle das estruturas do relevo, na gênese dos processos erosivos e na ocorrência de areais, no sudoeste do Rio Grande do Sul. Desta forma, visando um maior detalhamento da gênese desses processos, se propõe investigar o condicionante tectônico, além do pedológico e litológico, através do estudo dos lineamentos estruturais de maior escala e da sua relação com a localização e com o desenvolvimento da erosão linear (ravinas e voçorocas).

1.1 JUSTIFICATIVA

Dentre as muitas formas de degradação ambiental, a erosão dos solos é a mais frequente. A erosão acarreta perda da camada superficial do solo, reduz a fertilidade e, por sua vez, a retenção de água e a capacidade de produção primária. Portanto, em municípios localizados na região sudoeste do Rio Grande do Sul, como Manuel Viana e São Francisco de Assis, dependentes, direta e indiretamente, da produção agrícola, este é um problema potencialmente maior.

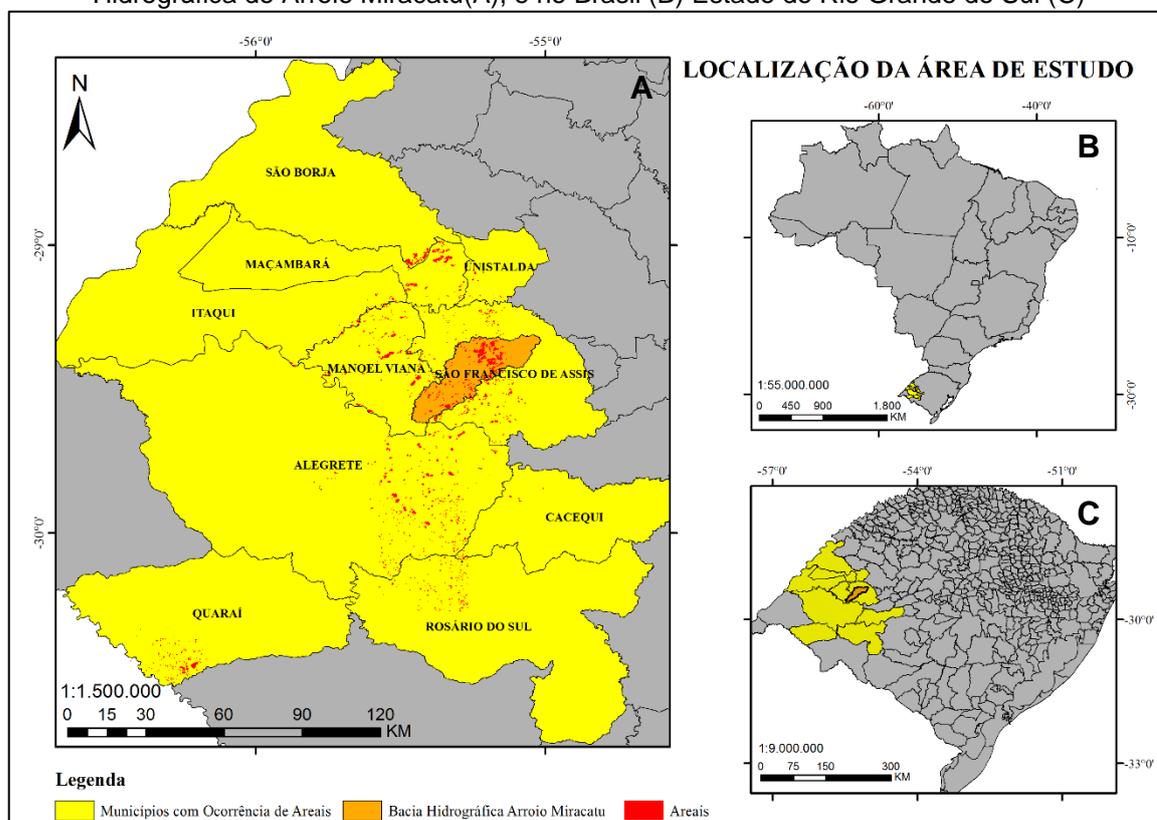
Nesta região, o surgimento de manchas de areia (areais), processo denominado de arenização, associado à ocorrência de deformações, no terreno, através de sulcos, de ravinas e de voçorocas, tem provocado a perda de parcelas produtivas de terra. Sem que se apresente qualquer tipo de intervenção para o seu controle, essas formas de erosão provocam, ainda, a perda de Áreas de Preservação Permanente (APPs), interrupção de estradas e contaminação de cursos d'água, tornando-se áreas de risco de deslizamento, de acidentes e de mortes de animais. Além disto, causam prejuízos econômicos, em função dos custos excessivos aos municípios e aos agricultores, em termos de horas de trabalho com maquinário para a manutenção de estradas e de lavouras.

Desta forma, esta pesquisa apresenta uma análise, quanto à influência dos lineamentos estruturais, na gênese dos processos erosivos dos solos e das rochas, na Bacia Hidrográfica do Arroio Miracatu, e se aportam algumas informações técnicas sobre a problemática ambiental, servindo de apoio à adoção de políticas públicas e de educação ambiental, por parte do governo local e de novas práticas agrícolas, com viés conservacionista.

1.2 CARACTERIZAÇÃO E RELEVÂNCIA DA ÁREA DE ESTUDO

A partir de estudos realizados pelo grupo de pesquisas Arenização/Desertificação: questões ambientais, do Departamento de Geografia do Instituto de Geociência da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), sabe-se que o processo de arenização se apresenta de forma pontual e esparsa. Sua ocorrência abrange, prioritariamente, dez municípios da região sudoeste do estado, no Bioma Pampa. Segundo Suertegaray *et al.* (2001), a região de ocorrência dos areais limita-se, a partir do meridiano de 54°, em direção a oeste, na fronteira com a Argentina e com o Uruguai. Os municípios afetados pela degradação dos solos, sob a forma de areais, associados às ravinas e às voçorocas, são: Alegrete, Cacequi, Itaqui, Maçambará, Manoel Viana, Quaraí, Rosário do Sul, São Borja, São Francisco de Assis e Unistalda. A área de abrangência, nesta tese, no entanto, limita-se à Bacia Hidrográfica do Arroio Miracatu, que abrange parte dos Municípios de Manoel Viana e de São Francisco de Assis, numa área de 61.584 ha. (Figura 1).

Figura 1 –Localização da área de ocorrência de areais no Estado do Rio Grande do Sul e da Bacia Hidrográfica do Arroio Miracatu(A), e no Brasil (B) Estado do Rio Grande do Sul (C)



Fonte: Guasselli (2012), a partir de mapas modificados do IBGE

De acordo com Guasselli (2012), em mapeamento realizado em 2010, a área atingida pelo processo da arenização, no Estado do Rio Grande do Sul, soma a totalidade de 4.948 ha. Cabe destacar que, com exceção dos areais que ocorrem no Município de Quaraí, os núcleos arenosos ocorrem na área de abrangência da bacia hidrográfica do Rio Ibicuí, a qual pertence à Região Hidrográfica do Uruguai (U050) e compreende uma área de 36.397,69 km². Esta bacia hidrográfica limita-se, ao norte, pela bacia do Ijuí-Piratinim-Icamaquã; ao sul, pelas bacias do Quaraí e do Santa Maria; a leste, pelas bacias do Alto Jacuí e do Vacacaí-Vacacaí Mirim; e a oeste, pelo Rio Uruguai, na divisa com a Argentina.

Os areais caracterizam-se visualmente por manchas de areia, com ausência de cobertura vegetal e com sedimentos inconsolidados, o que torna este material disponível ao retrabalhamento, pela ação erosiva da água da chuva, de subsuperfície e pelo vento. Em termos de composição litológica, o processo de arenização, nos dois municípios pesquisados, se desenvolve sobre um substrato sedimentar, relacionado às Formações Guará, Botucatu e a Formações Superficiais Quaternárias, carecendo, ainda, em relação a estas, de mapeamentos e de estudos morfoestruturais de maior detalhe.

No âmbito da compartimentação geomorfológica, o Estado do Rio Grande do Sul está inserido em cinco Unidades Morfoesculturais: Planalto Meridional, Cuesta de Haedo, Depressão Periférica, Escudo Sul-rio-grandense e Planície Costeira (CEPSM/UFRGS, 2001). Neste contexto geomorfológico, é observável a ocorrência de processos de arenização em três das cinco unidades morfoesculturais: Planalto Meridional, Cuesta de Haedo e Depressão Periférica.

Para Guasselli (2012), os areais ocorrem sobre dois distintos compartimentos geomorfológicos: na escarpa erosiva do Planalto Meridional, caracterizando áreas de relevo acidentado e com presença de relevos testemunhos, e na Depressão Central, na qual predominam as paisagens do Pampa Gaúcho, com presença de relevos do tipo colinas (coxilhas) e morros testemunhos (cerros), com cotas altimétricas de até 200 m. Os areais ocorrem, predominantemente, nos compartimentos de colinas, com substrato arenoso, e são, em sua maioria, originários da deposição eólica, admitindo-se a fragilidade das morfologias de colinas, em virtude da presença de solos incipientes e das Formações Superficiais Quaternárias inconsolidadas (VERDUM, 2012 e VERDUM; SUERTEGARAY, 2012).

Nesta pesquisa, a partir de trabalhos de campo realizados em 2015 e 2016, se optou pelo recorte da Bacia Hidrográfica do Arroio Miracatu, que banha os municípios de Manoel Viana e de São Francisco de Assis. A área de estudo apresenta indícios relacionados à hipótese, isto é, uma complexidade do meio, no que se refere às litologias, às morfoestruturas e aos processos geomorfológicos.

A Bacia Hidrográfica do Arroio Miracatu apresenta características substanciais para o estudo das morfoestruturas, enquanto objeto de tese. Dentre os elementos evidenciados, observa-se um número expressivo de processos erosivos, na forma de ravinas e de voçorocas, associados à formação dos areais, afloramentos de blocos areníticos, zonas de falhas e lineamentos, enquanto condicionantes estruturais para o desenvolvimento dos processos erosivos. A temática foi apontada em estudo preliminar, na área, por Andrades Filho *et al.* (2007), sobretudo, com relação à ocorrência específica dos areais. Pesquisas em outras áreas vêm demonstrando a relação de lineamentos estruturais com a presença de processos erosivos, tais como: Beavis (2000), Valentin *et al.* (2005), Malik e Mohanty (2007), Obinna *et al.* (2012), Morinaga e Rueda (2015), entre outros. No entanto, a produção científica a respeito, ainda é restrita.

Diante do exposto, a respeito da problemática, na área de estudo, e da inexistência de estudos aprofundados e em maior escala de detalhe, na região, é que se partiu em busca de um detalhamento, no que diz respeito ao condicionante tectônico, na gênese e na evolução de processos erosivos hídricos concentrados, na forma de ravinas e de voçorocas.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Geral

Analisar a relação entre os contextos litológicos, pedológicos e o condicionante estrutural – lineamentos, na gênese do processo de erosão linear, na Bacia Hidrográfica do Arroio Miracatu, nos municípios de São Francisco de Assis e de Manuel Viana/RS.

1.3.2 Específicos

- Mapear os processos erosivos lineares passíveis de identificação em imagens de satélite, na escala de 1:5.000;
- Caracterizar a drenagem, na bacia hidrográfica do arroio Miracatu, considerando como fundamental a identificação das anomalias de drenagem;
- Mapear em escala de detalhe os lineamentos estruturais identificados, na bacia hidrográfica do arroio Miracatu;
- Caracterizar os processos erosivos lineares identificados, nesta bacia hidrográfica, e relacioná-los às litologias, aos solos e aos lineamentos, como resultantes de tectônica pretérita e como condicionantes, na geração de ravinas e de voçorocas, no presente.

2

DEGRADAÇÃO DOS SOLOS E OS PROCESSOS EROSIVOS

O aumento das populações humanas, a demanda por recursos, as formas de apropriação e de uso da terra e a instabilidade social e econômica de alguns países vêm proporcionando, nas últimas décadas, uma ameaça aos processos naturais que sustentam a vida, através da crescente degradação ambiental. Doran (1997), já nos anos 1990, identificava que as mudanças climáticas globais, a destruição da camada de ozônio, os graves declínios da biodiversidade de espécies e a degradação de terras agrícolas produtivas estão entre as muitas ameaças ao ambiente.

Dentre os processos de degradação ambiental, a degradação do solo, segundo Guerra *et al.* (2007), é muito mais séria, uma vez que o solo é um recurso natural de formação e de regeneração lentas. O solo não é renovável numa escala de tempo humana, uma vez que, para que 1 cm de solo seja formado é preciso de 100 a 400 anos, conforme a ação dos agentes pedogênicos, o que torna mais preocupante o fato de que as práticas agrícolas inadequadas, o uso intensivo de maquinários e os pesticidas estão danificando a capacidade produtiva dos solos.

Segundo a Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO, 1980 apud GUERRA *et al.*, 2007), os fatores de degradação de terras estão, na sua maioria, relacionados às ações ditas antrópicas, ou seja, da(s) sociedade(s) humana(s), como: desmatamento, superpastoreio, remoção da cobertura vegetal, uso intensivo de máquinas, encurtamento do período de pousio, excesso de fertilização com reação ácida, uso intensivo de químicos e estrumes, disposição de resíduos domésticos e industriais, entre outros. As condições e as dinâmicas denominadas naturais, tais como: topografia, textura e composição do solo, regimes hidrológicos, chuvas, alagamentos e ventos, também contribuem, nos processos de degradação pela erosão. Além disso, as condições locais de uso e de cobertura da terra que não consideram as práticas conservacionistas, o manejo adequado, a rotação de culturas e o plantio em nível, tendem a acelerar os processos erosivos.

A erosão, por sua vez, é uma das principais formas de degradação do solo. Em relatório da Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura (FAO) de 2015, a erosão foi apontada como sendo um dos principais problemas dos solos brasileiros, seguido da perda de carbono orgânico e do desequilíbrio de nutrientes.

Assim, enquanto processo, a erosão constitui-se na desagregação, no arraste e no transporte de partículas do solo, tanto pela água quanto pelo vento. Ainda que seja considerada como um processo natural e contínuo de desgaste do relevo, trata-se de um tema inquietante, devido a sua aceleração, em decorrência das atividades humanas, em suas mais diversas formas, tanto nos espaços rurais quanto nos urbanos.

Entre os fatores mais comumente apontados, para a ocorrência da erosão dos solos, estão aqueles relacionados às práticas agrícolas inadequadas, que provocam o depauperamento progressivo das condições naturais do solo, degradando a capacidade de desempenhar suas funções básicas, no ecossistema. O estado de degradação pode ser caracterizado de diferentes modos, estando, entre eles, a compactação, que dificulta a infiltração de água no solo e facilita a ocorrência de enxurrada e a consequente erosão do solo.

A consequência imediata da erosão é a perda da capacidade produtiva do solo, mas há impactos ambientais importantes, como a perda dos horizontes superficiais, a diminuição dos estoques de matéria orgânica, a perda de fertilidade e o assoreamento dos cursos d'água. O solo pode ficar compactado, com o aumento da sua densidade (D_s) e a diminuição da porosidade total (P_t), comumente associada à redução da macroporosidade (M_a) (com problemas de infiltração de água e de ar). Afeta, ainda, todas as reações químicas e biológicas normais que nele se processam, resultando em perda de produtividade e no início de erosão.

Pesquisas têm sido desenvolvidas, nessa área, por instituições, tais quais: o Instituto Agrônomo de Campinas (IAC), a Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), a Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), a Universidade Federal do Paraná (UFPR), a Universidade Federal de Viçosa (UFV), o Instituto Agrônomo do Paraná (IAPAR), a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), entre outras. Isto demonstra a preocupação em gerar conhecimento, métodos e técnicas conservacionistas, na busca de soluções para o controle de uma das principais causas de empobrecimento de terras e de perda de produtividade agrícola.

2.1 PROCESSO DA EROSÃO HÍDRICA

Conforme Bertoni e Lombardi (2005), diferentes mecanismos atuam, no processo de erosão hídrica, que se desenvolve em três fases: desagregação, transporte e deposição, e determinam quatro principais formas de erosão: salpico, laminar (entressulcos), sulcos e voçorocas (linear).

A erosão causada pelo impacto da gota de chuva, popularmente chamada de erosão por salpico, é a primeira forma de erosão hídrica. Segundo Cassol (2007), quando as gotas de chuva golpeiam o solo a uma alta velocidade, causam a desagregação das partículas da massa do solo. Este processo de desagregação e de transporte faz com que as partículas de solo sejam desagregadas e lançadas em todas as direções, pelo efeito do salpico. O potencial erosivo da desagregação é ainda maior, conforme o aumento do diâmetro médio da gota da chuva, que se relaciona com sua energia cinética e, também, com sua intensidade.

Ainda segundo Cassol (2007), após a desagregação das partículas, inicia-se o processo de transporte, que pode acontecer por fluxo laminar raso ou fluxo concentrado em sulcos. No momento em que a taxa de precipitação pluviométrica supera a taxa de infiltração de água, no solo, sucede-se um excesso de água sobre a superfície. Se este excesso não for interceptado, retido ou detido superficialmente, haverá transporte de sedimentos em suspensão. O mesmo ocorre por fluxo laminar raso, nos espaços entressulcos. Neste caso, há a chamada erosão entressulcos ou erosão laminar, que provoca a remoção das camadas superficiais do solo de forma gradativa. Por ser pouco perceptível e negligenciada, se torna a forma mais prejudicial de erosão. Nas áreas em que ocorre o fluxo laminar raso, também ocorre o processo de desagregação, que predomina pela ação do impacto das gotas da chuva e do transporte por fluxo laminar raso, caracterizando, assim, uma área de erosão em entressulcos (ELLISON, 1947; MEYER *et al.*, 1975). Quando os fluxos de água em movimento se concentram em canais (sulcos), muitas vezes, em decorrência de terrenos inclinados e/ou de pequenas irregularidades, na declividade do terreno, ou, mesmo, associados a zonas de falhas, ocorre a erosão por fluxo concentrado ou erosão em sulcos, também chamada de erosão linear.

Segundo Bertoni e Lombardi (2005) o movimento ascendente da água desprende as partículas por ação elevatória. Esse desprendimento pela abrasão

ocorre, quando as partículas já em trânsito, na enxurrada, golpeiam ou arrastam outras partículas, na superfície do solo, colocando-as em movimento.

A quantidade do material transportado vai depender da capacidade de transporte da enxurrada, que, por sua vez, é influenciada pelo tamanho, pela densidade e pela forma das partículas do solo e pelo efeito de retardamento da vegetação e de outros obstáculos. Esses canais naturais podem atingir proporções maiores, conforme o volume e a velocidade da enxurrada. Quando o fluxo superficial se concentra, tanto a desagregação quanto o transporte são realizados por este tipo de fluxo, caracterizando uma área de erosão em sulcos ou de erosão linear (ELLISON, 1947; MEYER *et al.*, 1975). Em sua fase inicial, estes processos podem ser desfeitos com operações normais de preparo do solo, porém, em estágios mais graves, podem impedir o trânsito ou o trabalho com maquinário em lavouras e em estradas.

A erosão hídrica linear se caracteriza pelo fluxo concentrado, quando há deformação do terreno, na forma de sulcos, de ravinas e de voçorocas. Os sulcos são canais rasos, originados por rotas do fluxo superficial, e as ravinas são canais superficiais profundos; ambos possuem canais caracterizados por seção em V. As voçorocas, no entanto, são feições erosivas resultantes da evolução das ravinas e dos sulcos, e são provocadas, tanto por fluxo superficial quanto subsuperficial concentrado, podendo chegar a centenas de metros de comprimento e de largura e a dezenas de metros de profundidade. Diferencia-se das ravinas pela presença de ramificações (canais laterais) e seção em U. Esse tipo de erosão pode trazer consequências à população e ao meio, tais como: perda de área utilizável, assoreamento dos cursos e corpos d'água e até morte de animais, devido a acidentes.

As voçorocas também são conhecidas, conforme a região do país, como bossorocas e/ou grotas. A palavra boçoroca, segundo o Novo Dicionário de Geografia (TEREZO, 2008), deriva do tupi *iby-soroc*, (*iby*=terra e *soroc*=fenda), significando fenda, ruptura na terra. Segundo o DAEE (1989), a formação de tais feições pode ocorrer por falta de planejamento e de gerenciamento adequado das águas da chuva, em função de: construção de estradas, cercas e infraestruturas, com ordenamento da enxurrada em um único ponto e sem estratégia de dissipação de energia.

Segundo Carey (2006), voçorocas são valas profundas, escavadas no solo, normalmente associadas a locais em que há fluxos de água concentrados em um sulco ou canal, normalmente, em declive e em velocidades suficientes para retirar e

para transportar partículas de solo, corroendo o subsolo gradativamente e podendo alcançar o lençol freático. Sua formação pode se dar, também, onde há concentração natural de escoamento, tal como em cabeceiras de drenagem e em embaciados de vertentes, ou em locais de fluxos de água relativamente efêmeros, durante as chuvas intensas.

No entanto, segundo Guerra *et al.* (2005), esse não é o único processo de formação de voçorocas. Outro processo erosivo está relacionado às propriedades da rocha existente, sobretudo, a sua permeabilidade, que favorece o escoamento subsuperficial, formando fluxos concentrados, por meio de túneis ou por dutos, chamados de *piping*, que podem provocar o colapso da superfície acima e formar voçorocas em curto espaço de tempo.

Para Bigarella (2007), a voçoroca é uma feição erosiva complexa, que pode ser atribuída a um ravinamento acelerado. Sua origem está ligada a “um desequilíbrio hidrológico, causado, principalmente, pela ocupação das terras, com remoção generalizada das florestas protetoras.”. O autor afirma, também, que, no passado geológico, as voçorocas originavam-se por fenômenos naturais, podendo ser de caráter climático ou tectônico.

As ravinas e, sobretudo, as voçorocas, são formas mais facilmente visíveis de erosão hídrica, que podem afetar a produtividade do solo, restringir o uso da terra e, ainda, ameaçar estradas, cercas e edificações. A erosão, nestas proporções, também pode causar o assoreamento de cursos d’água, de hidrovias, de bueiros, de represas e de reservatórios. Além disso, os sedimentos em suspensão, que possuem nutrientes e/ou defensivos agrícolas associados, podem prejudicar e afetar a qualidade da água. Os materiais finos, como a argila coloidal, permanecem em suspensão e podem, ainda, poluir aquíferos subterrâneos e cursos d’água e afetar a vida aquática, de modo geral (CAREY, 2006).

Voçorocas, portanto, se desenvolvem em cursos de água, em estradas, em lavouras e/ou em outros locais, onde há escoamento de água concentrado. Em áreas de cultivo ou de pastagens, a erosão de cursos d’água e de canais de irrigação pode evoluir para voçorocas, se não forem tomadas medidas de proteção. Também, caminhos formados pelo gado e estradas abandonadas podem ser um ponto de partida para um pequeno sulco, que pode evoluir para uma voçoroca. Cursos de água em estado de equilíbrio, com tamanho, forma e gradientes adequados, podem

provocar o surgimento de processos erosivos, na forma de canais, que chegam ao estágio avançado de voçorocas, ao serem perturbados por fluxos hídricos maiores do que os normais. O alargamento pode ocorrer pelo solapamento das paredes laterais da voçoroca e esta queda é facilitada, quando as paredes são inclinadas e possuem solos saprolíticos, na base. Além disso, a associação destes fatores a escoamentos superficiais e subsuperficiais, que podem percolar pelos barrancos laterais, na forma de dutos, contribui para a formação de ravinas secundárias ou de ramificações, aumentando, assim, as proporções da erosão.

Outro ponto de evolução de voçorocas está associado a locais de gotejamento constante, como nascentes ou olhos d'água ou linhas de drenagem, que provocam a saturação do solo, tornando sua estrutura fraca e suscetível à erosão (CAREY, 2006). Esta umidade constante pode, ainda, enfraquecer a vegetação, que oferecerá menor resistência à erosão e contribuirá para o seu avanço.

2.2 CONDICIONANTES NATURAIS E SOCIAIS ASSOCIADOS À EROSÃO

O ambiente biofísico, segundo Ramalho (2003), é resultado de uma combinação de elementos físicos, químicos e biológicos, que interagem uns com os outros, em uma determinada área. Considera-se, assim, o estudo das características e da dinâmica do meio, para se avaliar as inter-relações das atividades humanas que aparecem como indicadoras de desequilíbrios. Para este autor, conhecer as características das precipitações, dos solos, da morfologia das vertentes, entre outros, e as ações da sociedade é fundamental, para o diagnóstico e para a avaliação das potencialidades e/ou das fragilidades dos recursos ambientais do meio, face às implicações das atividades humanas.

O clima influencia diretamente os índices de intemperismo, definindo os tipos de solos, em função da topografia e das rochas. Para Thorner (1980 apud RAMALHO, 2003), o clima é a variável mais importante, porque ele determina a vegetação natural e contribui para maiores ou para menores taxas de erosão dos solos. Chuvas regulares favorecem uma cobertura vegetal exuberante, que pode levar a solos com densidades menores e elevadas taxas de infiltração de água (drenagem), o que significa menores enxurradas e, por consequência, menores taxas de erosão.

Segundo Cassol (2007), dentre os fatores climáticos, o mais importante, no processo de erosão hídrica, é a precipitação pluviométrica, visto que a água das chuvas e do escoamento superficial são os agentes causadores da desagregação e do transporte. Bertoni e Lombardi (2005) consideram, ainda, que a intensidade da chuva é o fator mais importante: quanto maior a intensidade, maior a perda por erosão, quando a velocidade de infiltração do solo é ultrapassada. A infiltração, que é o movimento da água, dentro da superfície do solo, pelas forças de gravidade e de capilaridade, depende, fundamentalmente, da força de gravidade, quando o solo está saturado.

A cobertura vegetal é uma defesa natural do terreno à erosão. Segundo Cassol (2007), ela tem efeito, na interceptação das gotas de chuva, dissipando a energia cinética de sua queda, ou seja, serve como proteção direta contra o impacto da gota da chuva. A vegetação atua, ainda, como dispersora da água, interceptando-a e permitindo, inclusive, que a evaporação da água ocorra, antes mesmo de que ela atinja o solo, o que contribui, também, para a decomposição das raízes das plantas, formando canalículos ou bioporos, no solo, aumentando a infiltração da água, quando o solo está saturado. Assim, melhora a estrutura do solo, pela adição de matéria orgânica, e aumenta sua capacidade de retenção de água, diminuindo a velocidade de escoamento da enxurrada, pelo aumento do atrito, na superfície.

O solo é, por sua vez, também uma variável determinante, uma vez que a erosão não é a mesma, em todos os tipos de solos. Propriedades físicas, como estrutura, textura, permeabilidade e densidade, assim como as características químicas, mineralógicas e biológicas, exercem diferentes influências, na erosão, segundo Bertoni e Lombardi (2005). De modo geral, a estrutura do solo e o arranjo das partículas também devem ser considerados, no estudo da erosão. A determinação das propriedades físico-químicas da argila, que fazem com que os agregados permaneçam estáveis, em presença da água, e os teores de matéria orgânica, que retêm de duas a três vezes o seu peso, em água, aumentam a infiltração de água, no solo, e diminuem as perdas por escoamento superficial. Ou seja, o solo possui diversas propriedades intrínsecas, que respondem de maneira diferente, em relação ao processo de erosão hídrica. Isso determina que cada tipo de solo tenha um determinado grau de suscetibilidade à erosão. Esta suscetibilidade do solo à erosão é denominada de erodibilidade.

Para Cassol (2007), as propriedades do solo que influenciam na erodibilidade pela água podem ser separadas em dois grupos: (a) aquelas que resistem às forças de dispersão, de desagregação, de abrasão e de transporte da chuva e do escoamento superficial; e (b) aquelas que afetam a capacidade de infiltração de água, a permeabilidade e a capilaridade total de armazenamento de água, no solo. Segundo o autor, no primeiro grupo está a estabilidade dos agregados, que é a propriedade mais importante, no condicionamento do grau de desagregação, quando o solo recebe o impacto da gota de chuva. Esta estabilidade está relacionada, principalmente, com os teores de argila e de matéria orgânica do solo.

Segundo Bertoni e Lombardi (2005), a mineralogia dominante também interfere. Agregados de solos com argila montimorilonítica são pouco estáveis, em água, enquanto solos com argila caulinitica são mais estáveis, estando a ilita em posição intermediária. O tamanho, a forma e a densidade das partículas, no solo, são determinantes, no processo de erosão hídrica, uma vez que afetam a capacidade de transporte. Partículas pequenas e de formato esférico são mais facilmente transportadas do que as maiores e de formato irregular. Neste caso, a matéria orgânica exerce papel fundamental, pois é ela que proporciona maior estabilidade aos agregados, porém menor densidade de partículas. Ao ocorrer a desagregação do solo, as partículas com matéria orgânica são mais facilmente transportáveis.

Já as propriedades que afetam o segundo grupo, o da infiltração de água, ou seja, a permeabilidade e a capacidade total de armazenamento de água, estão ligadas, principalmente, à estrutura do solo. Segundo Cassol (2007), fatores como camadas compactadas, subsolo impermeável e profundidade do solo, também são importantes. Solos bem estruturados apresentam maior capacidade de infiltração, do que solos desestruturados.

O tipo de uso e a cobertura da terra, determinado pelos produtores rurais, são importantes, no desencadeamento de erosões, uma vez que estão intimamente relacionados aos índices de impermeabilização e à capacidade de infiltração dos solos. A ocupação acelerada, o loteamento de sítios e de granjas, o desmatamento e a destruição de encostas, para retirada de material para construção, são atividades que podem desencadear processos erosivos.

No entanto, estudos recentes sobre a erosão do solo têm chamado a atenção para áreas, nas quais não se encontra diferenciação pluviométrica, litológica e, até

mesmo, de uso e de gestão, significativas, a ponto de justificar o modelado do relevo e a existência de formas e de arranjos tão distintos, nas drenagens e na ocorrência de processos erosivos.

No Rio Grande do Sul, pesquisas sobre o assunto têm sido exploradas, principalmente, na região Sudoeste, onde tem sido discutido o avanço, não só do processo de arenização, mas, também, da formação de processos erosivos hídricos, associados ou não à arenização. Cordeiro e Soares (1977), identificaram a degradação dos solos, na região dos areais, afirmando que esta seria provocada pelo rompimento do equilíbrio entre a cobertura vegetal e o solo, pelo superpastoreio, associado ao potencial erosivo das chuvas torrenciais.

Entretanto, segundo Suertegaray (1992), a formação dos areais é associada, além das relações apontadas por estes autores, também pelas dinâmicas hídrica e eólica sobre solos arenosos e às formações superficiais quaternárias friáveis, tendo, como desencadeadores iniciais, os processos hídricos. Estes processos, relacionados a uma topografia favorável, permitem, em uma primeira fase, a formação de ravinas e de voçorocas. Na sua continuidade, se desenvolvem a erosão lateral e regressiva, alargando as margens e o comprimento destas erosões de cunho hídrico concentrado.

À jusante destas ravinas e destas voçorocas, formam-se depósitos arenosos, em forma de leques aluviais, em decorrência do processo de transporte de sedimentos pela água, durante episódios de chuvas torrenciais. Com o tempo, as erosões de origem hídrica e os leques aluviais vão se agrupando e, em conjunto, dão origem a um areal. O vento, que atua sobre os areais em direções preferenciais, sobretudo dos quadrantes S, E e NE, permite, então, a ampliação deste processo (CORBONNOIS; VERDUM, 2011).

Para Cassol (2007), no entanto, a erosão eólica tem uma importância inferior, no Rio Grande do Sul, pois não chega a atuar expressivamente em extensas áreas do Estado. Para este autor, a erosão hídrica atinge uma maior superfície, se comparada à eólica, sendo, possivelmente, um dos principais causadores da perda de solo fértil e da limitação do desenvolvimento da agricultura, no Estado.

De acordo com Frasca (2001), as maiores ocorrências de areais se dão, especificamente, em sítios nos quais ocorrem intersecções de lineamentos de pequeno porte, com direções NW-SE e NE-SW. Segundo o mesmo autor, a forma das manchas de areias (areais) individuais, bem como a sua localização específica, são

impostas por um controle morfoestrutural, pelos lineamentos, que ocorrem em grande quantidade, na área deste estudo.

Beavis (2000), Valentin *et al.* (2005), Dummer (2014), Barbosa e Furrier (2015), Morinaga *et al.* (2015), entre outros, têm encontrado, também, evidências de que lineamentos, morfoestruturas do relevo e, até mesmo, movimentações tectônicas, relativamente recentes, podem influenciar, na gênese de processos erosivos superficiais, na atual configuração do relevo, e, conseqüentemente, na configuração de drenagem. Como objeto de tese, este condicionante será abordado, no capítulo a seguir.

3

O CONDICIONANTE TECTÔNICO E AS MORFOESTRUTURAS, NA GÊNESE DOS PROCESSOS EROSIVOS LINEARES

A história evolutiva da paisagem, e, por conseguinte, do relevo, são marcadas por movimentações e por deformações, na crosta terrestre. Tais processos são registrados em forma de estruturas geológicas, que, em se tratando de falhamentos, são denominadas tectônicas. De igual modo, a formação topográfica do relevo atual é influenciada por movimentos tectônicos recentes. Estes são correspondentes ao Neógeno e ao início do Quaternário, que incidiram, na reativação de falhas estruturais do Pré-cambriano.

Malik e Mohanty (2007) comprovaram um forte controle da atividade tectônica, na evolução da drenagem e da paisagem. Tricart (1997) destaca a importância de conhecer as características dos elementos integrantes, nessa relação, para explicar os processos dinâmicos modeladores da paisagem.

Alguns estudos sobre os mecanismos que atuam nos processos de erosão, têm abordado com maior atenção os aspectos geológicos, tanto com relação à litologia quanto com relação às estruturas tectônicas e às morfoestruturas. As características geológicas, além de fornecerem o material que distingue a configuração do relevo, determinam as propriedades mineralógicas dos solos (RAMALHO, 2003). As rochas, que podem ser do tipo magmática, sedimentar e metamórfica, respondem diferentemente à ação dos agentes intempéricos, em função de maiores ou de menores resistências litológicas, as quais são determinadas por características intrínsecas de cada uma delas, interferindo diretamente, na maior ou na menor erodibilidade do solo.

As estruturas geológicas destas rochas, por sua vez, refletem o grau de ruptibilidade ou o grau de cisalhamento. O seu estudo permite diferenciar graus de fraturamento e relacioná-los às propriedades físicas de maciços rochosos e determinar suas fragilidades à erosão (MATTOS *et al.*, 2002).

As características de drenagem, como morfologia padrão e anomalias de canais, disponibilizam elementos favoráveis a esse tipo de abordagem (ALVES, 2015). Aliado a estes, o mapeamento de lineamentos estruturais do relevo e a identificação de fraturas e de falhas são os métodos abordados por pesquisadores nacionais e internacionais. Alguns destes estudos, considerando os condicionantes

tectônico e morfoestrutural em processos erosivos, na escala mundial e nacional, são sintetizados, nos parágrafos que seguem.

Na porção sudeste da Nigéria, foram registrados desastres com deslizamentos, seguidos de formação de voçorocas. Segundo Egboka *et al.* (1990), nessas regiões, caracterizadas por arenitos, houve uma deformação compressiva, que resultou em dobramentos e em fraturamentos. Nas zonas de maior fraqueza, foram abertas incisões, que resultaram na formação de cuevas. Tal paisagem gerou um desnível altimétrico, que, somado ao intemperismo, nas fraturas e juntas, ocasionou processos de deslizamentos e de perdas de solo. O registro de atividades sísmicas atuais demonstra que tais movimentos estão desestabilizando o solo friável, nesta região. Para Egboka *et al.* (1990), o principal fator de formação de ravinas e de voçorocas está relacionado às falhas, às juntas e aos acamamentos, de estruturas paleo e neotectônicas.

Ainda na Nigéria, no estado de Anambra, estudos desenvolvidos por Obinna (2013) identificaram as estruturas do relevo associadas com áreas de intensa atividade tectônica, para inferir sua influência sobre surgimentos e sobre a propagação da erosão por ravinas e por voçorocas, que revelaram uma susceptibilidade natural, dada por atividades geológicas. Naquela área de estudo, foram identificados lineamentos, que atingem, predominantemente, as direções NE-SW e NW-SE, correspondentes à principal tendência linear de Anambra e à orientação preferencial de desenvolvimento das ravinas identificadas.

Na Austrália, em uma região com uma heterogeneidade litológica e com paisagem que são notoriamente sujeitas à erosão, Beavis (2000) analisou a relação entre estruturas litológicas e a ocorrência de ravinas e de voçorocas (*gullies*). Como resultado, observou a correlação entre as fendas no solo e a estrutura de fraturamento da rocha subjacente, especialmente, no que se refere aos padrões de juntas. Além disso, foram constatadas evidências de que as estruturas presentes, no substrato rochoso, possuem forte influência, tanto na gênese e no desenvolvimento de erosões lineares quanto na sua orientação, em locais em que os solos são formados *in situ*.

Ao analisar a gênese das erosões, no cerrado brasileiro, Baccaro (2010) indica, dentre outros fatores, para a formação de voçorocas, as descontinuidades de rochas, no que tange aos contatos litológicos e ao controle das suas propriedades hidráulicas e mecânicas. Somadas a estas características, as zonas de fraturas e de falhas são

os locais preferenciais de alívio da pressão piezométrica, por meio de exfiltração da água, dando início a frentes de erosão ou a túneis, que provocam o colapso do teto e iniciam o processo erosivo.

Já afirmava Valentin *et al.* (2005), que a gênese e a dinâmica do relevo demonstram, em muitas situações, estar relacionadas com as forças de compressão ou de tração induzidas tectonicamente, as quais, por sua vez, geram áreas enfraquecidas, que se tornam pontos de partida para os processos de intemperismo e para a formação de dutos subsuperficiais, que resultam no abatimento de taludes.

Investigando a influência de aspectos geológicos de erosão linear, no médio-baixo vale do Ribeirão do Secretário, em Paty do Alferes, no Rio de Janeiro, Silva *et al.* (2003) constataram que as ravinas e as voçorocas desconectadas têm seus lineamentos com orientações muito semelhantes aos das estruturas representadas, no adensamento da drenagem, sobretudo, nas direções NW-SE (com 30,41% e 31,07% respectivamente) e N-S (20,73% e 19,38%). Esse comportamento mostra que essas feições erosivas ocorrem com direções subordinadas às falhas e às fraturas, revelando um significativo controle, em sua gênese e em sua propagação.

Quanto às voçorocas conectadas, os autores identificaram que estas não seguem, proporcionalmente, as orientações das estruturas regionais, visto a pequena variação percentual entre as quatro orientações de seus lineamentos, que estão dispostos de maneira quase equivalente. Isso revela um padrão diferenciado das ravinas e das voçorocas desconectadas e mostra que, neste caso, a influência de outros fatores é mais importante do que a da estrutura geológica.

Entre os municípios de Nazareno e de São João Del Rei, em Minas Gerais, existem estudos sobre a gênese de ravinas e de voçorocas, considerando as anomalias de drenagem e o mapeamento de lineamentos (SILVA, 2014). Os estudos indicam que a ocorrência de algumas feições erosivas está subordinada à estruturação geológica regional, à drenagem e ao relevo, uma vez que grande parte destas feições se encontra associada a cursos de água, mostrando geometria linear. A drenagem, por sua vez, corrobora com o predomínio de direção (E-W, NE-SW e N-S) das falhas presentes, na área.

No Município de Chувиска, no Rio Grande do Sul, estudos realizados entre os anos de 2008 e 2014 mostram que, além dos fatores naturais, relacionados ao tipo de solo, às formas de vertente e ao uso do solo, o condicionante tectônico tem sido,

também, um dos responsáveis pela gênese e pela evolução de processos erosivos lineares. Em Chuvisca, a maior parte dos processos erosivos desenvolvem-se nas direções preferenciais, associada ao conjunto de falhas geológicas principais, no sentido NE-SW (DUMMER, 2014).

Nesta área de estudo, os lineamentos regionais são responsáveis pela orientação dos processos erosivos mapeados e todos estes se desenvolvem, preferencialmente, nos sentidos NE-SW ou NW-SE. Estas estruturas condicionam a evolução dos processos erosivos, uma vez que é frequente a presença de falhas, nas rochas, com *slickensides* nas paredes internas das ravinas e das voçorocas, sendo que é nos limites destas falhas que ocorre o solapamento dos taludes, na maioria dos processos erosivos mapeados.

No sudoeste do Rio Grande do Sul, em cinco bacias hidrográficas da região ao norte do rio Ibicuí (Arroio Piraju, Arroio Inhacundá, Sanga do Araçá, Miracatu e Caraguataí), com ocorrência dos processos erosivos associados a áreas de arenização, foram realizados estudos preliminares, analisando a relação entre os lineamentos estruturais e a disposição da drenagem, a orientação das vertentes e a ocorrência de areais. Andrades *et al.* (2007) demonstraram a formação dos areais, geralmente, ligada às ravinas e às voçorocas, nas cabeceiras de drenagem, concordando com os lineamentos estruturais. Ressaltam que é necessário aprofundar essas pesquisas, com vistas a identificar possíveis lineamentos de menor porte, o que permitiria uma análise de maior detalhe sobre a sua disposição e sobre a espacialização das manchas arenosas.

Dada a importância desta temática para as pesquisas realizadas, na área de estudo, destaca-se que os capítulos a seguir visam contextualizar os elementos que se referem aos aspectos geométricos da drenagem e da morfoestrutura do relevo, na área de pesquisa, utilizados como parâmetros, no desenvolvimento dos métodos de investigação sobre a influência das estruturas e da tectônica, na gênese dos processos erosivos lineares.

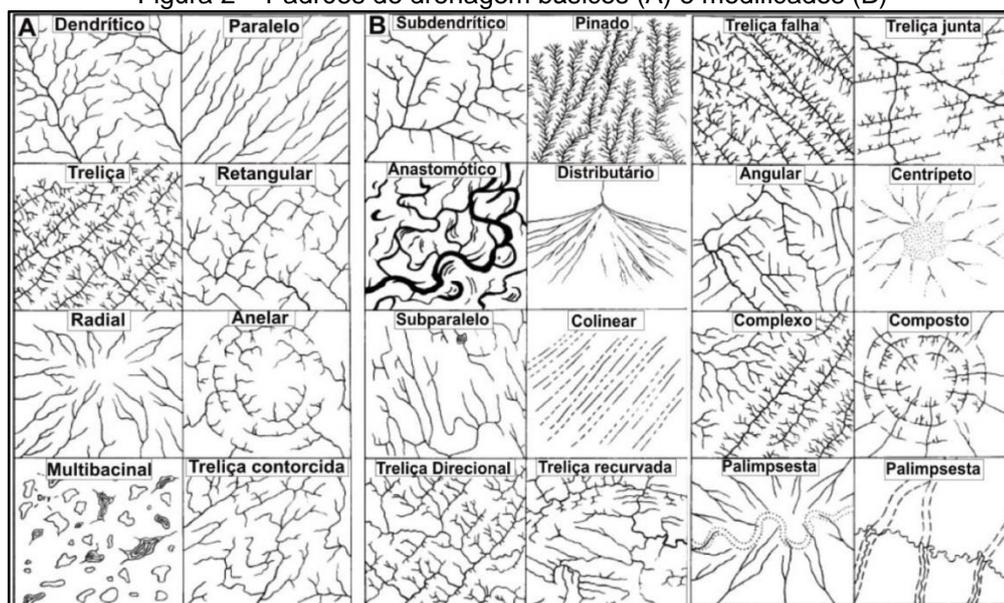
3.1 A ANÁLISE DAS ANOMALIAS NA DRENAGEM

A análise das características da drenagem, tem sido fundamental para identificar a influência tectônica, na paisagem atual, sobretudo, em zonas tidas como tectonicamente estabilizadas, já que, a partir destas características, é possível sugerir o substrato litológico e, também, as estruturas (dobras, falhas) que as condicionam.

Os padrões básicos de drenagem são controlados por uma estrutura regional, sendo reconhecidas algumas destas características, distinguíveis dos outros padrões básicos. O padrão de drenagem é representado pelo arranjo de canais fluviais dentro de um sistema de drenagem. Para extrair informações sobre as características litológicas do substrato e de elementos importantes, relacionados à presença de estruturas tectônicas, é necessário, segundo Alves (2015), que se realize uma abordagem qualitativa da rede de drenagem. Os padrões de drenagem, na natureza, têm sido descritos por Howard (1967) e por Defontaine e Chorowicz (1991), sendo classificados como: dendrítico, paralelo, treliça, treliça contorcida, retangular, radial, anelar e multibacinal (Figura 2A).

Além dos padrões básicos, existem os padrões modificados, mas que mantêm parte das características associadas aos padrões básicos (HOWARD, 1967). Exemplos de padrões modificados incluem: subdendrítico, pinado, variações do padrão treliça, anastomótico, distributário, angular, centrípeto, colinear, complexo, composto e palimpsesto (Figura 2B). Uma síntese das principais características de padrões de drenagem básicos e modificados, bem como de sua conotação geológica, é sumarizada, na Figura 2.

Figura 2 – Padrões de drenagem básicos (A) e modificados (B)



Fonte: Alves (2015), adaptado de Howard (1967)

Quadro 1 – Caracterização dos padrões de drenagem básicos e modificados, com seus significados geológicos correspondentes

Padrões básicos de drenagem	Características gerais	Causas
Dendrítico	- Ramos irregulares, em diversas direções - Ramos com formas semelhantes a galhos de árvores	- Associado a rochas que sofreram intenso metamorfismo - Ausência de controle estrutural
Treliça	Tipo de padrão intermediário, entre o dendrítico e o retangular	- Característica de estratos dobrados e inclinados - Ocorre em rochas sedimentares, vulcânicas ou em rochas metassedimentares de baixo grau, inclinadas ou dobradas - Associado a áreas com fraturas paralelas
Paralelo	Canais dispostos de forma paralela uns aos outros	Feições topográficas paralelas são controladas por estruturas dobradas, falhadas ou por estruturas monoclinais
Retangular	- Apresenta curvas em ângulos retos entre os tributários e as áreas de confluência fluvial - Apresenta maior irregularidade, em relação ao padrão treliça	- Controle estrutural dominante, cujos fluxos seguem linhas de fraqueza, como falhas e fraturas, no relevo - Ocorre em rochas sedimentares e metamórficas
Radial ou Centrífugo	Os canais irradiam de uma área central	Podem ocorrer em estruturas de domos, montanhas (vulcões e erosões residuais)
Padrões de drenagem modificados		
Padrão dendrítico modificado Subdendrítico	- Tributários se estendem horizontalmente - Variação relativamente comum do padrão dendrítico	Controle estrutural ou topográfico fraco Ocorre em rochas homogêneas
Pinado	- Junções de canais em ângulos agudos, uniformemente	Rochas homogêneas resistentes Materiais facilmente erodíveis (textura fina)

	espaçados, e os tributários são quase paralelos - Padrão em forma de pena	
Distributário	- Ocorre em forma de leques aluviais e de deltas - Tributários divergem de um canal principal	
Padrão treliça modificado Treliza direcional	- Direção de treliça dominante é controlada pela litologia ou pela estrutura - Tributários de um lado são mais longos que do outro	Associado a falhas paralelas ou a juntas
Treliza falha	Os ramos divergem e convergem em falhas paralelas	- Controlada por falhas paralelas - Ocorre em estruturas de <i>grabens</i> , <i>horsts</i> ou em sucessão de riftes paralelos
Treliza junta	Associado a falhas paralelas	
Treliza recurvada	Curvas acentuadas, ao redor de padrões treliça	
Padrão paralelo modificado Subparalelo	Canais orientados em direções semelhantes, mas falta a regularidade do padrão paralelo	Ocorre em rochas com xistosidade, em estruturas de falhas e em complexos de dobras
Padrão retangular modificado Angular	Junções em ângulos agudos ou obtusos e ausência de ângulos retos	- Intersecta zonas de falhas ou sistemas de juntas, mas, nem sempre, em ângulos retos - Ocorre em rochas ígneas ou metamórficas falhadas
Padrão centrípeto modificado Centrípeto	- Ocorre em crateras - Canais fluem para o interior, em direção a depressões centrais fechadas	Associado a crateras e demais depressões
Padrão contorcido modificado Palimpsesta	- Padrões de drenagem superpostos - Antigos canais fluviais ou rede abandonada	

Fonte: Alves (2015) e Deffontaines e Chorowicz (1991)

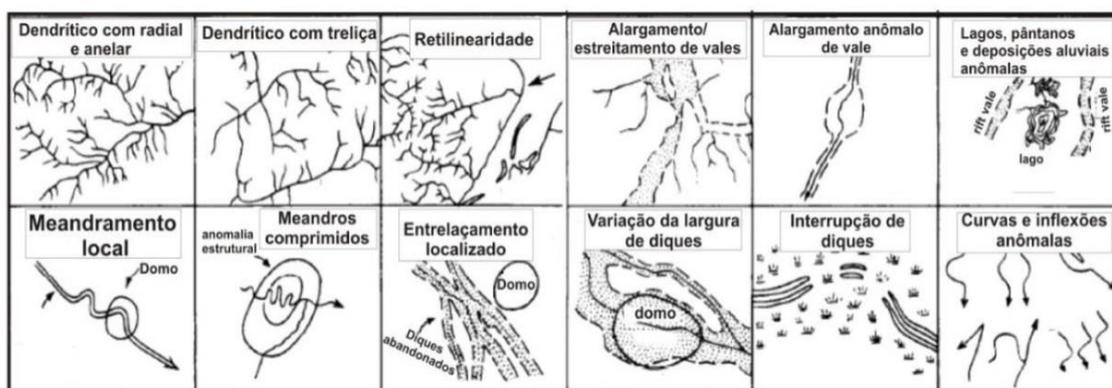
Os padrões de drenagem modificados são, portanto, os que diferem de um padrão básico típico em alguns aspectos, ligados à tectônica e às unidades litológicas secundárias. De acordo com Schumm *et al.* (2000), a rede de drenagem modifica seu curso, se adapta às formas e apresenta padrões, de acordo com as estruturas do modelado do relevo. Assim, cada padrão de drenagem tem um significado litoestrutural, morfoestrutural e morfotectônico. Desvios bruscos, nos cursos fluviais, feições de alinhamento de meandros, terraços fluviais assimétricos, entre outras feições, que indicam algum controle tectônico, são, normalmente, referidos, na literatura geomorfológica, como sendo feições de anomalias locais da drenagem (GONTIJO, 1999).

Para Etchebere (2000), Howard (1967) e Schumm *et al.* (2000), é por meio das análises da rede de drenagem, dos padrões estabelecidos pelos canais, das

capturas de drenagens, das formas das nascentes, da assimetria das bacias e da assimetria de depósitos fluviais, entre muitos outros métodos, que se avalia o conjunto das drenagens, como elemento principal, que responde às alterações crustais. Nesse sentido, a associação de técnicas qualitativas de caracterização da drenagem e de técnicas quantitativas, com a obtenção de parâmetros morfométricos, se torna eficiente, na identificação das deformações morfoestruturais e morfotectônicas da rede de drenagem.

As anomalias de drenagem são definidas como modificações locais da drenagem, em relação ao seu arranjo regional (HOWARD, 1967). Segundo Howard (1967) e Soares e Fiori (1976), sua identificação tem grande significado, na análise morfoestrutural, quando se trata de substrato homogêneo, uma vez que pode revelar influência tectônica, no terreno. Assim, as principais anomalias de drenagem incluem: mudança bruscas, no padrão de drenagem, como, por exemplo, ocorrência de padrão dendrítico com padrão radial, anelar ou de treliça (HOWARD, 1967); entrelaçamento localizado; retilinearidade entre canais; meandramento local e comprimido; alargamento e estreitamento anômalo de vales; formas anômalas de lagos, pântanos e depósitos aluviais; interrupção de diques marginais e variação de sua largura; e curvas e inflexões anômalas, em canais de drenagem (Figura 3).

Figura 3 – Exemplos de anomalias de drenagem



Fonte: Alves (2015).

Para Mantelli e Rossetti (2009), lineamentos, na drenagem, confluência de canais em ângulos retos (90°) e ruptura de declives e vales assimétricos, indicam a presença de movimentos tectônicos recentes. Tal afirmação é confirmada em Silva *et al.* (2006), que sustentam que anomalias, na drenagem, podem ser definidas como uma discordância local da drenagem regional e/ou dos padrões de canais. No caso,

dos terraços fluviais assimétricos, dos trechos retilíneos, da ocorrência localizada e abrupta de curvas meândricas e da captura fluvial, entre outras, são indicadores das atividades tectônicas recentes.

3.2 ANÁLISE DA MORFOESTRUTURA

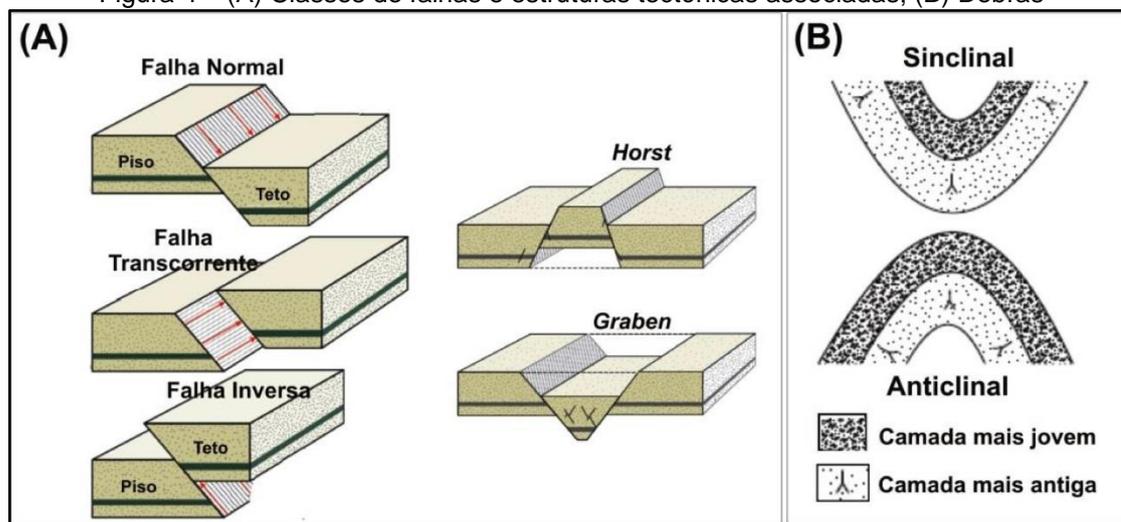
De acordo com Phillips e Schumm (1987), os padrões de drenagem podem identificar se há controle estrutural, na distribuição da drenagem, pois, geralmente, estão associados a fraturas (zonas de concentração de juntas), a falhas (fenômeno geológico de movimentação diferencial de blocos de rochas, ao longo do plano) e a dobramentos (caracterizado por mergulhos das estruturas, podendo ser suaves ou intensos), reativados por movimentação tectônica.

Os critérios de reconhecimento de estruturas tectônicas, no terreno, são diversos, sendo os principais gerados por informações de campo, por dados geofísicos e por sensoriamento remoto (FOSSEN, 2010). A análise morfoestrutural é a abordagem mais utilizada, na verificação de controle litológico e/ou tectônico, no desenvolvimento das formas do relevo (GOUDIE, 2004).

As falhas podem ser agrupadas, de acordo com o movimento relativo de deslocamento dos blocos, divididas em três classes principais: normal, inversa e transcorrente (Figura 4A). Falhas normais são geradas sobre regime extensional e se caracterizam por movimento relativo de abatimento do bloco de cima (teto), em relação ao bloco de baixo (piso) (COSTA *et al.*, 1992; FOSSEN, 2010). Falhas inversas associam-se a regime compressional e caracterizam-se por movimentação de blocos em sentidos opostos aos que ocorrem em falhas normais. Falhas de transcorrência, segundo Fossen (2010), são geradas por movimentos laterais de bloco, no plano horizontal, e podem ser divididas em dextral e sinistral, de acordo com a direção de movimentação do bloco.

De acordo com Pluijm e Marshak (2004), a presença de falhas normais, no terreno, gera um conjunto de blocos desnivelados, sendo os blocos elevados denominados *horsts* e os rebaixados, *grabens* (Figura 4A). A deformação dúctil gera dobras, classificadas como sinclinais, quando apresentam forma côncava e camadas litológicas mais jovens, em direção aos seus núcleos, ou anticlinais, quando exibem forma convexa e camadas mais jovens distantes de seus núcleos (Figura 4B).

Figura 4 – (A) Classes de falhas e estruturas tectônicas associadas; (B) Dobras



Fonte: Alves (2015), adaptado de Fossen (2010)

Os lineamentos estruturais correspondem às feições lineares simples ou composta, mapeáveis, na superfície terrestre, por meio de elementos morfológicos, como cristas de morros ou limites de áreas elevadas (altos estruturais), linhas de drenagem e linhas de costa (baixos estruturais) (O'LEARY *et al.*, 1976). Desse modo, segundo O'Leary *et al.* (1976), os lineamentos são, essencialmente, feições geomórficas que podem estar associadas com feições geológicas e/ou tectônicas, como falhas e fraturas, assim como podem ocorrer, também, ao longo de cristas de dobras.

Soares e Fiori (1976) e Soares *et al.* (1981), distinguem as etapas de levantamento e de interpretação morfoestrutural, por meio de fotoanálise, com critérios definidos para estabelecer os elementos de drenagem e de relevo, sua classificação e associação; e de fotointerpretação, que são os parâmetros para a busca de um significado geológico para as diferentes formas levantadas. Deste modo, o material-base para a fotoanálise é o traçado da drenagem, entendendo-se, esta, como sendo a identificação de todos os canais de escoamento de água, permanentes ou não.

De acordo com estes autores, as formas a serem analisadas e as suas correspondentes interpretações são:

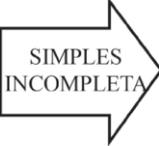
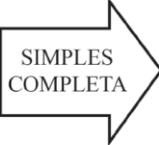
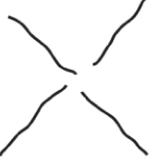
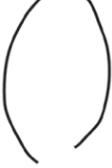
- Formas anômalas anelares e radiais de drenagem – a forma anelar de drenagem, quando controlada por estruturas dômicas ou por depressões, concorda

com o acamamento ou com o fraturamento anelar, cuja geometria arqueada é resultado da flexão das camadas. A probabilidade de correspondência entre uma drenagem anelar e uma estrutura geológica pode ser obtida, de acordo com o grau de estruturação da forma. A drenagem radial pode indicar o sentido de mergulho da camada, ou de fraturamento estrutural, sendo uma propriedade para a determinação de alto ou de baixo estrutural (Figura 5).

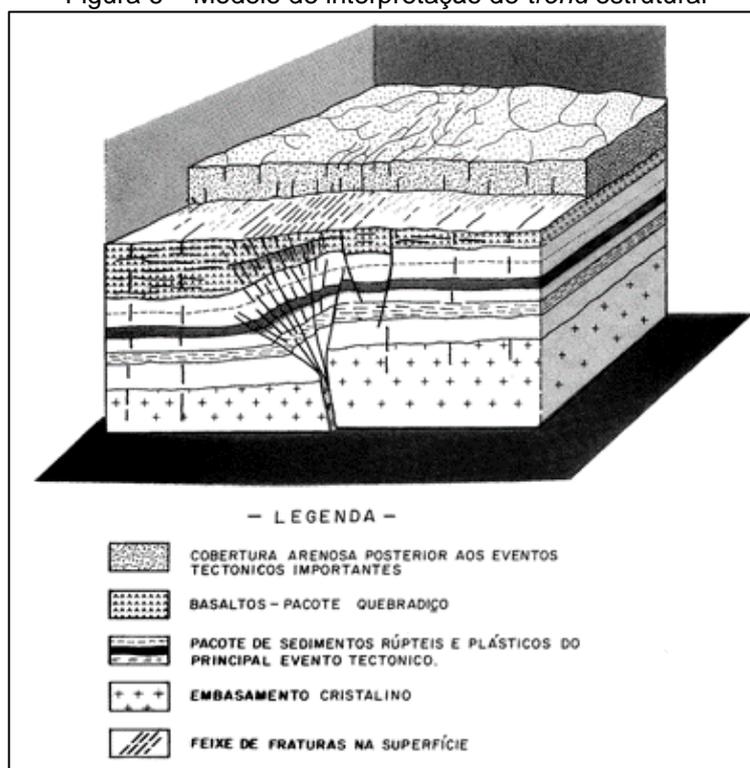
- Assimetria de drenagem e de relevo – a drenagem se desenvolve, nos estratos inclinados, ajustando-se ao acamamento. Naqueles acamamentos pouco a moderadamente inclinados, os elementos de drenagem apresentam tamanhos e/ou arranjos sistematicamente diferentes, de cada lado de um elemento de ordem imediatamente superior. Assim, os elementos de maior comprimento, com baixa angularidade, e os subparalelos, ocorrem, geralmente, no mesmo sentido das camadas, enquanto os rios de comprimento menor e com ângulos abertos, formando os **candelabros**, ocorrem perpendicularmente ao acamamento. A análise de relevo abrange a observação dos padrões de vales, de cristas e de interflúvios. O sentido do mergulho das camadas coincide com o interflúvio de menor declividade (Figura 5).

- Alinhamento de drenagem – feições fortemente estruturadas, retilíneas ou curvilíneas, de comprimento superior a 3 km, são interpretadas como lineamentos estruturais, os quais, por sua vez, podem constituir falhas ou reflexos do movimento de blocos. Feixes de alinhamentos de drenagem predominantemente bidirecionais, de maneira anômala ao seu entorno, são interpretados como reflexos de falhas em profundidade, podendo ser denominados *trends* estruturais (Figura 6).

Figura 5 – Esquemas do critério de interpretação morfoestrutural

		ESTRUTURA DOS ELEMENTOS			
		RADIAL	ANELAR	ASSIMETRIA DRENAGEM	ASSIMETRIA RELEVO
ESTRUTURA DA FORMA					
					
					
					

Fonte: Soares *et al.* (1981)

Figura 6 – Modelo de interpretação de *trend* estrutural

Fonte: Soares *et al.* (1982)

Considera-se, na interpretação, que as estruturas dômicas são dispersivas, independentemente do tipo de litologia, e que, geralmente, apresentam os solos mais evoluídos e estáveis (MORINAGA; RUEDA, 2015). Já os baixos estruturais exercem papel concentrador e são locais que apresentam os solos menos evoluídos e mais instáveis. Estas áreas estruturalmente anômalas têm variação, em suas propriedades, de acordo com a altitude dos elementos de relevo que as compõem. Na tabela 1, estão sintetizadas a variação dos potenciais de intemperismo, a circulação de água e a erosão, conforme a topografia estabelecida por Jiménez-Rueda *et al.* (1993 apud MORINAGA; RUEDA 2015).

Tabela 1 – Propriedades das morfoestruturas, conforme a variação topográfica

Propriedade	Alto estrutural/Alto topográfico	Alto estrutural/Baixo topográfico	Baixo estrutural/Alto topográfico	Baixo estrutural/Baixo topográfico
Intemperismo	Muito forte	Forte	Moderado a forte	Fraco
Circulação de água	Intensa	Média à alta	Baixa e direcionada	Alta e direcionada
Suscetibilidade à erosão	Quase nula	Moderada à forte	Muito forte à moderada	Muito forte

Fonte: Jiménez-Rueda *et al.* (1993)

3.3 SÍNTESE PARCIAL

A explicação dos processos da dinâmica de modelagem da paisagem reside na caracterização de aspectos geológicos, neste caso, litológicos e estruturais, ou seja, morfoestruturais. As características de drenagem, tais como: morfologia de canais, padrão e anomalias, disponibilizam elementos favoráveis a esse tipo de abordagem, aliados ao mapeamento de lineamentos estruturais do relevo e à identificação de fraturas e de falhas. Destaca-se que estes são os principais instrumentos de análise utilizados, também, para o entendimento de processos erosivos.

Neste sentido, a análise das características da drenagem é fundamental, uma vez que os padrões básicos de drenagem são controlados por uma estrutura regional. Por sua vez, os padrões de drenagem modificados são os que diferem de um padrão básico típico, em alguns aspectos, ligados à tectônica e às unidades litológicas secundárias.

Portanto, a associação de técnicas qualitativas, de caracterização da drenagem, e quantitativas, com a obtenção de parâmetros morfométricos, se torna eficiente, na identificação das deformações morfoestruturais e morfotectônicas da rede de drenagem e, conseqüentemente, dos aspectos morfológicos, como um todo.

De acordo com Schumm *et al.* (2000), a rede de drenagem modifica seu curso, se adapta às formas e apresenta padrões, de acordo com as estruturas do modelado do relevo. Assim, cada padrão de drenagem tem um significado litoestrutural, morfoestrutural e morfotectônico.

Os padrões de drenagem podem identificar, portanto, se há controle estrutural, na distribuição da drenagem, pois, geralmente, estão associados a fraturas (zonas de concentração de juntas), a falhas (fenômeno geológico de movimentação diferencial de blocos de rochas, ao longo do plano) e a dobramentos (caracterizado por mergulhos das estruturas, podendo ser suaves ou intensos), reativados por movimentação tectônica.

Os critérios de reconhecimento de estruturas tectônicas, no terreno, são diversos, sendo os principais gerados por informações de campo, por dados geofísicos e por sensoriamento remoto (FOSSÉN, 2010). A análise morfoestrutural é

a abordagem mais utilizada, na verificação de controle litológico e/ou tectônico, no desenvolvimento das formas do relevo (GOUDIE, 2004).

Por fim, autores, como Soares e Fiori (1976) e Soares *et al.* (1981), destacam, na etapa de levantamento e de interpretação morfoestrutural, a fotoanálise, cujo material-base é o traçado da drenagem, pela interpretação de formas anômalas anelares e radiais de drenagem, de assimetria de drenagem e relevo e de alinhamento de drenagem.

4

METODOLOGIA

A pesquisa, na área de estudo, desenvolveu-se em três etapas: (1) análise da degradação dos solos por processos erosivos hídricos lineares; (2) análise do condicionante tectônico; e (3) análise da relação do condicionante morfoestrutura e da morfologia da drenagem.

A primeira etapa corresponde à análise da degradação dos solos por processos erosivos hídricos lineares e se desenvolveu em duas fases:

i) a primeira fase, de característica teórica, corresponde à coleta e à análise de dados existentes, a partir da consulta e da revisão de livros, de artigos, de dissertações e de teses, abordando os temas da erosão do solo, do processo de erosão por ravinas e por voçorocas e das variáveis controladoras de tais fenômenos, sobretudo, as produções já existentes para a área de estudo e seu entorno. Algumas referências podem ser citadas, tais como: Beavis (2000); Cassol e Lima (2003); Viero (2004); Bertoni e Lombardi Neto (2005); Denardin *et al.* (2005); Guerra *et al.* (2005) e (2007); Trainini (2005); Scherer e Lavina (2006); Trentin e Robaina (2006); Andrades Filho *et al.* (2007); Soares *et al.* (2008); Mantelli e Rossetti (2009); Morinaga e Rueda (2015); entre outros. Foram consultados, ainda, materiais sobre os métodos de integração e de geração de dados em Sistema de Informações Geográficas (SIG) e de Sensoriamento Remoto, para os mapeamentos dos processos erosivos e para os cruzamentos de dados de geologia, solos, geomorfologia, com os dados de localização das ravinas, das voçorocas e dos areais. Além do mapeamento geológico da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM, 2006) e do mapeamento de solos da bacia, disponível em Binda (2016), que se baseou no mapeamento de solos do estado do Rio Grande do Sul (BRASIL, 1973), atualizado por Streck *et al.* (2008);

ii) a segunda fase desta primeira etapa, de característica prática, corresponde à delimitação da área de estudo, à identificação e ao mapeamento dos processos erosivos. A partir de um primeiro trabalho de reconhecimento e de observação de campo (em 20/06/2015) e, de acordo com as hipóteses da pesquisa, foi delimitada, como área de estudo, a Bacia Hidrográfica do Arroio Miracatu, situada em parcelas dos Municípios de Manuel Viana e de São Francisco de Assis.

A identificação dos processos erosivos, na bacia, se deu, por meio de interpretação de imagens de satélite de alta resolução espacial, disponíveis no programa Google Earth®. O material permitiu a visualização e a delimitação dos alvos em escala 1:5.000, apesar de o mapa final permanecer com a escala cartográfica de 1:50.000. Vales em “U” ou “V”, com encostas retilíneas e marcadas por solo exposto ou vegetação rasteira, em forma de erosão regressiva, nas cabeceiras de drenagem do escoamento de águas pluviais ou desconectados da rede hidrográfica, foram os critérios interpretativos. A erosão foi delimitada pelo seu eixo, sendo traçados segmentos de reta, no canal principal de escoamento de água pluvial. Estas interpretações, obtidas por produtos do sensoriamento remoto, foram confrontadas, em campo.

A segunda etapa de trabalho, a análise do condicionante tectônico, consistiu em quatro etapas operacionais: i) obtenção dos dados hipsométricos e geológicos/litológicos; ii) extração da rede de drenagem; iii) análise da rede de drenagem; iv) obtenção dos lineamentos estruturais.

A metodologia aplicada para a produção do mapa hipsométrico constituiu na integração de dados SRTM e de variáveis morfométricas, em ambiente SIG (Sistema de Informação Geográfica). Para a elaboração do Modelo Digital de Elevação (MDES) e para a identificação e a delimitação de feições do relevo, foi utilizado o conjunto de dados SRTM (90 m) e TOPODATA (30 m).

A extração da rede de drenagem foi feita por interpretação automática, a partir do conjunto de dados SRTM (90 m) e TOPODATA (30 m). Com a sobreposição das imagens de alta resolução do Google Earth®, se obteve o seu traçado revisado. A interpretação foi feita em escala 1:5.000 e procurou, sempre, representar, da maneira mais fiel possível, a geometria e o arranjo espacial das drenagens. Esta foi a etapa mais importante do trabalho, pois uma representação da rede de drenagem feita de maneira displicente e sem o devido rigor pode influenciar, de maneira decisiva, a interpretação morfoestrutural. Ao final, com a aplicação desta metodologia, pode-se gerar o Mapa da Rede Hidrográfica da Bacia do Arroio Miracatu (1:50.000).

A análise da rede de drenagem foi pautada pela identificação do padrão geral da bacia e dos padrões anômalos, com características distintas do padrão geral. Na análise realizada, foram consideradas, ainda: a densidade, a sinuosidade, a angularidade, as formas anelares, radiais e assimetrias e as anomalias locais dos

canais. Corroborando com a identificação de possíveis evidências de controle estrutural, ainda foram obtidos parâmetros morfométricos para a bacia.

Em relação à caracterização morfométrica, foram utilizados os procedimentos executados em análises hidrológicas e ambientais, que revelam os indicadores físicos específicos do entendimento da dinâmica de uma bacia. Assim, foram utilizados: o Índice de Circularidade (IC); o Índice de Sinuosidade (IS); o Fator de Assimetria de Bacia de Drenagem (FABD); o Fator de Simetria Topográfica Transversa (FSTT); e a Relação Declividade-Extensão (RDE) (TEODORO *et al.*, 2007).

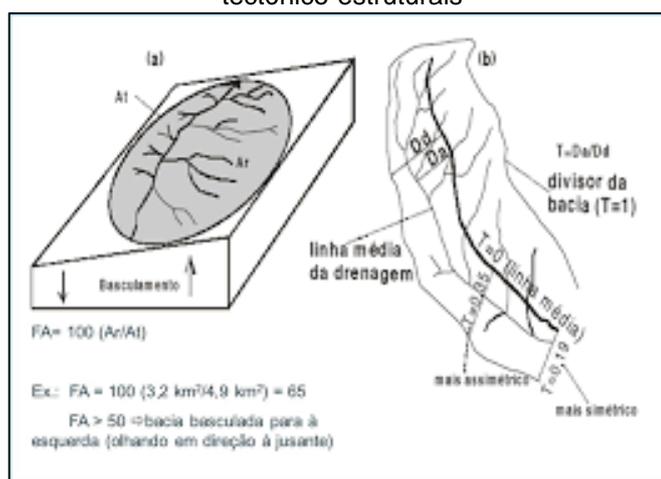
O Índice de Circularidade (IC) objetiva caracterizar o comportamento do fluxo drenado pela bacia, quanto a sua resposta, no exutório, sendo esta ferramenta importante, pois possibilita tornar a caracterização das formas das bacias menos subjetiva. Quanto mais próximo de 1 (um) for o valor, mais circular é a bacia e, conseqüentemente, maior é o risco de erosão, de assoreamento e de enchentes, pois a resposta do canal à pluviosidade é convergente e mais rápida. Nas bacias alongadas, por outro lado, o deflúvio ocorre em pontos distantes e isto faz com que haja um tempo maior para a chegada do fluxo dos canais tributários a um mesmo ponto do canal principal, resultando em menor vazão e em uma resposta mais lenta do canal à pluviosidade. Este parâmetro é uma relação entre a área da bacia e o seu perímetro e é calculado da seguinte forma: $IC = 12,57 \times A \frac{A}{P^2}$, em que A é a área da bacia, P é seu perímetro e 12,57 é uma constante.

O Índice de Sinuosidade é dado por $IS = \frac{L}{dv}$, em que L é o comprimento do canal principal e dv é a distância vetorial entre os pontos extremos do canal principal. Este índice relaciona o comprimento verdadeiro do canal (projeção ortogonal) com a distância vetorial (comprimento em linha reta) entre os dois pontos extremos do canal principal (SCHUMM, 1963). Valores próximos a 1,0 indicam que o canal tende a ser retilíneo. Já os valores superiores a 2,0 sugerem canais meandranes e os valores intermediários indicam formas transicionais, regulares e irregulares. Sabe-se, entretanto, que a sinuosidade dos canais é influenciada pela carga de sedimentos, pela compartimentação litológica, pela estruturação geológica e pela declividade dos canais.

O Fator de Assimetria de Bacia de Drenagem (FABD), introduzido por Hare e Gardner (1985 apud SALAMUNI *et al.*, 2004) permite que se tenha uma ideia do

deslocamento lateral do rio principal, podendo este ter sido provocado pela ação de processos fluviais internos ou pela ação tectônica (Figura 7a). Este índice é alcançado, por meio da aplicação da equação $FA = 100 \times \frac{Ar}{At}$, em que Ar é a área da bacia, à direita do rio (em direção à jusante) e At é a área total da bacia. O Fator de Simetria Topográfica Transversa (FSTT), introduzido por Cox (1994 apud SALAMUNI *et al.*, 2004) corresponde à assimetria do perfil topográfico transversal à bacia, que pode ser caracterizado pela migração preferencial do canal principal. Os valores são obtidos pela equação $T = \frac{Da}{Dt}$, em que Da é a distância da linha média do eixo da bacia, até a linha média do cinturão do meandro ativo, e Dt é a distância da linha média da bacia ao divisor da bacia (Figura 7b).

Figura 7 – (a) Fator de Assimetria da Bacia de Drenagem (FABD), que quantifica o deslocamento de um rio, em função de influências tectônico-estruturais; (b) Fator de Simetria Topográfica Transversa (FSTT), que quantifica o deslocamento de um rio, considerando a topografia gerada por influências tectônico-estruturais

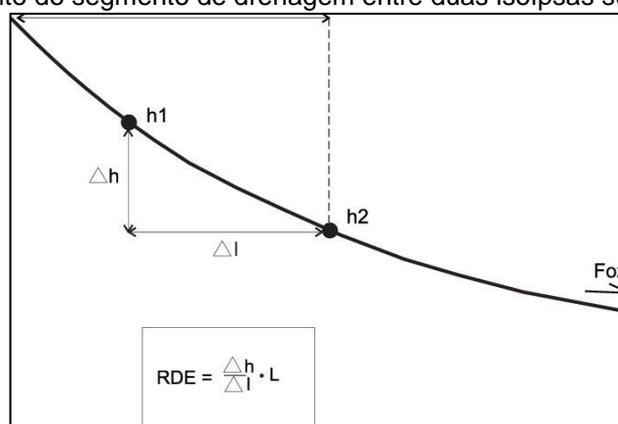


Fontes: (a) modificado de Hare e Gardner (1985 apud SALAMUNI *et al.*, 2004); (b) COX (1994, apud SALAMUNI *et al.*, 2004)

A assimetria será maior quanto mais próximo T for de 1. Para uma análise mais detalhada, foi feito o uso de ambos os fatores, pois estes trabalham em escalas de detalhe e de medidas distintas (tanto areal quanto linear). O FABD, por trabalhar com a área total da bacia, generaliza a interpretação do comportamento da bacia, como um todo, podendo ocultar comportamentos variados, em uma mesma bacia. O FSTT, por outro lado, por ser feito setorialmente, permite uma análise mais detalhada da bacia em estudo. Foram traçados 11 perfis transversais, nesta análise.

A Relação Declividade-Extensão (RDE), por sua vez, é um parâmetro morfométrico, que foi proposto por Hack (1973) e que pode auxiliar, no entendimento do grau de influência de possíveis controles estruturais, no terreno. Este é analisado, por meio da conformação do perfil longitudinal, uma vez que indica o grau de declividade de um trecho selecionado do canal, relacionando o mesmo com toda a sua extensão. Sendo assim, analisaram-se possíveis quebras, ao longo do perfil longitudinal do rio, estabelecendo diferentes graus de influência de controles estruturais, na paisagem. O RDE foi calculado para o canal principal do Arroio Miracatu, até a confluência com seus principais afluentes e, para cada um destes segmentos, até as nascentes, levando-se em consideração a relação entre: Δh (diferença altimétrica do trecho selecionado para a análise), Δl (projeção horizontal da extensão do trecho selecionado do rio) e L, que corresponde ao comprimento total do curso d'água, à montante do ponto para o qual o índice está sendo calculado (Figura 8).

Figura 8 – Parâmetros utilizados no cálculo do índice RDE, para segmento de drenagem (intervalo entre duas isoípsas consecutivas). L = comprimento da drenagem entre a cabeceira e a isoípsa à jusante; Δh = diferença de altitude entre duas isoípsas subsequentes; e Δl = projeção horizontal do comprimento do segmento de drenagem entre duas isoípsas subsequentes



Fonte: Etchebehere *et al.* (2004)

Para a interpretação da relação entre os valores de RDE e os distintos graus de controle estrutural, Seeber e Gornitz (1983) sugerem que índices com valores abaixo de dois configuram-se como gradiente ideal (ou seja, o rio encontra-se próximo ao estado de 'equilíbrio'); valores entre dois e dez configuram-se como anomalias de 2ª ordem; e valores acima de dez configuram-se como anomalias de 1ª ordem, que representam, no terreno, a influência de forte controle estrutural. Como sugerido por Etchebehere *et al.* (2000) e por Fujita *et al.* (2011), as anomalias de 2ª ordem estão

associadas às mudanças litológicas, aos lineamentos do relevo (presença de falhas e de diques) e à confluência de rios, enquanto as de 1ª ordem ou, neste caso, com valores próximos a este parâmetro, às diferenças, na resistência litológica, no controle estrutural e uma possível atividade tectônica.

Andrades Filho (2006), que realizou seus estudos no nordeste brasileiro, possui outra proposta para classificar e para interpretar os dados de RDE. Este autor também considera o valor 2 como limiar do gradiente ideal e, através de um histograma, analisa os dados encontrados, a fim de realizar o grupamento dos valores e de buscar classes mais condizentes com o território brasileiro, além de validá-las, em campo. Utilizou, portanto, as seguintes classes: índice abaixo de dois corresponderia a um rio com gradiente ideal; valores de 2 a 4 configuram-se como anomalias de 3ª ordem; valores de 4 a 6, como anomalias de 2ª ordem; e valores acima de 6 configuram-se como anomalias de 1ª ordem.

O mapa geológico (litológico), em escala 1:50.000, foi gerado, a partir do mapeamento da CPRM (1:750.000) e das observações de campo.

A produção do mapa de lineamentos partiu da identificação e da vetorização de lineamentos estruturais, que, por sua vez, foi definida, a partir de interpretação visual por estereoscopia, por meio da interpretação de feições lineares de fotografias aéreas, em escala 1:60.000. Foram interpretadas as fotografias de número 2373 a 2380, 3013 e 3016, 6089, 3237 a 3242, 3015, 3317 a 3322 e de 6084 a 6090, disponibilizadas pela 1ª Divisão de Levantamento do Exército Brasileiro.

O método adotado foi revalidado, pela associação com o método de interpretação por imagens de satélite em 3D. A técnica consistiu na obtenção de imagens sequenciais, de alta resolução espacial, do Google Earth®, de toda a bacia, em escala 1:5.000. Destas imagens, foram gerados anaglifos (imagens 3D) e foi revisada toda a interpretação e refeito o traçado de novos lineamentos, com a escala de maior detalhe. Após a interpretação, os traçados foram vetorizados, no programa Google Earth®. Com auxílio dos programas ArcMap® e RockWorks17®, foram gerados os diagramas de roseta de frequência absoluta.

A terceira etapa do trabalho diz respeito à análise da relação do condicionante morfoestrutura e da morfologia da drenagem. A etapa compreendeu as observações de campo, pautadas por quatro procedimentos de análise: i) localização dos processos; ii) identificação das diferenças faciológicas dos ambientes geológicos; iii)

tomada das direções (ângulos), em que se desenvolvem os processos erosivos (ravinas e voçorocas); e iv) associação dos processos erosivos com os lineamentos registrados em campo.

A localização dos processos erosivos lineares ocorreu com o auxílio de imagens de satélite e de cartas topográficas, considerando as hipóteses da pesquisa e visando um estudo em escala de detalhe, sendo possível visitar a campo e confirmar as coordenadas de localização de sete processos erosivos.

A medida das direções (ângulos) em que se desenvolvem os processos erosivos foi realizada com auxílio de bússola do modelo VEB Freiburger Präzisionsmechanik (Deutsche Demokratische Republik), considerando os eixos principais, os eixos secundários e as mudanças bruscas de direção de desenvolvimento.

A associação dos processos erosivos com os lineamentos registrados em campo e por fotoanálise, por sua vez, ocorre em duas escalas de análise. Em uma escala de menor detalhe (1:150.000), em nível de bacia, se produziu o mapa de densidade de processos erosivos lineares da bacia, em confrontação com os lineamentos estruturais. Em uma escala de maior detalhe, por análise de campo, se realizou a identificação e a medida dos ângulos de falhas e/ou fraturas em rochas, assim como das feições assimétricas, no interior e no entorno dos processos erosivos. Os dados dos ângulos aferidos em campo foram confrontados com os ângulos dos lineamentos mapeados, possibilitando um melhor entendimento da evolução dos processos lineares e do controle estrutural exercido sobre estes.

No desenvolvimento do método adotado para a produção do mapa de densidade dos processos erosivos lineares, a espacialização da informação de quantidade de feições erosivas foi realizada pela interpolação de frequências. Salienta-se que se entende como densidade, a quantidade de feições em certa unidade de área. Ao considerar as dimensões da bacia e as distâncias médias aproximadas entre cada processo erosivo, o produto final foi gerado automaticamente, pelo programa ArcGis®, sendo realizada a contagem das feições, dentro de um raio de 5 km².

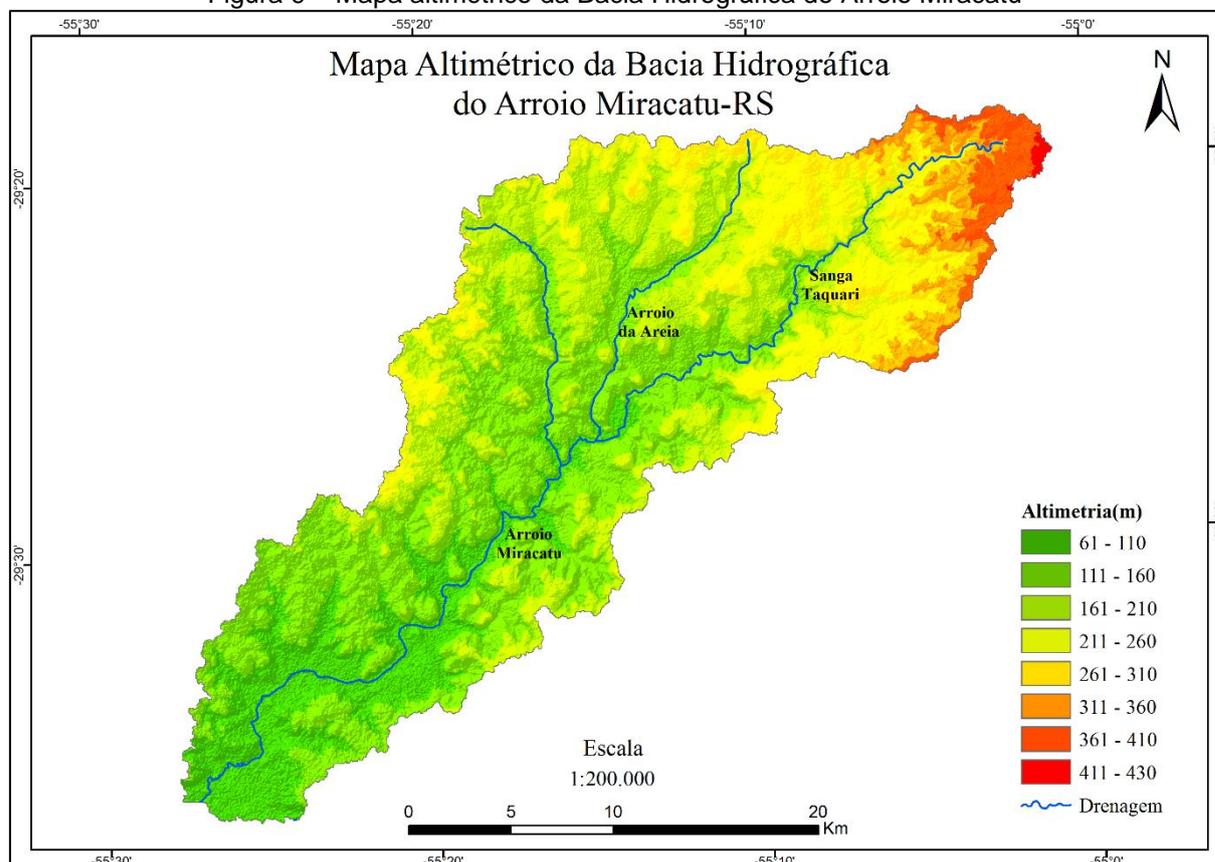
5

ASPECTOS LITOLÓGICOS, PEDOLÓGICOS E TECTÔNICOS ASSOCIADOS À ESTRUTURA GEOMORFOLÓGICA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO ARROIO MIRACATU

5.1 ASPECTOS DA COMPOSIÇÃO LITOLÓGICA

A Bacia Hidrográfica do Arroio Miracatu apresenta altimetrias que variam de 61 metros, predominantemente, na porção sul, na planície e na sua foz, até 450 metros de altitude, na porção Norte, nas nascentes dos arroios Passo da Areia e Sanga do Cabral, de acordo com a Figura 9.

Figura 9 – Mapa altimétrico da Bacia Hidrográfica do Arroio Miracatu



Fonte: Modelo de Elevação do relevo MDE-SRTM, elaborado por Juliana Dummer e por Neemias Lopes (2019)

As variações altimétricas, na Bacia Hidrográfica do Miracatu, mostram cinco unidades geológicas relacionadas à sua estrutura: rochas sedimentares das Formações Guará e Botucatu (Figura 10), rochas vulcânicas das fácies Caxias e

Gramado (Formação Serra Geral) e, por fim, os depósitos aluvionares do Arroio Miracatu (Depósitos Aluviais Quaternários) (CPRM, 2006) (Figura 13).

Considerando o aspecto cronológico de formação como referência, para expor o detalhamento destas litologias, isto é, das porções mais antigas às mais recentes, a primeira litologia a ser descrita é a Formação Guará. A Formação Guará pertence ao quarto ciclo de formação da Bacia do Paraná. Segundo Milani (2002), se constitui em uma vasta região sedimentar da América do Sul e abrange um conjunto de rochas, com idade entre o Neo-Ordoviciano e o Neocretácio. Scherer e Lavina (2005; 2006) definem esta formação como Neojurássica, resultante de uma sucessão de mudanças climáticas, intercalando períodos mais úmidos com períodos de aridez. Segundo Bizzi *et al.* (2003), o quarto ciclo, denominado Supersequência Gondwana II (Triássico Médio a Superior), que encerra a sedimentação, na Bacia do Paraná, ocorre, apenas, no estado do Rio Grande do Sul e no norte do Uruguai. Sedimentação, esta, composta pelas rochas sedimentares do Grupo Rosário do Sul, que inclui as formações Sanga do Cabral, Santa Maria, Caturrita e Guará.

Figura 10 – Primeiro plano da foto: o compartimento mais rebaixado de coxilhas, constituídas de sedimentos e de solos arenosos, oriundos da degradação das Formações Guará e Botucatu. Segundo plano da foto: superfície de erosão, que demarca o compartimento médio de um planalto, associado à Formação Guará. Terceiro plano da foto: superfície de erosão, que demarca o compartimento mais elevado de um planalto, associado à Formação Botucatu. Bacia do Arroio Miracatu, Município de São Francisco de Assis, RS



Fonte: Acervo pessoal de Roberto Verdum (06/11/2008)

Anteriormente associado à Formação Botucatu, o arenito da Formação Guará foi incluído, no mapeamento geológico da CPRM, em 2006, ocupando a maior área

da Bacia Hidrográfica do Arroio Miracatu, de 30.558,78 ha, que representa em torno de 52% da área total da bacia. Caracteriza-se por arenitos e pelitos avermelhados, oriundos de depósitos fluviais e lacustres e possui abundante fauna de répteis e mamíferos (MILANI, 1997).

A área de estudo caracteriza-se, sobretudo, pela ocorrência de grânulos silicosos, dispersos e menos selecionados, com estratos cruzados acanalados e planares, com *sets* curtos e médios e estratificação plano-paralela característica de depósito fluvial. É neste substrato que ocorre a maior parte dos areais e dos processos erosivos lineares, na Bacia Hidrográfica do Arroio Miracatu, o que é concordante com os estudos realizados por Guasselli *et al.* (2010), que apontou que 52.92% dos areais, no Rio Grande do Sul, ocorrem sobre a Formação Guará.

Em alguns casos, foi possível identificar clastos argilosos róseos, com dimensões de 10 a 20 cm. Este material, no entanto, confere características de alto grau de suscetibilidade à erosão, por se tratar de uma rocha friável, dado o elevado conteúdo de quartzo e a pouca ocorrência de ligantes e de cimentação de óxidos, existente, somente, ao redor dos grãos. Uma maior resistência, que é conferida, quando o preenchimento dos poros é feito por óxidos de ferro, em um processo de cimentação, caracterizado, em alguns casos, por uma carapaça ferruginosa. No entanto, à medida que essa carapaça é rompida, o substrato se torna muito friável e, assim, susceptível aos processos de ravinamento e de voçorocamento (Figura 11).

Também de origem associada à Bacia do Paraná, estão, na porção norte da área de estudo, os arenitos eólicos da Formação Botucatu. Segundo Bizzi *et al.* (2003), com a abertura do Oceano Atlântico Sul e o rebaixamento do fundo da bacia, houve a formação de ampla depressão topográfica, em que se depositaram arenitos de granulação fina, correspondentes à Formação Botucatu e discordantes da Bacia do Paraná, que inicia por depósitos de rios efêmeros e de lençóis de areia, seguidos por arenitos eólicos; e de outra depressão, superior, consistindo de lentes de arenitos eólicos intercaladas, nas rochas vulcânicas da Formação Serra Geral.

A gênese da Formação Botucatu está, portanto, relacionada a um período anterior à separação dos continentes. No interior do megacontinente Gondwana, formou-se, sob ação dos ventos, ininterruptos, um deserto de dunas construído com areia de granulação, em geral, fina ou média. Eram nuvens de areia, constantes, formando, no longo tempo em que o fenômeno persistiu, um deserto de dunas, em

que os depósitos, ora se acumulavam de uma forma, ora de outra (GLADCZENKO *et al.*, 1997).

Figura 11 – Carapaça ferruginosa em arenito da Formação Guará, identificada nas paredes dos eixos laterais (lado direito) da ravina 1. Bacia do Arroio Miracatu, Município de Manuel Viana, RS



Fonte: acervo pessoal de Roberto Verdum (2019)

O arenito é formado por antigas dunas letificadas. A areia das dunas, pela cimentação provocada, após longo tempo de deposição, transformou-se em rocha, recebendo o nome de Arenito. Os arenitos da Formação Botucatu são compostos, em mais de 95%, de grãos de quartzo médios ou finos, quase não existindo silte ou argila (materiais com granulação ainda menor), e podem conter pequena fração de outras rochas (quartzito e feldspato). Com frequência, os grãos estão envoltos por óxido férrico, que torna a rocha mais coesa e lhe dá coloração avermelhada ou amarelada. Bortoluzzi (1974) observa que essa Formação é composta por arenitos essencialmente quartzosos, contendo feldspatos alterados, cimentados, predominantemente, por sílica e, em alguns casos, por óxido de ferro, com estratificação cruzada de grande porte, caracterizando a consolidação de antigas dunas de origem eólica. Quando há ocorrência de cimentação por sílica, é maior a resistência aos processos da dinâmica superficial.

Na área de estudo, esta é a formação de segunda maior ocorrência, com uma área de 19.851,29 ha, que representa em torno de 34% da área total da bacia. Quando esta formação aflora, associado aos relevos testemunhos, o arenito Botucatu confere um extrato resistente aos processos erosivos, refletindo na condição de Cerros de topo plano, muito comumente identificada, nas paisagens da região (Figura 10). Deve-

se ressaltar que esta é uma condição frequente, devido à maior resistência do arenito Botucatu, porém, na área de estudo, também foram identificados Cerros de topo plano, constituídos pela Formação Guará, que foi mapeada em estudos mais recentes, na região.

Na porção superior da bacia, além dos arenitos eólicos da Formação Botucatu, estão as rochas vulcânicas (Fácies Gramado e Caxias), associadas à Formação Serra Geral e constituídas por sucessivos derrames (Figura 12). A Formação Serra Geral, de acordo com Veiga (1973), é constituída por duas sequências vulcânicas: uma, de caráter básico e outra, ácida, com intercalação de sedimentação eólica, nos períodos de recesso da atividade vulcânica, conhecidos como arenitos *intertrapps*.

O principal vulcanismo ocorreu na parte Média do Cretáceo Inferior (120-130 milhões de anos) com as principais manifestações ocorridas no Jurássico Superior. O basalto se apresenta em derrames, evidenciados topograficamente, na paisagem, pela forma de patamares, sendo que as estruturas dos derrames, caracterizados por Leinz (1949), podem ser observadas e reconhecidas, na área de estudo.

Segundo Trentin (2006), estas rochas podem apresentar diferentes estágios de alteração, sendo comum o fenômeno de esfoliação esferoidal. De acordo com os dados petrográficos, cada porção do derrame apresenta características diferentes, o que lhes confere diferentes resistências aos processos de alteração, sendo que, de maneira geral, este substrato apresenta considerável resistência aos processos erosivos.

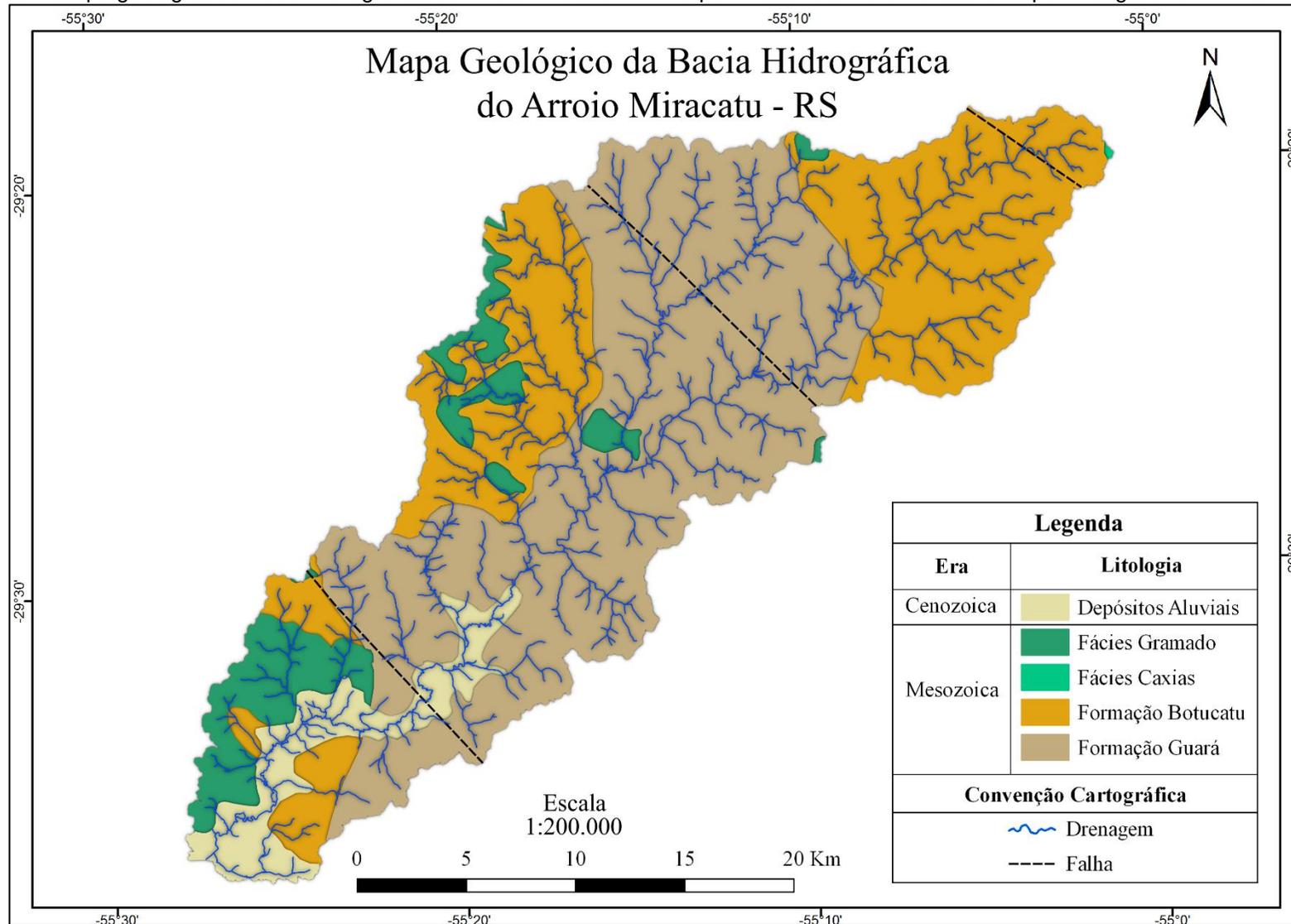
Os recobrimentos vulcânicos são descontínuos, na área de estudo, estando presentes em dois segmentos principais. O primeiro, na borda noroeste, e o outro, na borda sudoeste, da Bacia Hidrográfica do Arroio Miracatu, pela fácies Gramado, totalizando uma área de 5.341,93 ha., ou seja, uma área que representa em torno de 9% da bacia, outrora intercalados com as formações sedimentares. Ao norte da bacia, já no seu limite com a Bacia Hidrográfica do Arroio Inhacundá, se identificam as rochas a formação Caxias, ocupando uma pequena área de 17,08 ha.

Figura 12 – Afloramento de basaltos em leito de arroio. Bacia Hidrográfica do Arroio Miracatu, Município de Manuel Viana, RS



Fonte: Acervo pessoal de Juliana Dummer (2016)

Figura 13 – Mapa geológico da Bacia Hidrográfica do Arroio Miracatu. A linha pontilhada localiza o transecto do perfil longitudinal A-B da Figura 11



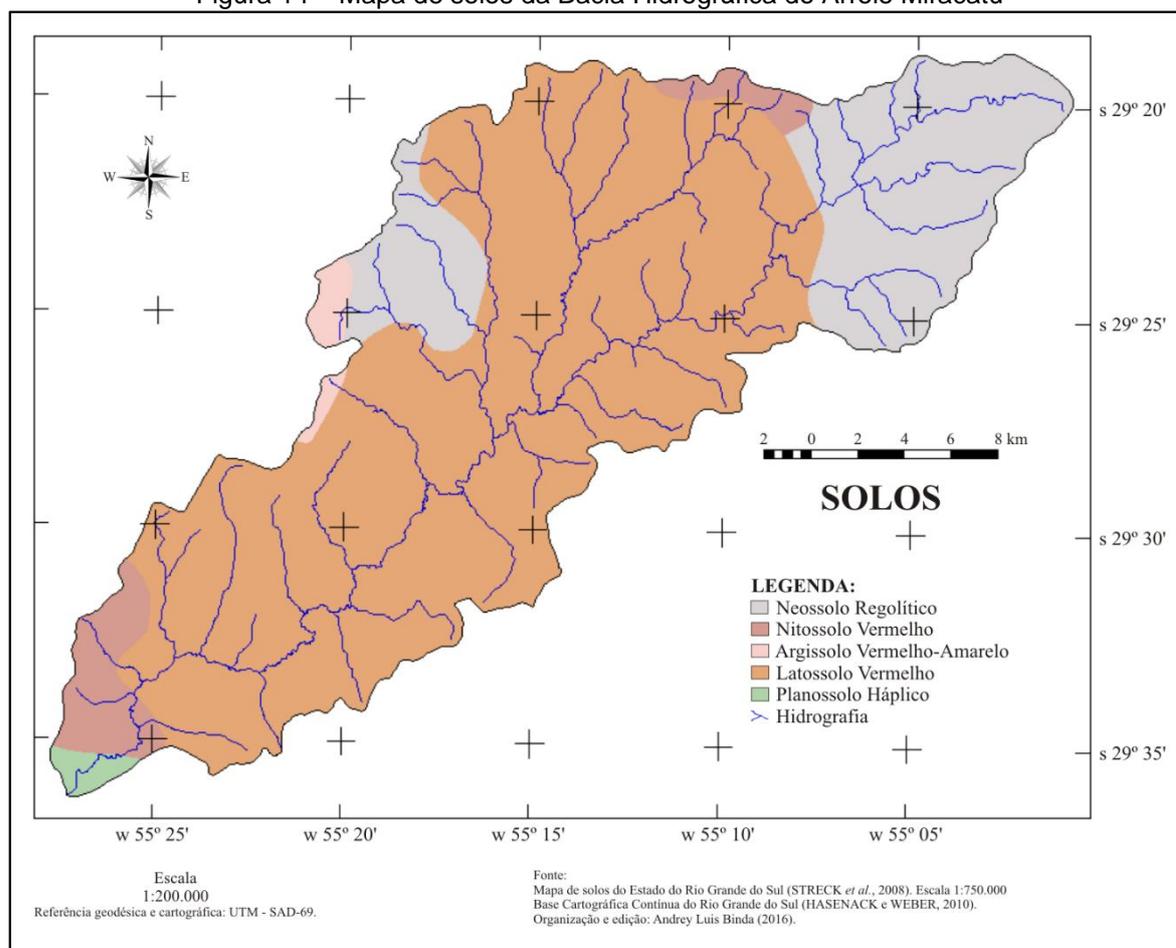
Fonte: CPRM (2008), com elaboração de Juliana Dummer e de Neemias Lopes (2019)

5.2 ASPECTOS DO CONTEXTO PEDOLÓGICO

De acordo com o mapeamento de solos do Estado do Rio Grande do Sul (BRASIL, 1973), atualizado por Streck *et al.* (2008), disponível em Binda (2016), a Bacia Hidrográfica do Arroio Miracatu é composta por cinco tipos de solos: 1) Neossolos Regolíticos Distro-Úmbricos: caracterizado por horizonte A, sobrejacente à rocha intemperizada (C ou Cr), com contato lítico abaixo de 0,50 m da superfície, podendo ocorrer horizonte B incipiente ($B_i < 10$ cm), que, quimicamente, apresenta baixa saturação por bases; 2) Latossolos Vermelhos Distróficos: solos profundos e bem drenados, definidos pela presença de horizonte B latossólico (Bw), de cor avermelhada, sem aumento nos teores de argila, com profundidade e saturação por bases baixas; 3) Nitossolos Vermelhos Distroférricos: são solos profundos, semelhante aos latossolos, dos quais se diferencia pelo horizonte B nítico (cerosidade), de coloração vermelha, podendo apresentar horizonte Bw subjacente (latossólico), apresentando baixa saturação por bases e incremento de ferro, como características químicas principais; 4) Argissolos Vermelho-Amarelos Alumínicos: diferenciados pelo horizonte B textural (Bt) de acúmulo de argila, de cor vermelho-amarelo e alta concentração de alumínio, profundos, que podem variar de bem a mal drenados; 5) Planossolos Háplicos Eutróficos: designam solos de várzeas e, portanto, mal drenados, com presença de horizonte Bt do tipo plânico (argiloso), que testemunham ruptura textural, em relação aos horizontes sobrejacentes (A e E), normalmente arenosos e que apresentam alta saturação por bases (STRECK *et al.*, 2008) (Figura 14).

Cabe destacar que a escala adotada, no mapeamento, 1:750.000, fornece uma visão limitada sobre a verdadeira distribuição da cobertura pedológica, na área de estudo. Trabalhos em escala de maior detalhe não se encontram disponíveis, exceto o mapeamento simplificado de solos, apresentado por Denardin (2009) e detalhamentos de perfis e análises pontuais em um setor da bacia realizadas respectivamente por Binda (2016) e Vieira (2018). Embora a cartografia apresentada por Denardin (2009) seja baseada na relação solo-relevo de apenas 14 amostras de solos, coletadas em 12 bacias hidrográficas contíguas (≈ 1.500 km²), no oeste do Estado do Rio Grande do Sul – dentre as quais, a BHAM, esta fornece uma visão mais precisa da distribuição pedológica, na paisagem.

Figura 14 – Mapa de solos da Bacia Hidrográfica do Arroio Miracatu



Fonte: Binda (2016)

Conforme Denardin (2009), a bacia em estudo apresenta quatro agrupamentos de classes: 1) solos rasos em altitudes elevadas: formados pela associação entre Cambissolos e Neossolos Litólicos, derivados de rochas efusivas da Formação Serra Geral; 2) Solos rasos a bem desenvolvidos, em rochas areníticas, cuja diferenciação entre solos rasos (Cambissolos e Neossolos Litólicos) e profundos (Latosolos Arenosos e Neossolos Quartzarênicos) é decorrente da posição, no relevo, nas adjacências de morros e de morrotes areníticos ou nas colinas arenosas, respectivamente; 3) solos rasos a bem desenvolvidos, em colinas de rochas vulcânicas, em que Cambissolos ou Neossolos Litólicos tendem a ocorrer, no topo das colinas e nos morros vulcânicos, enquanto Latossolos Argilosos e Argissolos ocupam as vertentes; e 4) solos hidromórficos, posicionados nas várzeas do rio Ibicuí e afluentes, representado por Planossolos Arenosos.

Em um estudo mais recente, na Bacia Hidrográfica do Miracatu, no detalhamento de perfis de solo em áreas afetadas por arenização, Binda (2016)

identificou a ocorrência desse processo em um tipo específico de solo arenoso, chamado, anteriormente, de Areias Quartzosas (AZEVEDO; KAMINSKI, 1995; KLAMT; SCHNEIDER, 1995) e, mais recentemente, de Neossolos Quartzarênico Órticos (STRECK *et al.*, 2008; SCOPEL *et al.*, 2012). Esses solos não se encontram cartografados em detalhe. No mapeamento utilizado (Figura 14), por exemplo, estão agrupados com Latossolos ou Argissolos (classificados, outrora, como Podzólicos) de textura arenosa ou franco-arenosa (AZEVEDO; KAMINSKI, 1995; STRECK *et al.*, 2008; MEDEIROS *et al.*, 2013).

Trata-se de solos derivados de intemperismo e de posterior pedogênese de arenitos eólicos, da Formação Botucatu, ou fluviais, da Formação Guarά (KLAMT; SCHNEIDER, 1995; SCOPEL *et al.*, 2012). Por isso, são essencialmente arenosos, com predomínio das frações areia média e, principalmente, da areia fina (SCOPEL *et al.*, 2012) com reduzidos percentuais de argila (6 a 12%) e de matéria orgânica (0,1 a 0,7%) (AZEVEDO; KAMINSKI, 1995).

A presença de óxido de ferro é responsável pelo tom vermelho ou amarelo-avermelhado desses solos (SCOPEL *et al.*, 2012). Devido à textura e à porosidade total, na casa dos 40%, apresentam-se muito bem drenados, com reduzida retenção de umidade, o que, por si, condiciona excessiva lixiviação (KLAMT; SCHNEIDER, 1995; AZEVEDO; KAMINSKI, 1995; SCOPEL *et al.*, 2012). Essas características impõem alta fragilidade a esses solos, determinada por "[...] forte limitação natural quanto à fertilidade e alta suscetibilidade à erosão, devido à pobreza de bases no material do qual se originaram e em razão de sua granulometria grosseira" (AZEVEDO; KAMINSKI, 1995).

Entretanto, as adições de material argiloso alóctone parecem, em certas circunstâncias, enriquecer esses solos arenosos, ao ponto de permitir classificá-los como Argissolos ou Cambissolos (KLAMT; SCHNEIDER, 1995; MEDEIROS *et al.*, 2013). Sobre esse aspecto, Medeiros *et al.* (2013), ao analisar três perfis pedológicos desenvolvidos sobre arenitos (quartzo-arenito) da Formação Guarά, identificaram um aumento do teor de argila, nos horizontes subsuperficiais dos solos, bem como a presença de óxido de ferro (ilmenita), que, definitivamente, não eram provenientes da rocha matriz. Entretanto, esses materiais parecem ter sua origem, a partir da decomposição do substrato vulcânico da Formação Serra Geral, em que são relativamente abundantes. Mesmo assim, relatam os autores, que, por apresentar

horizontes superficiais arenosos, esses solos são, também, extremamente frágeis aos processos erosivos (MEDEIROS *et al.*, 2013).

Vieira (2018), realizou uma amostragem pontual em um imóvel rural na Bacia Hidrográfica do Arroio Miracatu, nas proximidades do curso de água Sanga da Areia. Segundo a autora, o imóvel rural está assentado sobre um pacote sedimentar classificado como Latossolo Vermelho distrófico Órtico de acordo com Streck *et al.*, 2008. Em campo, no entanto, verificou-se a baixa pedogênese, perfis profundos sem a distinção de horizontes diagnósticos, fração textural composta predominantemente por areia média e fina, material com coloração avermelhada, afloramento de rochas e concreções ferruginosas, tanto a montante quanto a jusante da propriedade. Estas características estão alinhadas a trabalhos precedentes que classificam o solo nesta localidade como um enclave de Neossolo Quartzarênico distrófico Órtico (RQ). As análises realizadas revelaram elevadas taxas de acidez ativa e potencial, baixos teores de macronutrientes do solo e baixos teores de matéria orgânica, conferindo a estes, suscetibilidade a erosão (Vieira, 2018).

5.3 ASSOCIAÇÕES LITO-MORFOLÓGICAS, NA ESTRUTURAÇÃO DA BACIA

O perfil de elevação com sobreposição do mapeamento geológico da área possibilitou identificar discordâncias altimétricas, em relação à posição estratigráfica das unidades (Figura 13 e Figura 15). O perfil do transecto A-B sobre a Bacia Hidrográfica do Arroio Miracatu exhibe a Formação Botucatu em cota acima de 200 m, por vezes igualada, altimetricamente, às rochas vulcânicas da Fácies Gramado. Também a Formação Guará, a oeste da bacia, ocorre em cotas superiores às da Formação Botucatu, igualando-se, do ponto de vista altimétrico, com a Fácies Gramado, ao atingir 221 m.

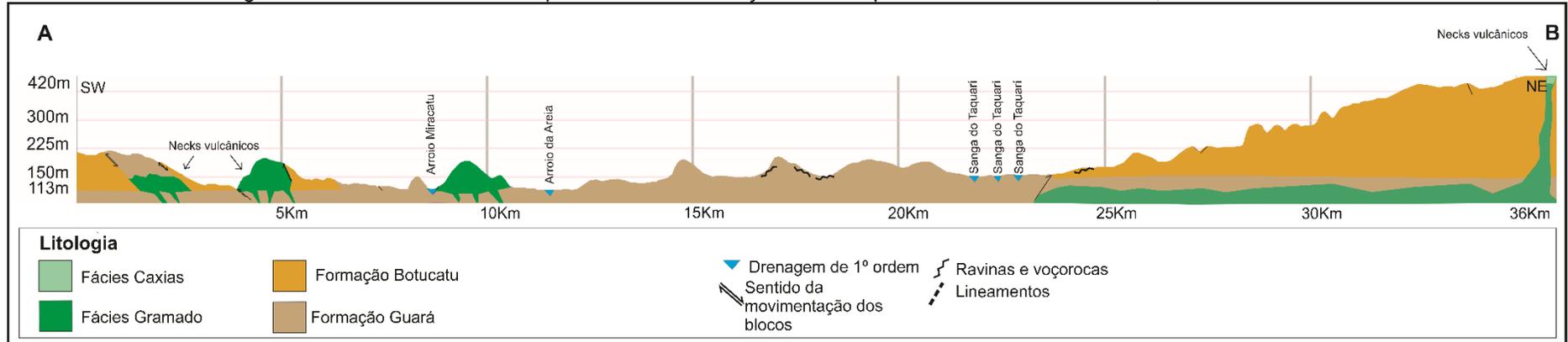
De sudoeste para nordeste, nota-se, entre 0 e 4 km, o soerguimento da Formação Guará, em meio à Botucatu, o que pode estar relacionado à presença de um *neck* vulcânico, como aqueles que afloram entre 4 e 11 km, já observados por Verdum (1997), na área da bacia. Entre 4 e 11 km, ocorrem, portanto, afloramentos, na forma de *necks* vulcânicos, que são intrusivos, entre os pacotes sedimentares das

formações Guará e Botucatu. A camada do arenito Botucatu, totalmente erodida, faz com que aflore, atualmente, a Formação Guará, do 11 km ao 23 km.

Do 23 km ao 35 km, aflora a Formação Botucatu, elevado tectonicamente e que se encontra na extremidade nordeste da bacia, com as rochas vulcânicas da Fácies Caxias (Figura 15). Assim, se observa, no perfil esquemático de elevação, as litologias em posição estratigraficamente inferior aos derrames vulcânicos, mas que afloram em altitudes semelhantes, provavelmente, devido à movimentação tectônica e à posterior erosão diferencial.

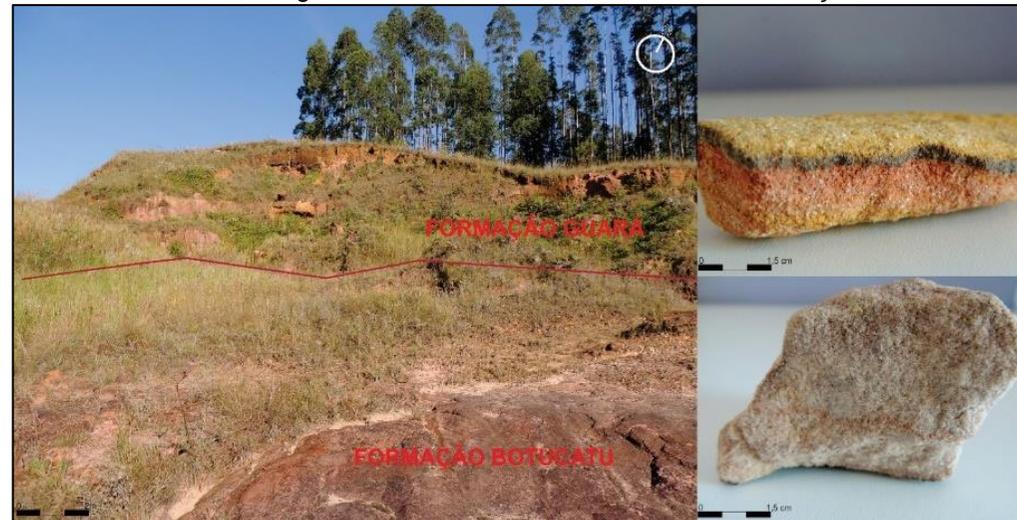
Esta evidência tectônica foi, também, identificada em campo, na Bacia Hidrográfica do Arroio Araçá, limítrofe à bacia em estudo, na latitude 29°34'45.07"S, longitude 55°16'10.52"O. Às margens da rodovia BR 377, foi constatado o afloramento de um bloco da Formação Guará em cota altimétrica superior (128 m) à do bloco da Formação Botucatu (123 m), cuja falha é do tipo normal e que segue a direção principal N 40° E (Figura 16).

Figura 15 – Perfil esquemático representativo do modelo de evolução tectônica proposto para a seção A-B (Sudoeste/Nordeste), a partir do mapeamento das unidades litológicas e dos lineamentos sobrepostos e de observações de campo. Bacia do Arroio Miracatu, sudoeste do Rio Grande do Sul



Fonte: elaboração técnica e interpretativa de Juliana Dummer e Roberto Verdum (2019)

Figura 16 – Afloramento de rochas da Formação Botucatu (primeiro plano), sotaposto ao bloco da Formação Guará (segundo plano). Respectivamente, ao lado, imagem em detalhe de amostras de cada formação



Fonte: acervo pessoal de Juliana Dummer (2016)

Carraro *et al.* (1974) identificam, regionalmente, movimentações semelhantes da crosta, associadas à morfoestrutura e por eles denominada de Domo do Itu. Para esses autores, a origem da estrutura dômica do Itu está associada à intrusão de um corpo ígneo, provavelmente, um lacólito², relacionado aos eventos que culminaram na extrusão das lavas da Formação Serra Geral. A Figura 17 ilustra a localização destas estruturas. A linha E-F delimita, à nordeste, o grande alçamento estrutural de direção geral sudeste-noroeste, relatada como Domo do Itu por Carraro *et al.* (1974). Uma feição tipo *horst*, com direção geral norte-sul, delimitada por duas linhas imaginárias A-B, Nhuporã-Alegrete, no lado oeste, e C-D, Rosário do Sul-Santiago, no lado leste, denominada de Muro de Manuel Viana (Carraro *et al.*, 1972).

Nas margens leste e oeste do “muro”, em escala maior, as encostas se alinham, ora para N 40°-50°E, ora para N 40°-50°W, reflexo provável de reativações do “padrão regmático mundial” de Bagdley (1965). O conjunto desses serrilhamentos, no entanto, mostra um eixo geral de alçamento nitidamente N-S.

Segundo Trainini (2005), no seio da estrutura, denominada “Muro de Manoel Viana”, os sedimentos eólicos da Formação Botucatu estão alçados a cotas acima de 300 m. Segundo o mesmo autor, a leste da linha CD, próximo da cidade de Ernesto Alves, o topo da Formação Botucatu acha-se na cota de 160 m. Para oeste da linha AB, as rochas vulcânicas, da Formação Serra Geral, que encobrem, estratigraficamente, a Formação Botucatu, afloram em cotas próximas de 100 m, indicando uma provável inclinação do muro para leste, fato verificado, no perfil altimétrico exposto, no qual as rochas vulcânicas da Fácies Gramado afloram, na cota de 110 m (Figura 17).

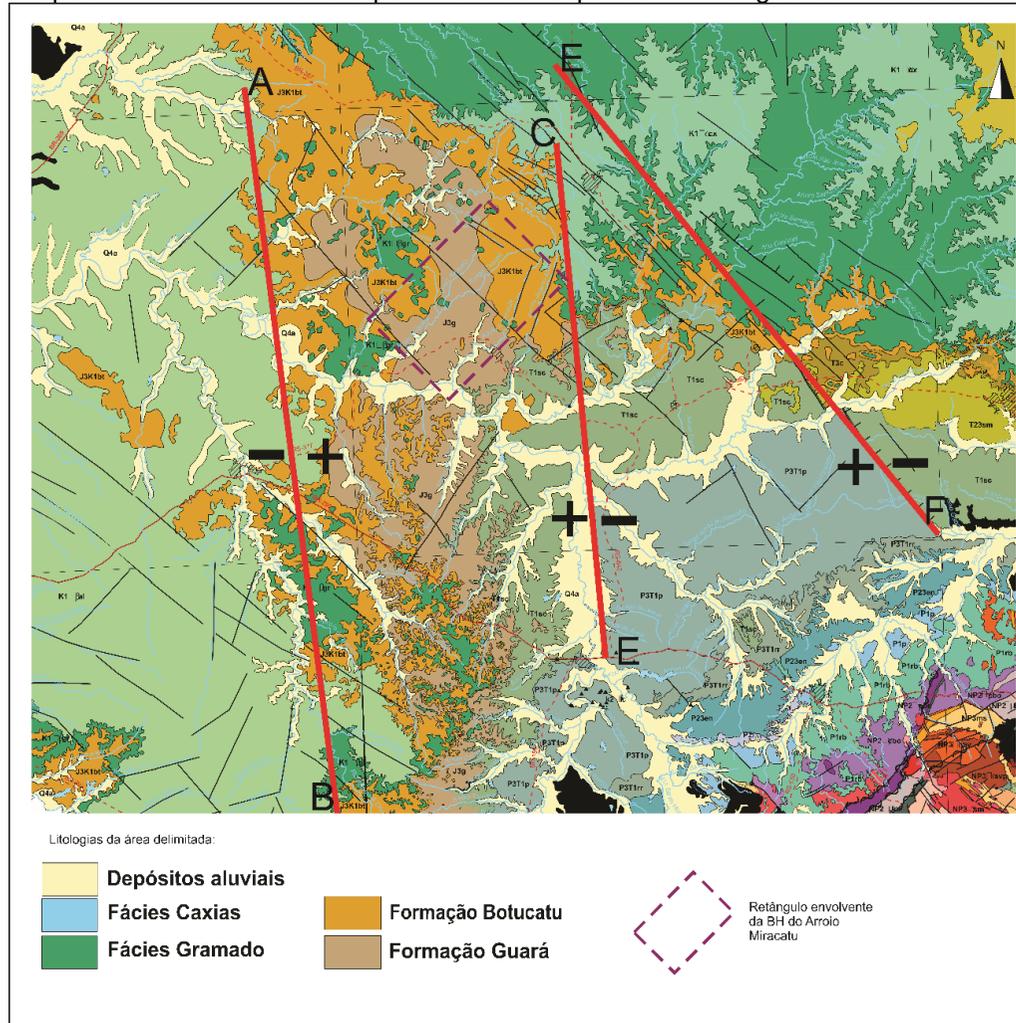
Com esse soerguimento regional, se observa uma nova reestruturação do padrão de drenagem, cujos processos hídricos, por meio da abertura de ravinamentos, são responsáveis pela gênese de algumas das manchas arenosas (areais). A ação hídrica, como parte dos processos erosivos, começa, então, a retrabalhar os sedimentos erodidos da Formação Guará e, não somente, da Formação Botucatu, como antes se propunha, como interpretação da gênese dos areais, na área de estudo (GUASSELLI *et al.*, 2010). A concentração da maioria das zonas arenizadas

² Massa de rocha ígnea que, ao se introduzir no seio de uma formação de origem sedimentar, provoca a deformação de origem sedimentar, provoca a deformação de estratos suprajacentes [Pela erosão, o lacólito é posto a aflorar, dando a aparência de um lago de pedra, derivando daí o seu nome].

do sudoeste do Estado ocorre dentro dos limites do “muro”, como já apontado por Trainini (2005), em estudo, na Bacia Hidrográfica do Arroio Itu.

Assim, ao se analisar a morfologia das feições arenosas da Bacia Hidrográfica do Arroio Miracatu, “interior do muro”, vê-se que os topos dos Cerros são constituídos por arenitos eólicos da Formação Botucatu e possuem vertentes convexas, demonstrando um estágio avançado de erosão, ao passo que os sedimentos subjacentes, da formação Guará, mostram vertentes retilíneas a côncavas, o que sugere uma retomada da erosão, devido ao novo nível de base, determinado pelo alçamento tectônico, como se observa, na Figura 18.

Figura 17 – Recorte do Mapa Geológico do Estado do Rio Grande do Sul, 1:750.000 (WILDNER *et al.*, 2005). A linha EF delimita, à nordeste, o Domo de Itu (Carraro *et al.*, 1972). As linhas AB e CD delimitam o Muro de Manoel Viana, alçado pela neotectônica. Os sinais + e – indicam blocos alto e baixo, respectivamente. A linha roxa pontilhada corresponde ao retângulo da área de estudo



Fonte: Trainini (1990)

Figura 18 – Cerro com topo de mesa, constituído pela Formação Botucatu, com vertente convexa (linha pontilhada vermelha). A linha preta indica o limite das Unidades, estando, à subjacente, a Formação Guará, com vertente retilínea e côncava (linhas pontilhadas amarelas), seguida do areal associado à ravinamento e a voçorocamento. Bacia Hidrográfica do Arroio Miracatu, Município de São Francisco de Assis



Fonte: acervo pessoal de Juliana Dummer (2016)

5.4 A INFLUÊNCIA DA TECTÔNICA, NOS ASPECTOS MORFOMÉTRICOS DA BACIA

A distribuição espacial e altimétrica das litologias, no relevo, sugere evidências de controle tectônico. Estas evidências, por sua vez, se refletem, também, na morfologia da drenagem (ALVES, 2015). Sendo assim, a análise das propriedades da drenagem e dos parâmetros morfométricos se constitui em elemento importante, para analisar a influência da tectônica, na paisagem atual e no entendimento da gênese dos processos erosivos, na bacia.

A Bacia Hidrográfica do Arroio Miracatu, de posicionamento de NE-SW, drena uma área de 61.584 ha. (Figura 20). O canal principal possui característica erosiva, nos primeiros 27 km, trecho em que disseca a borda do planalto. Em seu baixo curso, a bacia se caracteriza pela menor densidade de canais sobre os sedimentos mesozoicos, relacionada à sequência da Bacia Sedimentar do Paraná e sobre os depósitos aluviais recentes Quaternários da planície do Miracatu. Nesse trecho, a bacia se caracteriza por um único canal principal, bem demarcado, na forma de um vale alinhado, de direção NE-SW. Sua largura inicia-se com cerca de 22 m e termina,

na foz, com aproximadamente 130 m, apresentando desnível médio da ordem de 0,6%.

Em seus trechos superior e médio, a bacia apresenta maior densidade de drenagem, relacionada às rochas vulcânicas que estão seccinadas. Nesse caso, os padrões dendrítico e subdendrítico resultam da impermeabilidade das rochas ígneas, e o padrão paralelo, em alguns setores, da conformação da drenagem às estruturas tectônicas, principalmente aos relevos orientados pelas direções dos lineamentos mapeados (NE-SW).

Identifica-se um *trend* NE-SW, que controla as feições erosivas da primeira metade da bacia, formando vales incisivos, ao longo desta direção. No trecho inferior, o Arroio Miracatu e seus afluentes demonstram estar embutidos em uma área deprimida, em processo de agradação. No trecho médio do curso do Arroio Miracatu identifica-se a diminuição da densidade dos canais, o que se dá em função da maior permeabilidade do substrato, que se constitui de arenitos da Formação Botucatu, da Formação Guará e de depósitos aluviais recentes Quaternários.

Quanto ao índice de circularidade, o cálculo obtido foi de 0,4, que é característico de bacias com formatos mais alongados, condição que indica que há maior eficiência, na retenção dos fluxos hídricos. Neste sentido, a dinâmica hidrológica se caracteriza pelo fato de que as chuvas que se precipitam, na bacia, têm um percurso prolongado, até chegarem ao seu exutório, na confluência com o rio Ibicuí.

Em relação à sinuosidade da drenagem, os canais fluviais de maior sinuosidade foram identificados, sobretudo, no trecho superior do Arroio Miracatu e seus tributários. No trecho médio, há uma maior angularidade, nas áreas de confluência entre os tributários e o Arroio Miracatu (Figura 19). No trecho inferior, o curso principal apresenta uma tendência de retilinidade, que se relaciona com os lineamentos estruturais. Estes tendem a exercer influência sobre a morfologia dos canais, que reduzem seus valores de sinuosidade, ao atravessarem as zonas de falhas.

Considerando o Índice de Sinuosidade (IS) para a extensão total do Arroio Miracatu, foi obtido o valor de 1,4, o que, segundo a classificação proposta de Dury (1966), citado por Christofolletti (1980), é considerada sinuosidade de um canal reto. De acordo com Keller e Pinter (1996), este resultado é compatível com áreas soerguidas. Segundo estes autores, ocorre, em geral, um aumento de sinuosidade

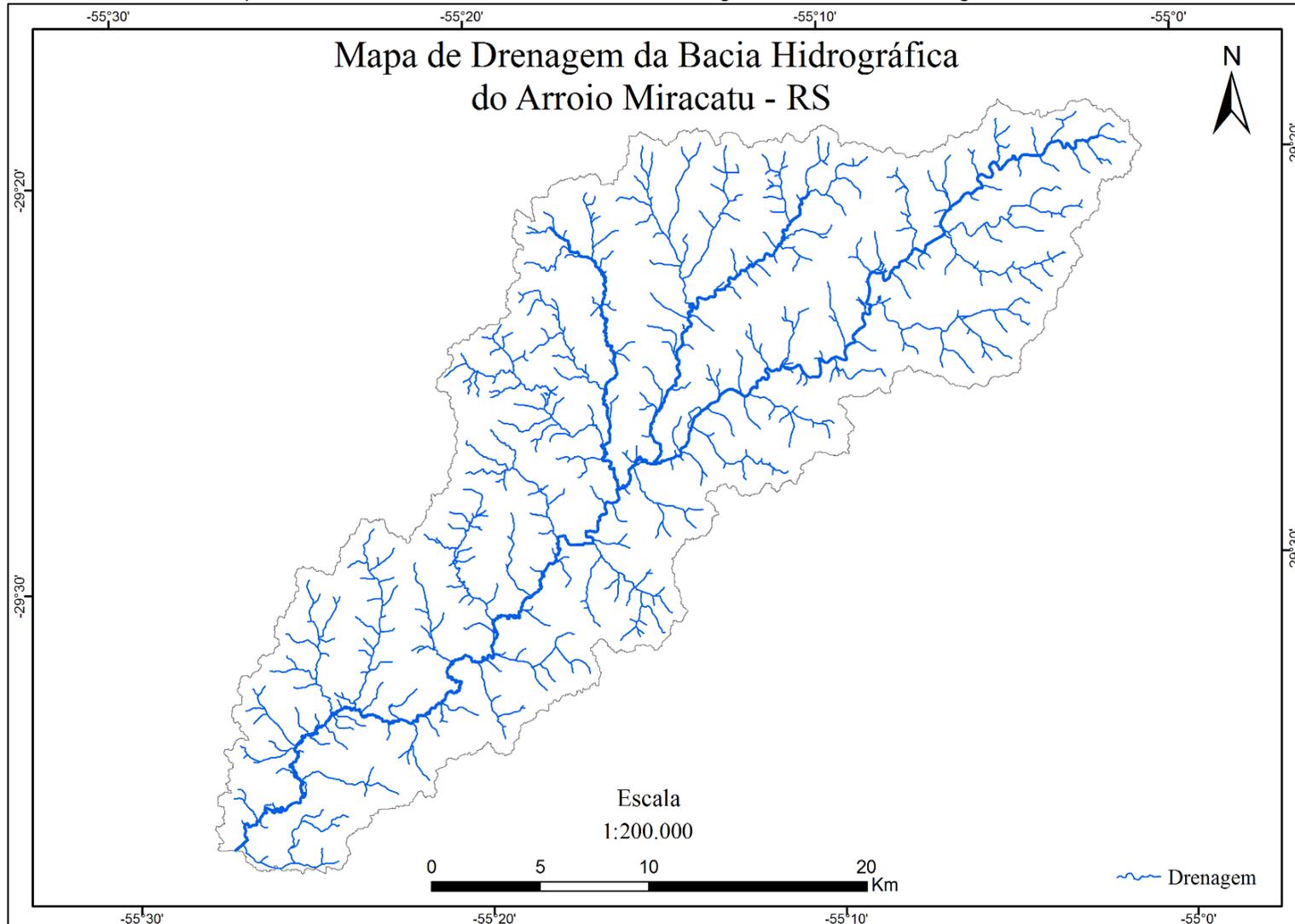
dos canais fluviais em áreas rebaixadas e tectonicamente ativas, enquanto áreas soerguidas tendem a ter canais com sinuosidades menores.

O valor obtido para o Fator de Assimetria da Bacia de Drenagem (FABD) foi de 62,66, uma assimetria de média a alta (KELLER; PINTER, 2002), o que sugere basculamento para a direita, no sentido NE, revelando uma influência tectônica. Ressalta-se que, desta forma, o FABD não deve ser utilizado como único parâmetro de análise, pois este, por ser um parâmetro que analisa a bacia em sua totalidade, atenua alterações não uniformes, ao longo de toda a bacia.

Desta forma, com a utilização do Fator de Simetria Topográfica Transversal (FSTT), tornou-se mais claro e evidente o comportamento morfológico diferenciado da bacia. Na mensuração do FSTT, foram determinadas 11 seções, da nascente à foz do Arroio Miracatu, cujas localizações espaciais e valores estão expostos, na Figura 20 e no Quadro 2, respectivamente. Os pontos de assimetria, mais elevados, aparecem, a partir de 16 km da nascente, até a porção central da bacia (à 28 km da nascente), no perímetro da bacia, no qual os depósitos fluviais da Formação Guará estão alçados em cotas de 260 metros. Este setor da bacia demonstra um basculamento e uma captura de drenagem, entre a Sanga Passo da Areia e o Arroio Miracatu (trecho Sanga do Taquari) e, portanto, o deslocamento deste para a margem esquerda da bacia.

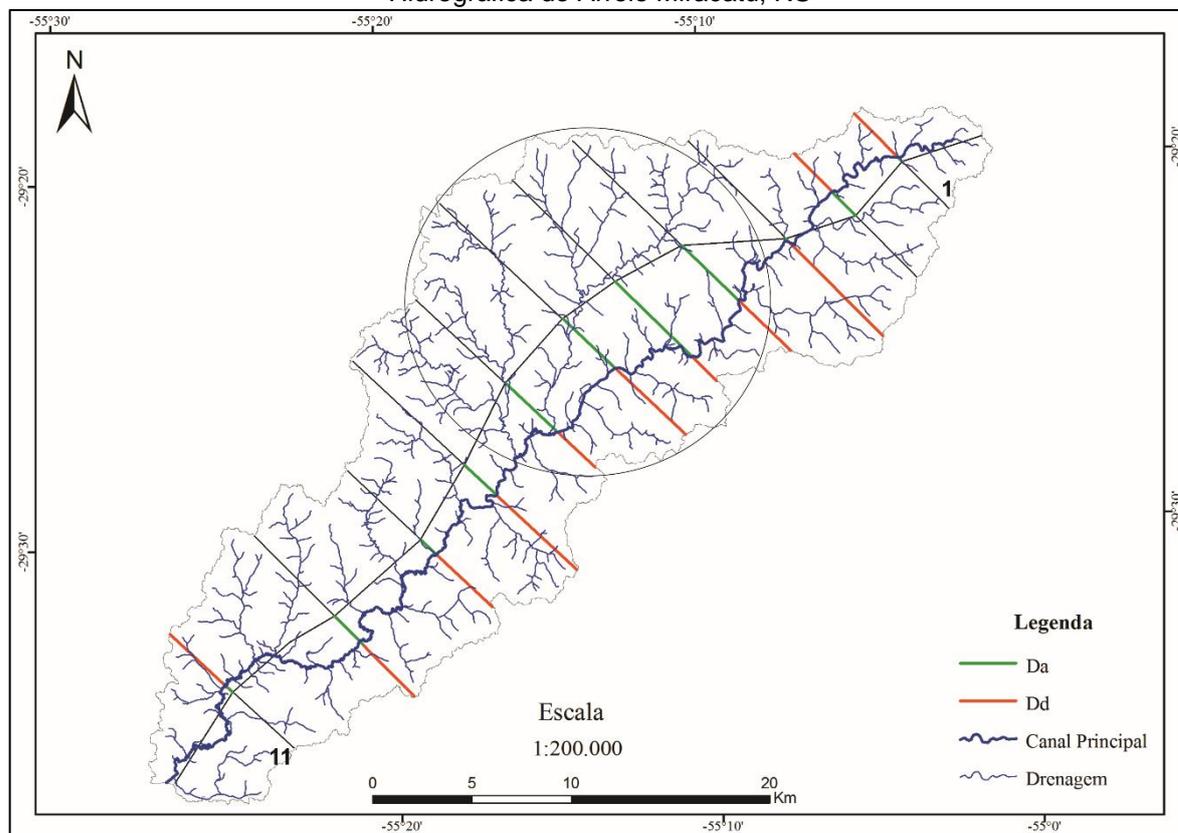
Na maioria dos pontos, entretanto, os valores são significativamente inferiores a 0,5, com muitas marcações abaixo de 0,2. O valor demasiadamente alto da seção 5 pode ser explicado pela aproximação das cabeceiras com o estreitamento dos divisores d'água, o que superestima o resultado, pela pequena distância relativa entre as duas medidas. Ponderando que a média dos valores mensurados é 0,3, verifica-se uma distribuição relativamente dispersa dos valores, decorrentes das reorientações que o Arroio Miracatu assume, em função do controle tectônico a que está submetido.

Figura 19 – Rede de drenagem da área de estudo, extraída automaticamente do modelo digital de elevação da SRTM (resolução redefinida de 30 metros) e, posteriormente, editada manualmente, sob imagens de satélite do Google Earth®



Fonte: editado de SRTM - TOPODATA, com elaboração técnica de Juliana Dummer e de Neemias Lopes (2018)

Figura 20 – Localização das seções transversais, utilizadas para o cálculo de Fator de Simetria Topográfica Transversal (FSTT). Área de ocorrência de assimetria elevada (círculo). Bacia Hidrográfica do Arroio Miracatu, RS



Fonte: Banco de dados *Spring*®, com elaboração técnica de Juliana Dummer e de Neemias Lopes (2018)

Quadro 1 – Valores do Fator de Simetria Topográfica Transversal (FSTT) obtidos para o Arroio Miracatu

Seção	Distância da Nascente (km)	Valores de FSTT
1	4,20	0,087
2	7,90	0,388
3	11,5	0,026
4	16,8	0,519
5	20,6	0,758
6	23,9	0,425
7	28,3	0,591
8	33,0	0,283
9	37,3	0,218
10	43,0	0,357
11	49,5	0,069

Fonte: Banco de dados *Spring*®, com elaboração técnica de Juliana Dummer e de Neemias Lopes (2018)

A Relação Declividade X Extensão (RDE) foi mais um parâmetro que permitiu avaliar a dimensão morfoestrutural, associada aos movimentos tectônicos pretéritos, na bacia. Levando em conta que são cursos de água pouco extensos, neste estudo não foram considerados os valores de RDEs de todo o trecho, mas apenas os RDEs totais do segmento 1, afluente do Arroio Miracatu; do segmento 2, Sanga Passo da Areia; e do curso principal da bacia, o Arroio Miracatu. Vale ressaltar que foram levados em conta os valores sugeridos por Seeber e Gornitz (1983), que identificam índices abaixo de 2, como sendo um gradiente ideal, ou seja, o curso de água encontra-se próximo ao estado de 'equilíbrio'; os índices entre 2 e 10 se configuram como anomalias de 2ª ordem; e valores acima de 10 se configuram como anomalias de 1ª ordem, que representam, no terreno, a influência de forte controle estrutural.

De acordo com os valores expressos, no Quadro 2, os três cursos analisados apresentam valores > 6 , que correspondem a anomalias de 1ª ordem, com significativa influência de controle estrutural. O valor significativamente elevado de 25,30, para o RDE total, ocorreu no Arroio Miracatu, curso principal e mais extenso, que percorre a bacia, no quadrante NE-SW.

Assim, ao integrar os perfis longitudinais, e seus respectivos RDEs totais, as informações geológicas disponibilizadas pela CPRM (2006) e aquelas obtidas pelos estudos das drenagens e das estruturas (lineamentos), pode-se afirmar, quanto à existência de movimentações positivas e negativas, ao longo do canal fluvial, sendo relacionadas às influências de controles litológicos e/ou estruturais. As três drenagens percorrem em suas maiores extensões, os relevos, cuja litologia corresponde à da Formação Guará, apresentando uma mínima variação de litologia. Tal fato leva a considerar que o controle seja, sobretudo, estrutural, ligado à presença de falhas e de diques.

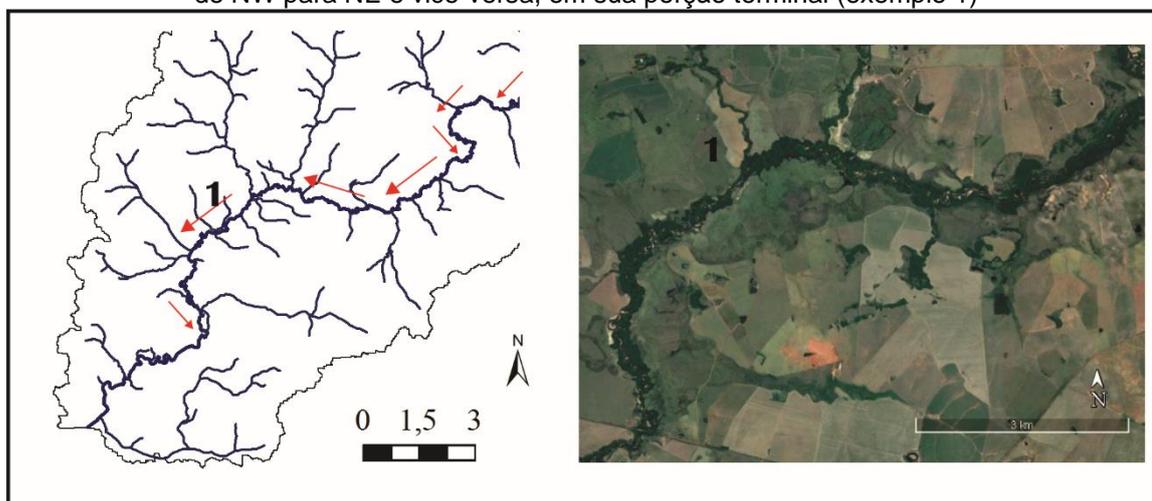
Quadro 2 – Relação Declividade-Extensão total (RDE total) para drenagens selecionadas da bacia do Arroio Miracatu

Drenagem	RDE total
Afluente do Miracatu	9,47
Arroio Passo da Areia	15,69
Arroio Miracatu	25,30

Fonte: Banco de dados *Spring*®, com elaboração técnica de Juliana Dummer e de Neemias Lopes (2018)

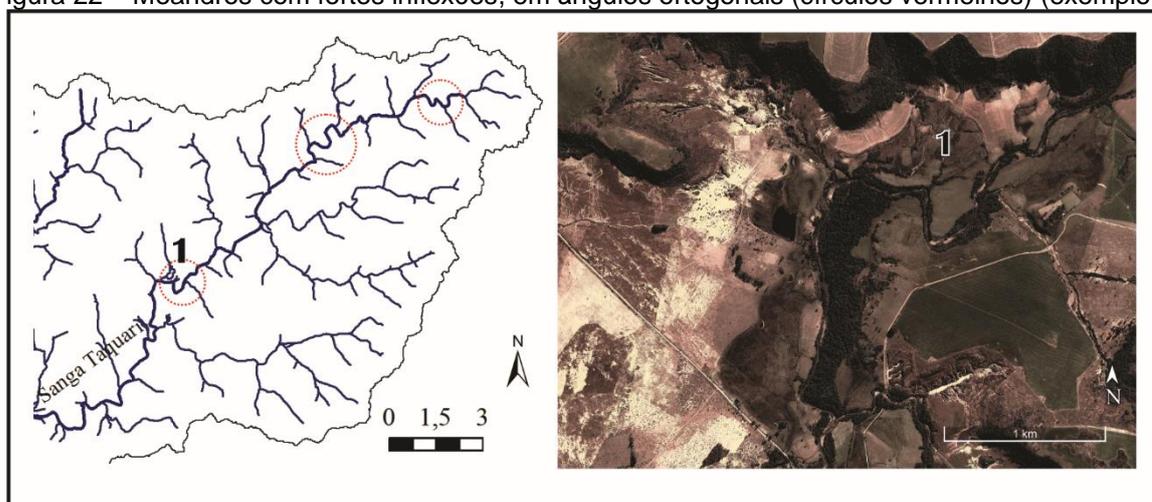
Na análise das anomalias de drenagem, a principal anomalia registrada, no Arroio Miracatu, ocorre em sua porção final, trecho inferior, em que ocorrem inflexões em ângulos quase retos, de NW para NE (Figura 21). Embora também tenham um padrão regional de escoamento de direção NE-SW, os canais de drenagem apresentam várias mudanças bruscas de direcionamento em seus segmentos locais, em relação ao curso principal. Como exemplo disto, foram registrados meandros isolados, que se repetem, ao longo do Arroio Miracatu, e sugerem anomalias locais configuradas por inflexões em ângulos ortogonais de direção, em geral, L-W (círculos vermelhos, na Figura 22).

Figura 21 – Detalhe de anomalias de drenagem, no curso principal do Arroio Miracatu. Fortes inflexões, em ângulo quase reto (setas vermelhas), causando redirecionamentos de curso do arroio, de NW para NE e vice-versa, em sua porção terminal (exemplo 1)



Fonte: editado de SRTM-TOPODATA e Google Earth®, com elaboração de Juliana Dummer (2016)

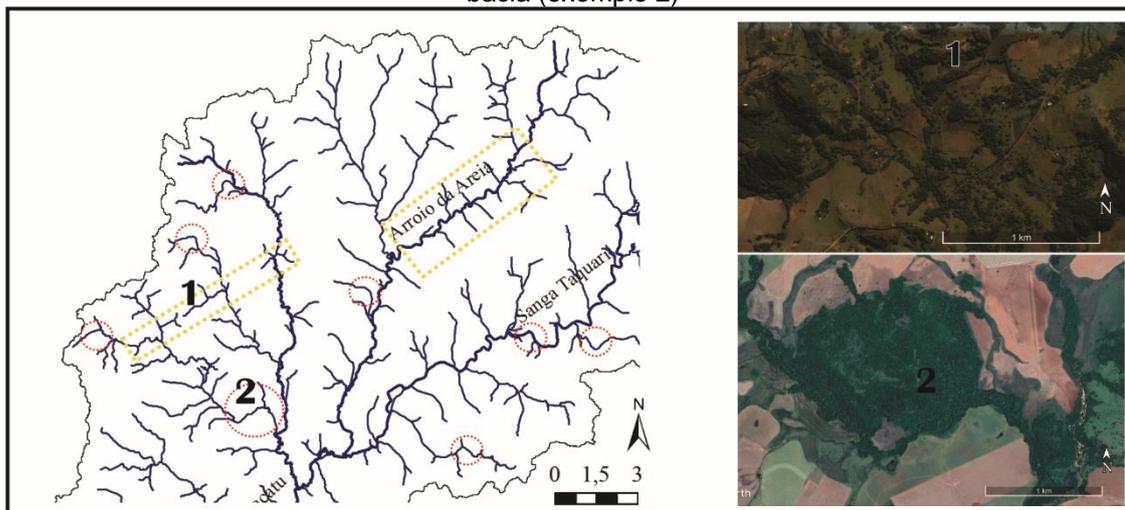
Figura 22 – Meandros com fortes inflexões, em ângulos ortogonais (círculos vermelhos) (exemplo 1)



Fonte: editado de SRTM-TOPODATA e Google Earth®, com elaboração de Juliana Dummer (2016)

Alguns tributários do Arroio Miracatu apresentam anomalias de drenagem com inflexões em ângulo ortogonal, de W-E para N-S e de NE-SW para NW-SE (Figura 23).

Figura 23 – Anomalias de drenagem, na porção central do Arroio Miracatu. Presença de drenagem paralela (retângulo amarelo), mesmo que a bacia possua um padrão dendrítico principal (exemplo 1). Detalhe de inflexões em ângulo reto, com junção perfeita em 90° (círculo vermelho), na porção sul da bacia (exemplo 2)



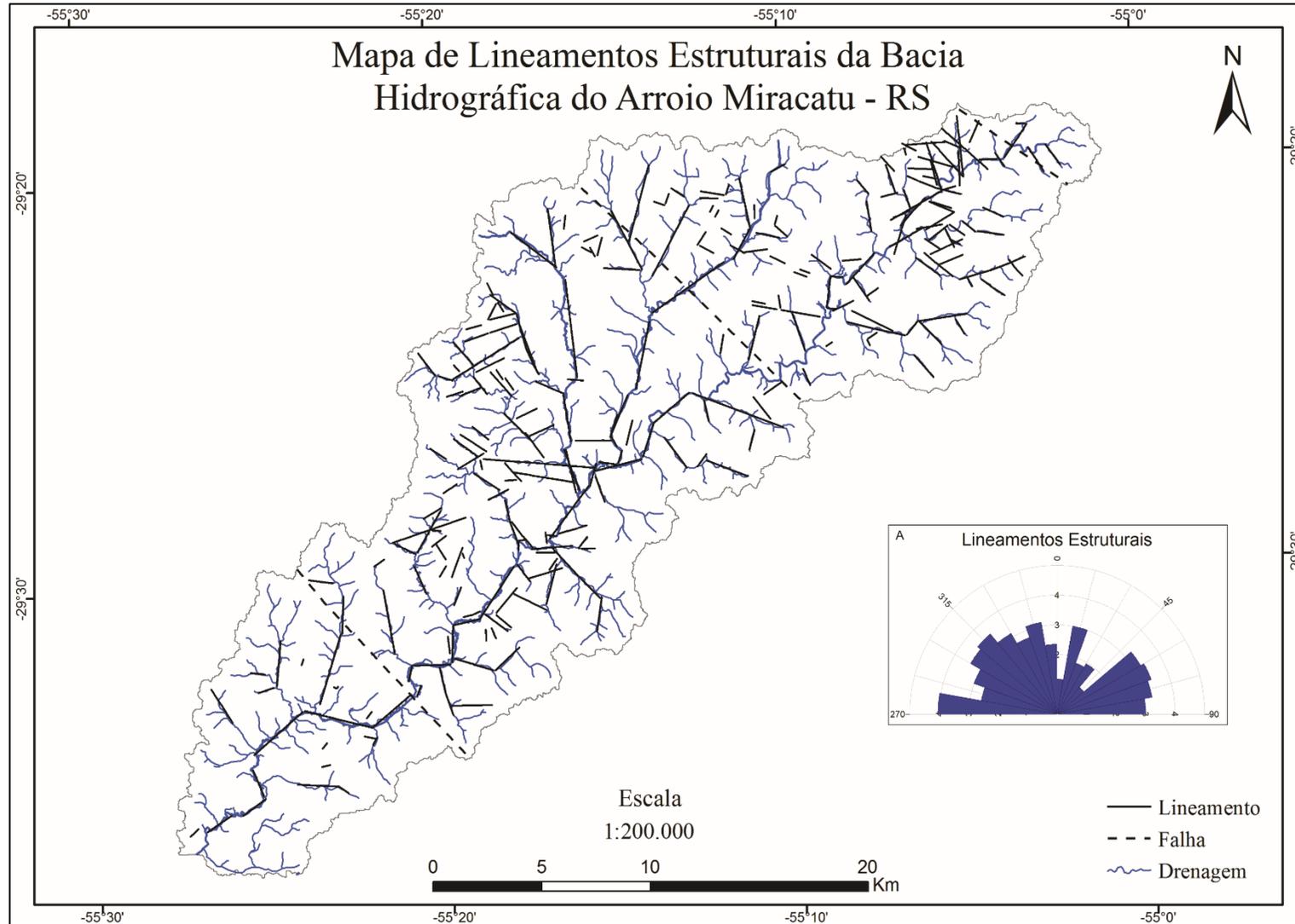
Fonte: editado de SRTM-TOPODATA e Google Earth®, com elaboração de Juliana Dummer (2016)

A análise da rede de drenagem da área de estudo revelou inúmeros canais retilíneos, que se destacam das demais drenagens, definindo lineamentos morfoestruturais. Também o relevo evidenciou feições lineares em cristas e em morros ou, simplesmente, limites de áreas elevadas e rebaixadas.

A análise de tais feições, por meio da associação das técnicas de estereoscopia em fotografias aéreas e de fotointerpretação de imagens de satélite em 3D, permitiu o mapeamento de 383 lineamentos, com comprimentos entre 1.300 e 3.000 m, sendo, o menor, com 196 m e o maior, com 4.000 m. O mapeamento de lineamentos da Bacia do Arroio Miracatu (Figura 24) revelou que estes não ocorrem uniformemente, na totalidade da área. O número de lineamentos morfoestruturais é maior, nos trechos médio e inferior da bacia, em comparação ao trecho superior.

A análise dos dados expressos, no diagrama de roseta, revela lineamentos principais, nas direções NW-SE e NE-SW. As distribuições das suas frequências absolutas indicam os seguintes grupos, em ordem decrescente de importância: N80°-89°W; N40°-50°W; N50°-60°W; N60°-70°E; N48°-60°E; N70°-80°E e N10°-20°W.

Figura 24 – Mapa de Lineamentos estruturais da Bacia Hidrográfica do Arroio Miracatu, RS. (A) Diagrama de roseta de frequência absoluta da orientação dos lineamentos



Fonte: Banco de dados *Spring*®, com elaboração técnica de Juliana Dummer e de Neemias Lopes (2018)

5.5 CONCLUSÃO PARCIAL

A análise de aspectos litológicos e tectônicos associados demonstra indícios do controle, na Bacia Hidrográfica do Arroio Miracatu. Inicialmente, as litologias em posição altimétrica discordante da posição estratigráfica mostram que a movimentação tectônica, que gerou o soerguimento e o rebaixamento de porções da bacia, também está associada a erosões pretéritas e presentes, na área, ao expor formações mesozoicas (Guará) em cotas altimétricas iguais ou próximas das das formações Botucatu e Serra Geral. O soerguimento da Formação Guará, entre a Formação Botucatu, em porções bem delimitadas, na bacia, também se associa à presença de *necks* vulcânicos.

Em seguida, verifica-se que a bacia, como um todo, está compreendida, no interior do Muro de Manuel Viana, em uma estrutura do tipo *horst*, na qual todas as formações litológicas, que caracterizam o contexto estratigráfico, na bacia hidrográfica do Arroio Miracatu, estão alçadas. As rochas vulcânicas da Fácies Gramado, que encobrem estratigraficamente a Formação Botucatu, afloram em cotas que chegam a 110m, demonstrando estar relacionado a uma provável inclinação do muro, de leste para oeste, já indicada, nos estudos de Trainini (2005).

O alçamento tectônico, na área, determinou um novo nível de base, provocando uma reestruturação na drenagem e na retomada da erosão, gerando processos hídricos, por meio da abertura de ravinamentos e de voçorocamentos, já referidos como responsáveis pela gênese da formação dos areais, nessa bacia. Neste sentido, vale salientar, também, que, associado ao contexto litológico das duas formações sedimentares identificadas (Guará e Botucatu) e às evidências da dinâmica tectônica, na bacia, há a presença de solos do tipo Latossolo Vermelho Distrófico, com resistência média aos processos erosivos e que cobre em torno de 77% da sua superfície, sobretudo, nos trechos médio e inferior da bacia.

Quanto às evidências do controle tectônico, na bacia, em relação às propriedades da drenagem, identifica-se o padrão paralelo como sendo o resultado da conformação da drenagem às estruturas tectônicas, principalmente, dos relevos orientados, nas direções dos lineamentos mapeados (NE-SW). Um *trend* NE-SW foi identificado, na primeira metade da bacia. Esta estrutura controla as feições

erosionais, na primeira metade da bacia, formando vales incisos, ao longo desta direção.

Ao analisar a sinuosidade da drenagem, destaca-se que, no trecho inferior do curso principal, há a tendência de sua retificação e que esta tendência se relaciona com os lineamentos estruturais identificados e cartografados. Para a extensão total do Arroio Miracatu, foi obtido o valor de 1,4, isto é, uma sinuosidade baixa, caracterizando um canal reto, compatível com as áreas soerguidas.

A influência da tectônica revelou-se, também, no Fator Assimetria da Bacia de Drenagem (FABD), cujo valor foi de 62,66, isto é, de médio a alto, que sugere um basculamento, no sentido NE. Na mensuração do Fator de Simetria Topográfica Transversal (FSTT), esta influência se mostrou mais evidente, ainda, isto é, no setor da bacia, a partir de 16 km da nascente, até a porção central da bacia (28 km da nascente), perímetro da bacia, no qual os depósitos fluviais da Formação Guará estão alçados em cotas de 260 metros. Este setor da bacia demonstra um basculamento e uma captura de drenagem, entre a Sanga Passo da Areia e o Arroio Miracatu (trecho Sanga do Taquari) e, portanto, o deslocamento deste para a margem esquerda da bacia.

A Relação Declividade X Extensão (RDE) foi mais um parâmetro que permitiu atender aos objetivos do estudo. Os três cursos analisados apresentaram valores > 6 , que correspondem a anomalias de 1ª ordem, indicando uma significativa influência de controle estrutural. O valor significativamente elevado de 25,30 de RDE total ocorreu no curso principal e mais extenso do Arroio Miracatu, que percorre a bacia, no quadrante NE-SW. Ao integrar os perfis longitudinais e seus respectivos RDEs totais, as informações geológicas disponibilizadas pela CPRM (2006) e as obtidas pelos estudos das drenagens e das estruturas (lineamentos), constatou-se que as três drenagens analisadas percorrem, em suas maiores extensões, relevos cuja litologia corresponde à da Formação Guará. A mínima variação de litologia demonstra, sobretudo, um controle estrutural, ligado à presença de falhas e de diques.

Embora a Bacia Hidrográfica do Arroio Miracatu possua um padrão regional de escoamento de direção NE-SW, os canais de drenagem apresentam várias mudanças bruscas de direcionamento em seus segmentos locais, em relação ao curso principal. Como exemplo disto, foram registrados meandros isolados, que se repetem, ao longo

do Arroio Miracatu, e sugerem anomalias locais configuradas por inflexões em ângulos ortogonais, sobretudo, na L-W.

Finalmente, o mapeamento dos canais de drenagem retilíneos, que se destacam das demais drenagens e das feições de relevo lineares, tais como cristas e morros ou, simplesmente, limites de áreas elevadas, resultou em 383 lineamentos morfoestruturais cartografados. Estes ocorrem, em maior parte, nos trechos médio e inferior da bacia, em comparação ao trecho superior, sendo que as direções principais NW-SE e NE-SW confirmam a disposição espacial dessa bacia hidrográfica e da organização de sua rede de drenagem.

6

ASPECTOS LITOLÓGICOS, PEDOLÓGICOS E TECTÔNICOS, ASSOCIADOS AOS PROCESSOS EROSIVOS, NA BACIA HIDROGRÁFICA DO ARROIO MIRACATU

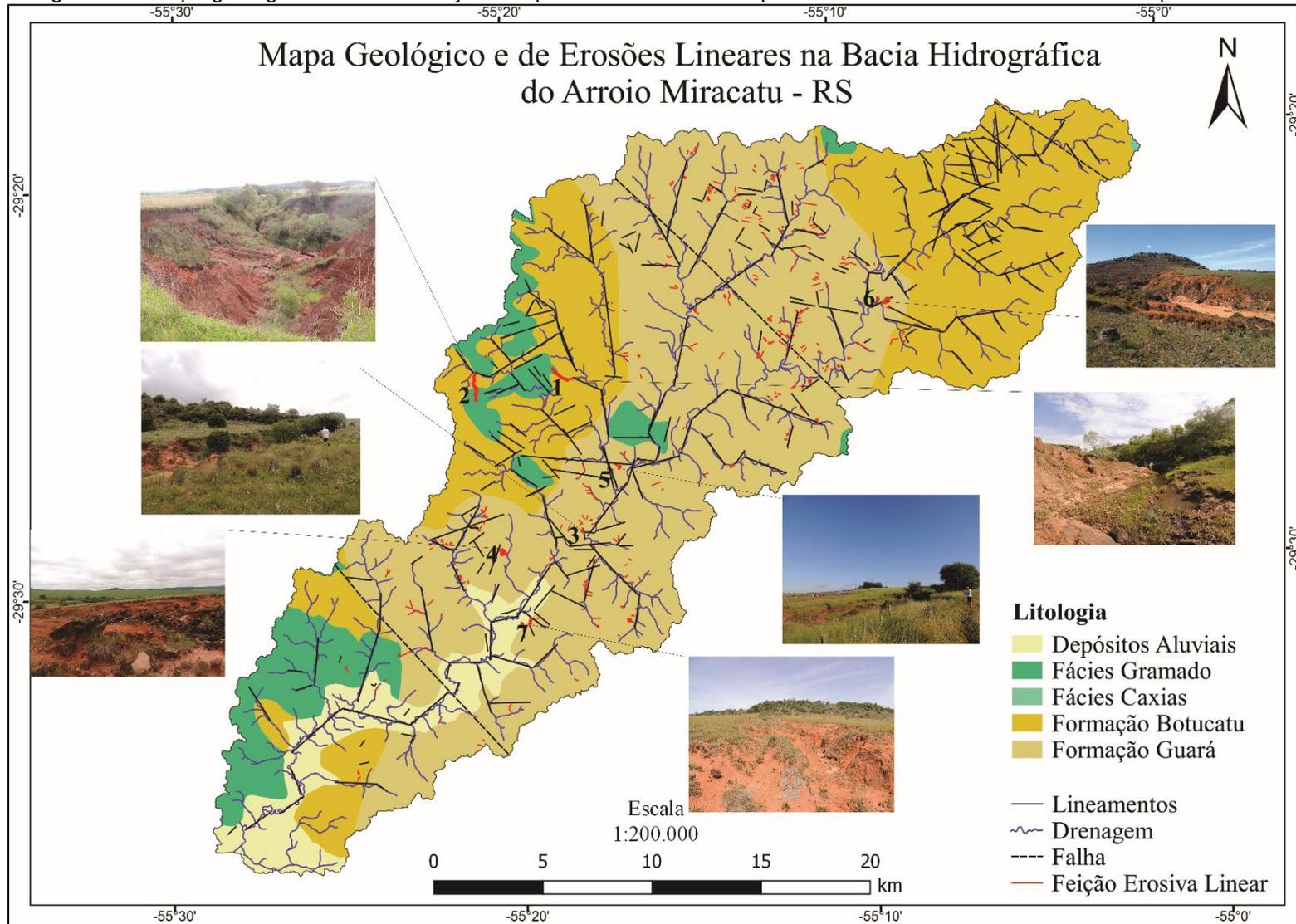
Neste capítulo, são analisados e discutidos os dados provenientes do mapeamento de processos erosivos, obtidos a partir de observações de campo e confrontados com as informações sobre a litologia, a pedologia, a tectônica e as morfoestruturas, na Bacia Hidrográfica do Arroio Miracatu. Sobretudo, é considerada a análise e a discussão de sete casos aferidos em campo, dos quais é apresentada uma descrição detalhada.

A partir da interpretação conjunta de cartas topográficas, de fotografias aéreas e de imagens de satélite do Google Earth®, analisou-se o cenário de degradação dos solos, por processos erosivos lineares, na bacia, especialmente, aqueles em dimensões reconhecíveis, na escala 1:5.000. A análise resultou no mapeamento de 453 processos erosivos lineares, nos quais foi traçado o eixo de desenvolvimento principal do processo erosivo (ravinas e voçorocas). Na Figura 25, é possível visualizar a distribuição espacial das feições erosivas, bem como aquelas das quais foi realizada uma análise detalhada, a ser apresentada a seguir.

Conforme a Figura 26A, os eixos de desenvolvimento principal das erosões lineares mapeadas ocorrem, principalmente, nas direções NW-SE e NE-SW, com concentração maior entre os ângulos $N40^{\circ}-80^{\circ}W$ e $N50^{\circ}-80^{\circ}E$. A maioria das incisões erosivas se caracteriza por estar nas cabeceiras das drenagens ou conectadas a estas. A maior densidade de feições erosivas está na porção média-superior da bacia, cuja litologia corresponde à da Formação Guará (Figura 25 e Figura 26) e aos solos do tipo Latossolo Vermelho, conforme escala de mapeamento disponível.

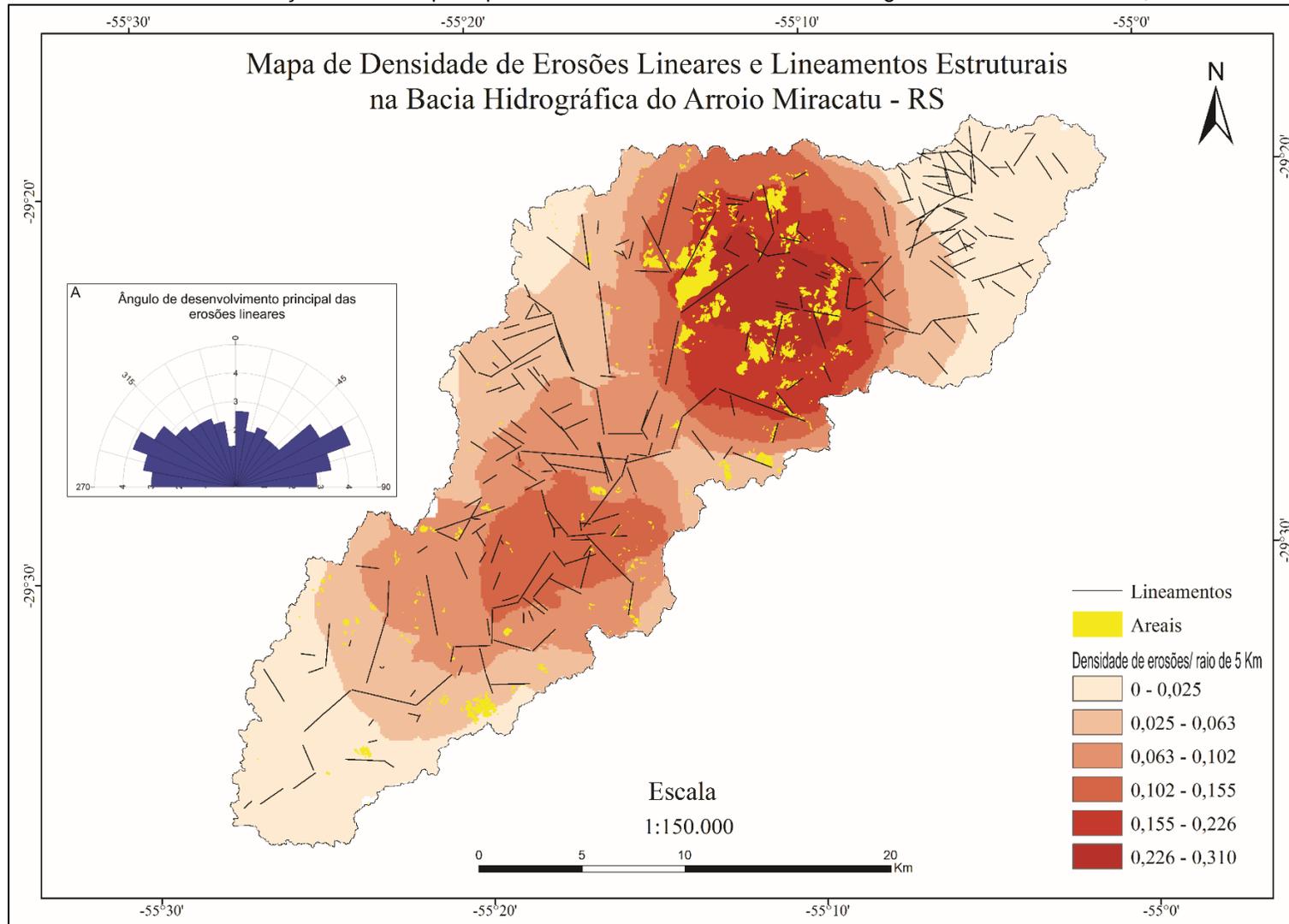
Cabe destacar que a área de maior concentração de processos erosivos lineares é, também, a de maior concentração de areais. Estas áreas caracterizam-se pela ocorrência, além dos Latossolos Vermelhos, cartografados, na escala de 1:750.000, de Neossolos Quartzarênico Órticos, identificados por Binda (2016), em um detalhamento de perfis de solos. No entanto, devido à ausência de um mapeamento de detalhe, para a bacia em estudo, estão agrupados, nas classes Latossolos ou Argissolos (classificados, outrora, como Podzólicos), de textura arenosa ou franco-arenosa (AZEVEDO; KAMINSKI, 1995; STRECK *et al.*, 2008; MEDEIROS *et al.*, 2013).

Figura 25 – Mapa geológico com a localização dos processos erosivos mapeados na bacia e ravinas selecionadas para estudo



Fonte: Banco de dados *Spring*®, com elaboração técnica de Juliana Dummer e de Neemias Lopes (2018)

Figura 26 – Mapa de densidade de erosões lineares, com sobreposição da localização espacial de lineamentos. (A) Diagrama de roseta da frequência absoluta da direção dos eixos principais de cada erosão linear. Bacia Hidrográfica do Arroio Miracatu, RS



Fonte: Banco de dados *Spring*®, com elaboração técnica de Juliana Dummer e de Neemias Lopes (2018)

A presença de Neossolos Quartzarênicos Órticos denota o meio friável, em seus aspectos pedológicos, submetidos à dinâmica hídrica, na forma de erosão linear (ravinas e voçorocas). Derivados do intemperismo e de posterior pedogênese de arenitos eólicos, da Formação Botucatu, ou fluviais, da Formação Guará (KLAMT; SCHNEIDER, 1995; SCOPEL *et al.*, 2012), constituem-se em solos com alta suscetibilidade à erosão, devido à pobreza de bases, no material do qual se originaram, e em razão de sua granulometria grosseira (AZEVEDO; KAMINSKI, 1995).

Ao analisar a densidade de erosão linear, confrontada com a espacialização dos lineamentos e com os dados dos diagramas de roseta (Figura 25), identifica-se que os ângulos de desenvolvimento principal das feições erosivas são coincidentes com os ângulos dos lineamentos estruturais. É nas áreas de intersecção de lineamentos de médio porte, nas direções NW-SE e NE-SW, que estão as áreas de maior densidade de feições erosivas lineares e, conseqüentemente, de areais. Evidencia-se a forte relação lineamentos - erosão linear (ravinas e voçorocas) - areais. Corroboram com estes dados aqueles obtidos por Frasca (2001), no estudo sobre o controle morfotectônico e morfoestrutural, nos areais do Município de São Francisco de Assis.

No estudo citado, o autor concluiu que as maiores ocorrências de areais se localizam, especificamente, em sítios nos quais há intersecções de lineamentos de pequeno porte, com direções NW-SE e NE-SW. Também, que as maiores manchas de areais têm forma alongada, seja na direção NW-SE, seja na direção NE-SW, com um lado maior, invariavelmente, balizado por um lineamento materializado por um segmento de drenagem, o que demonstra fortes indícios de que o padrão de distribuição dos areais, no município de São Francisco de Assis, é imposto por um controle morfotectônico. Já a forma das manchas individuais, bem como a sua localização específica, demonstrou ser imposta por um controle morfoestrutural, através de lineamentos de pequeno porte, que ocorrem em grande quantidade, na área estudada.

Estas características, juntamente com os dados obtidos por Andrades Filho *et al.* (2006), ao analisar a relação entre ocorrência de areais e o padrão de drenagem, demonstram que há uma predominância, na ocorrência das manchas arenosas, nas drenagens secundárias.

Também ao norte do rio Ibicuí, segundo estes autores, “em torno de 58% dos areas encontram-se nas orientações SW e SE e, ao sul do rio Ibicuí, em torno de 58% dos areas encontram-se nas orientações NE e NW”.

Do total de 453 processos erosivos, foram verificados, em campo, sete deles, conforme a Figura 25. Neste sentido, parte-se para uma análise dos dados obtidos em campo e do confronto destes com os mapeamentos disponíveis para a região, a fim de identificar os tipos de solo e as diferenças faciológicas dos ambientes geológicos em que se desenvolvem, conforme mapeamentos regionais disponíveis. As medidas realizadas em campo, quanto às direções (ângulos) em que se desenvolvem os processos erosivos lineares (ravinas e voçorocas) e a associação destes com os lineamentos extraídos, visaram à análise relacional entre a evolução desses processos erosivos e o controle estrutural.

Foram analisadas as direções das falhas, nas rochas e no entorno dos processos erosivos, conferido se a direção delas coincide com a direção dos lineamentos regionais. Também foi realizada a aferição da inclinação e da direção do acamamento dos estratos das Formações Botucatu e Guará, localizadas abaixo do solo e dos depósitos sedimentares superficiais (formações superficiais), no fundo da erosão linear, e que interfere, no desenvolvimento da erosão lateral (Figura 27).

Figura 27 – Aferição da direção de falhas, no interior de ravinas (esquerda) Aferição da inclinação e direção do acamamento dos estratos da Formação Botucatu e Guará, localizada abaixo do solo e da formação superficial, no fundo da ravina, e que interfere, no desenvolvimento da erosão lateral (direita). Município de Manuel Viana, RS

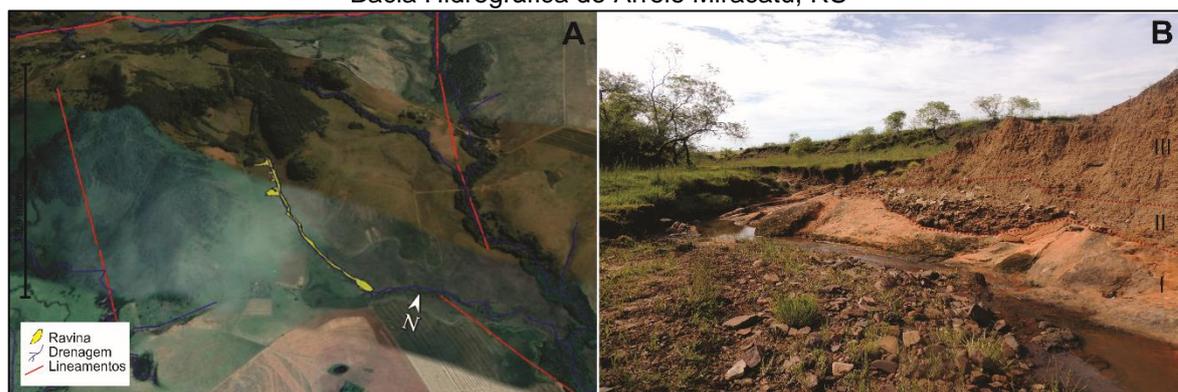


Fonte: acervo pessoal de Juliana Dummer (janeiro de 2017)

A Feição Erosiva 1, localizada pelas coordenadas 29°24'59.79"S, 55°17'36.97"W, está situada na porção média e à oeste na bacia, em cotas altimétricas

que variam entre 130 e 158 metros, na base de uma vertente, cuja inclinação média é de 6% (Figura 28). Trata-se de uma ravina que possui 900 metros de comprimento e está conectada à rede de drenagem.

Figura 28 – (A) Imagem de satélite da Ravina 1 e de seu entorno, como delimitação das drenagens, dos lineamentos e do leito do processo erosivo. (B) Interior do eixo principal de desenvolvimento da ravina 1, com as respectivas camadas delimitadas pela linha pontilhada em vermelho (perfil exposto, à direita). Acúmulo de seixos originários da Formação Serra Geral (II) sobrepostos ao arenito de origem eólica (Formação Botucatu); (I) e sotapostos a depósitos fluviais recentes Quaternários (III);
Bacia Hidrográfica do Arroio Miracatu, RS



Fontes: Google Earth® e acervo pessoal de Juliana Dummer (janeiro de 2017)

De acordo com o mapa de solos da bacia, disponível em Binda (2016), a área de ocorrência da feição erosiva 1, assim como dos demais casos aferidos a campo, é associada aos Latossolos Vermelhos. Este tipo de solo, sobretudo quando possui textura média, com teores elevados de areia, assemelha-se às Areias Quartzosas (AZEVEDO; KAMINSKI, 1995; KLAMT; SCHNEIDER, 1995), mais recentemente, denominados de Neossolos Quartzarênico Órticos (STRECK *et al.*, 2008; SCOPEL *et al.*, 2012). Como já referido, perfis característicos destes solos foram identificados, na Bacia Hidrográfica do Arroio Miracatu, em estudos realizados por Binda (2016).

Apesar de estar inserida em uma área abrangente de solos classificados como Latossolos Vermelhos, no interior da Feição Erosiva 1 também foram identificados solos característicos de depósitos recentes e de formação poligenéticas. A íntima associação de rochas sedimentares, no interior da ravina, e de rochas vulcânicas, no seu entorno, indicam misturas de produtos de alterações diversas, formando solos poligenéticos, que se caracteriza por ser uma gênese múltipla de depósitos, associada à ação diferenciada do clima, no passado e nas condições atuais.

Segundo Robaina *et al.* (2015), em locais em que ocorre a alternância de períodos chuvosos e secos, são importantes as características da natureza

transportada do material de origem, na formação dos solos, provendo deformações superficiais, alteritos, depósitos de vertentes, entre outros, o que, por sua vez, favorece a transferência de matéria e o deslocamento de detritos, ao longo da vertente.

Binda (2016) descreveu um perfil semelhante, nas imediações da Sanga da Areia, em que um depósito rudáceo (linha-de-pedras) recobre o embasamento rochoso da Formação Guará, em contato erosivo discordante. Sobrejacente a esse, se desenvolve um típico Neossolo Quartzarênico Órtico. Este autor atribuiu o acúmulo do material grosseiro, imediatamente acima da rocha, como sendo a expressão de um paleopavimento detrítico, desenvolvido sob condições climáticas secas. Assim, o solo arenoso sotoposto seria derivado dos processos de estepização, sob clima úmido-seco, quando os sedimentos eram mobilizados, tanto pela água quanto pelo vento, depositando camadas laminares de areia. A umidificação recente do clima atual, no entanto, não teria sido suficiente para a ação dos processos pedogenéticos, no desenvolvimento do solo (AB'SABER, 1995).

Como pode ser visto, na Figura 28B, no interior da ravina é comum o acúmulo de seixos sobrepostos ao arenito de origem eólica (Formação Botucatu) e sotopostos a depósitos fluviais recentes Quaternários. O acúmulo desses seixos, formando horizontes, pode estar, inicialmente, associado a depósitos colúvio-aluvionares, que, posteriormente, têm um enriquecimento relativo de fragmentos grossos, pela perda das frações mais finas em superfície, por processos variados, tais como a ação eólica em condições de semiaridez, no passado.

As alterações pedogenéticas destes depósitos, com variações de estações secas e chuvosas e a concentração de óxidos de ferro, provenientes de terras mais altas, nas quais as rochas de origem vulcânica e os arenitos com cimento ferruginosos são intemperizados, formam carapaças ferruginosas, denominadas placas e concreções ferruginosas (Figura 29).

Associados ao pavimento de concreções ferruginosas ocorrem fragmentos de rochas quartzíticas e de geodos. Estes fragmentos podem estar relacionados à ocorrência de rochas de origem vulcânica, que, atualmente, não estão presentes, na área. Entretanto, rochas vulcânicas e veios de quartzitos são encontrados, nas cotas mais altas, no entorno da ravina e em algumas outras porções da Bacia do Arroio Miracatu, associados ao Planalto Meridional ou a *necks* vulcânicos, conforme Verдум

(1997). Tal fato dá indícios de que estas rochas ocuparam uma maior extensão, no passado, e que foram afetadas por processos erosivos superficiais, resultando no acúmulo e na deposição das frações mais resistentes.

Figura 29 – Carapaça ferruginosa, sobreposta a um bloco de arenito Botucatu. Leito da ravina 1, Município de Manuel Viana, Rio Grande do Sul



Fonte: acervo de campo, Roberto Verdum (janeiro de 2017)

De acordo com as evidências apontadas, a área de ocorrência da Feição Erosiva 1 indica ser composta de “valões preenchidos” (VERDUM, 1997), ou seja, por cavidades formadas em período de maior potencial hídrico e de erosão, que foram preenchidos em períodos de menor potencial hídrico e intensificação de processos de deposição (Figura 30).

Em período mais recente, entre o Neógeno e início do Quaternário, a reativação de falhas e de fraturas das rochas subjacentes teria proporcionado modificações, na circulação hídrica externa e interna, fazendo com que estes valões fossem expostos novamente. Esta reativação de fraturas, nas rochas, e o soerguimento do relevo, proporcionou maior aporte de água, no sistema, propiciando novos mecanismos pedogenéticos e erosivos, que podem ser verificados, na Figura 31. Nas condições atuais, esses valões sofrem erosão que provoca o entalhamento do talvegue, o surgimento de vertentes laterais e a exposição dos depósitos ferruginosos colúvio-aluvionares do passado.

Figura 30 – Entorno da ravina 1. No primeiro plano, vê-se um dos eixos secundário de desenvolvimento da ravina, em um valão reativado e em intenso processo de erosão. Em linha pontilhada, está delimitado um valão preenchido, o qual um dos eixos da erosão deve avançar, futuramente. Ao fundo, a linha vermelha delimita um lineamento mapeado, indicando o ponto de soerguimento do relevo



Fonte: acervo pessoal de Juliana Dummer (janeiro de 2017)

No que diz respeito à litologia, a área em que se desenvolve a Feição Erosiva 1 está, em parte, ocupada pela Formação Serra Geral, Fácies Gramado, e, em outra parte, pela Formação Botucatu, de acordo com o mapeamento da CPRM. Os basaltos da Fácies Gramado estão presentes, no topo do relevo, a cerca de 750 metros do leito da ravina. O arenito da Formação Botucatu é bastante evidente, em diversos pontos, no interior da ravina. Nesta rocha de origem eólica se formam *sets* e *cosets* de estratos cruzados. Em termos de estrutura, é composta por dunas, essencialmente, constituídas de areias ortoquartzíticas, contendo estratificações cruzadas de grande porte e zonas de deflação interdunas, como mostra a figura esquemática de uma fotografia, obtida no interior do eixo principal da Feição Erosiva 1, conforme a Figura 32.

O desenvolvimento principal da ravina ocorre na direção NW68°SE e inflexões para o lado esquerdo do leito principal, cujos ângulos variam de NE16°-18°SW, no sentido da vertente do mesmo lado.

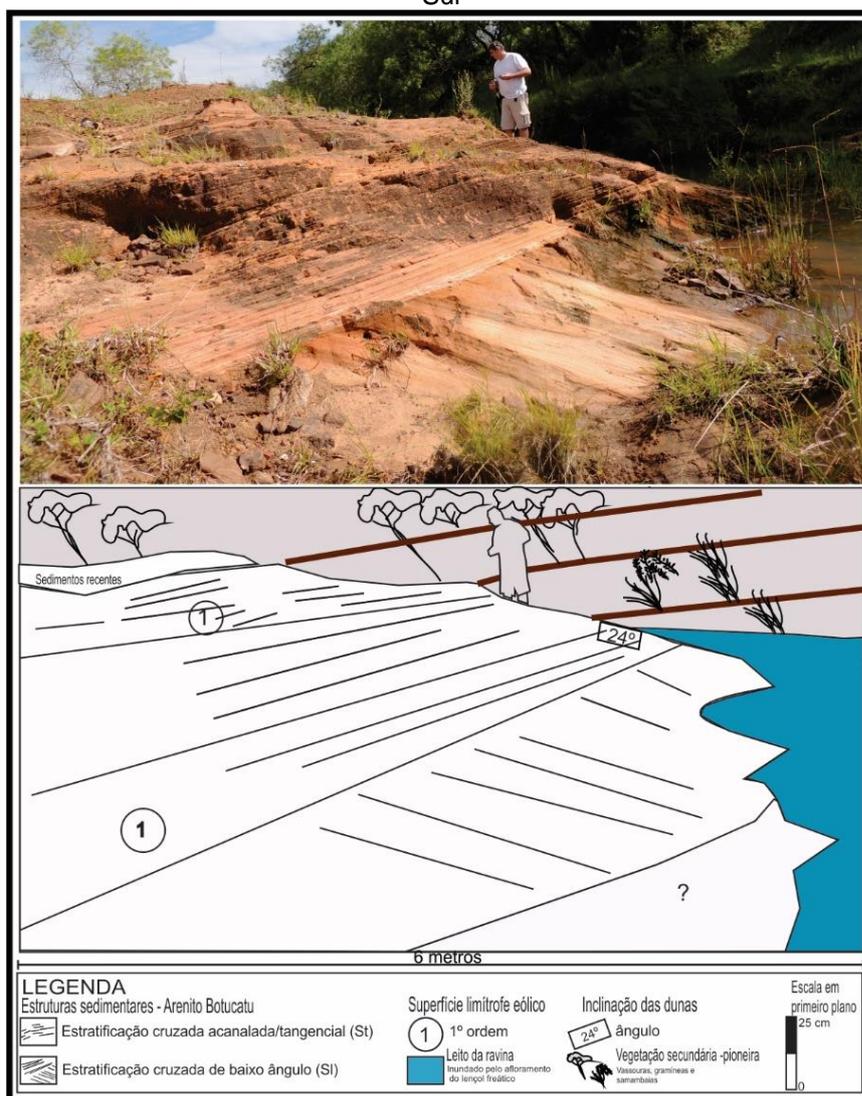
Conforme a Figura 28A, o eixo principal tem direção concordante dos lineamentos mapeados a sua direita e a sua esquerda. Na Figura 28B, os eixos de desenvolvimento secundários, além da vertente de maior inclinação, são concordantes ao lineamento mapeado ao fundo da ravina (Figura 28A).

Figura 31 – Interior da ravina, expondo um valão em processo de entalhamento. Observa-se que a camada de depósitos sobre a rocha é pouco espessa, com cerca de 45 cm, acima da Formação Botucatu. Bacia Hidrográfica do Arroio Miracatu, RS



Fonte: acervo pessoal de Juliana Dummer (janeiro de 2017)

Figura 32 – Fotomosaico do interior da ravina 1, mostrando as superfícies estruturais de duna consolidada - Formação Botucatu. Município de São Francisco de Assis, sudoeste do Rio Grande do Sul



Fonte: acervo pessoal de Roberto Verdum (janeiro de 2017)

A Feição Erosiva 2, localizada nas coordenadas 29°25'26.46"S, 55°19'57.19"W, está situada na porção centro oeste da bacia, em cotas altimétricas que variam entre 186 a 228 metros, e a encosta, cuja inclinação média é de 3,4% (Figura 25 e Figura 33), possui cerca de 1.400 m de extensão e está conectada a uma drenagem de segunda ordem.

Indica ser uma ravina, uma vez que não foi constatada a presença de afloramento do lençol freático, no seu interior. Na área em que se encontra essa feição erosiva, há litologias identificadas como sendo da Formação Serra Geral, Fácies Gramado, e da Formação Botucatu, de acordo com o mapeamento da CPRM (2006). No entanto, em trabalho de campo, no leito da ravina, foi constatada, apenas, a

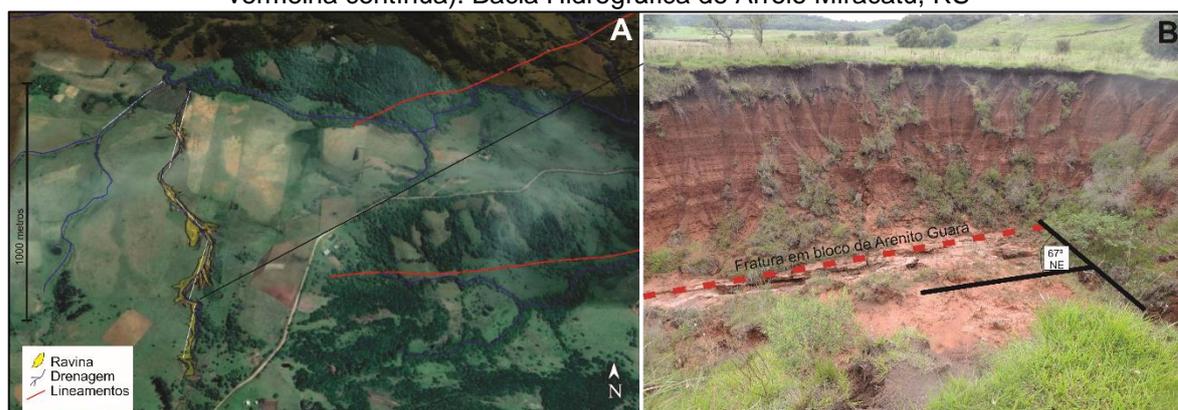
presença de afloramentos das Formações Botucatu e Guará, estando, os basaltos da Fácies Gramado, presentes, somente, no topo da vertente, a cerca de 600 metros do leito da ravina.

O arenito da Formação Botucatu é evidente, a montante da ravina, nas paredes do eixo principal, caracterizado por dunas consolidadas, cuja inclinação é de 25° , como pode ser verificado no fotomosaico da Figura 34. Constatou-se que o desenvolvimento da erosão ocorre assimetricamente, em relação à inclinação da vertente e à inclinação das paleodunas, demonstrando forte condicionamento dado pela estratificação do arenito da Formação Botucatu.

O arenito da Formação Guará foi identificado, no fundo do leito principal da ravina, a cerca de 250 metros da cabeceira, em uma altitude de 208 metros, cujo processo erosivo atinge cerca de 4 metros de profundidade (Figura 33B).

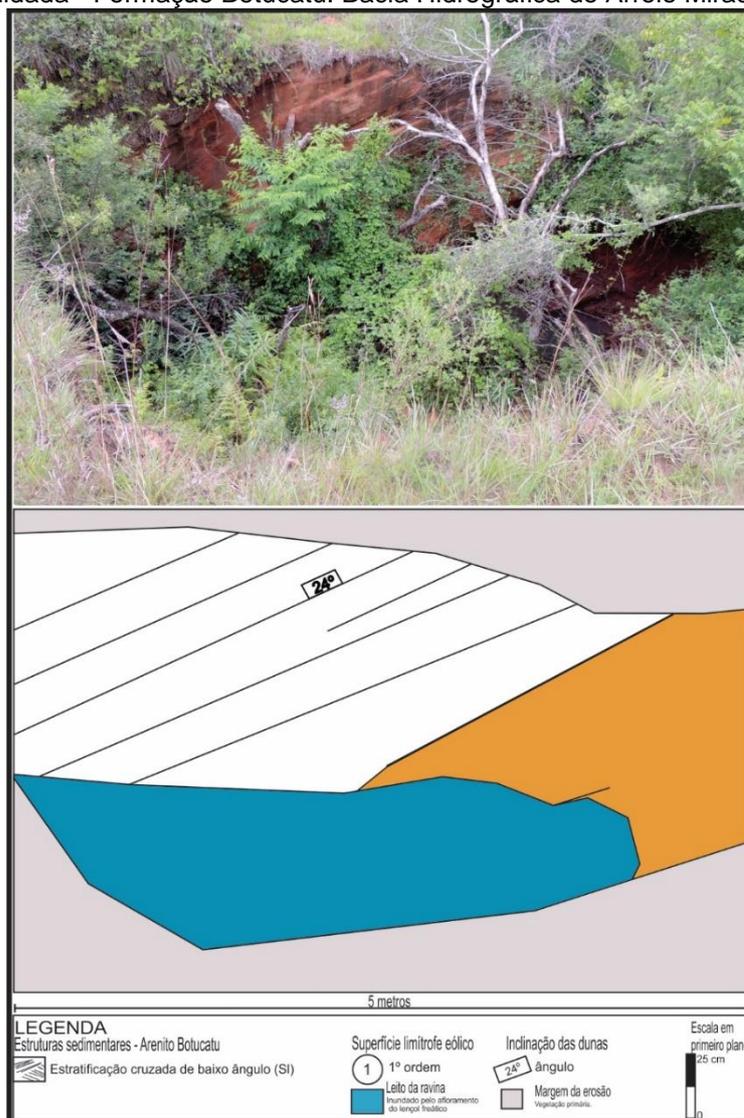
Neste ponto, se evidencia o controle estrutural existente, no desenvolvimento do processo erosivo, uma vez que o seu eixo principal, apesar de seguir a direção de $N9^\circ E$, sofre inflexões a $N67^\circ E$, coincidentes com o ângulo de fraturamento do arenito da Formação Guará. Somado a isto, as inflexões são concordantes com os lineamentos, nas proximidades da ravina 2, conforme Figura 33A.

Figura 33 – Imagem de satélite da Ravina 2 e de seu entorno (A), como delimitação das drenagens, dos lineamentos e do leito do processo erosivo. Em (B), o interior do eixo principal de desenvolvimento da ravina 2, na qual ocorre forte inflexão, no canal, a $N67^\circ E$, seguindo o ângulo da falha, no bloco de arenito Guará (delimitado pela linha pontilhada vermelha), concordante com o ângulo de desenvolvimento de lineamento demarcado, na figura à esquerda (marcada pela linha vermelha contínua). Bacia Hidrográfica do Arroio Miracatu, RS



Fonte: Google Earth® e acervo pessoal de Juliana Dummer (janeiro de 2017)

Figura 34 – Fotomosaico do interior da ravina 2, mostrando as superfícies estruturais de duna consolidada - Formação Botucatu. Bacia Hidrográfica do Arroio Miracatu, RS



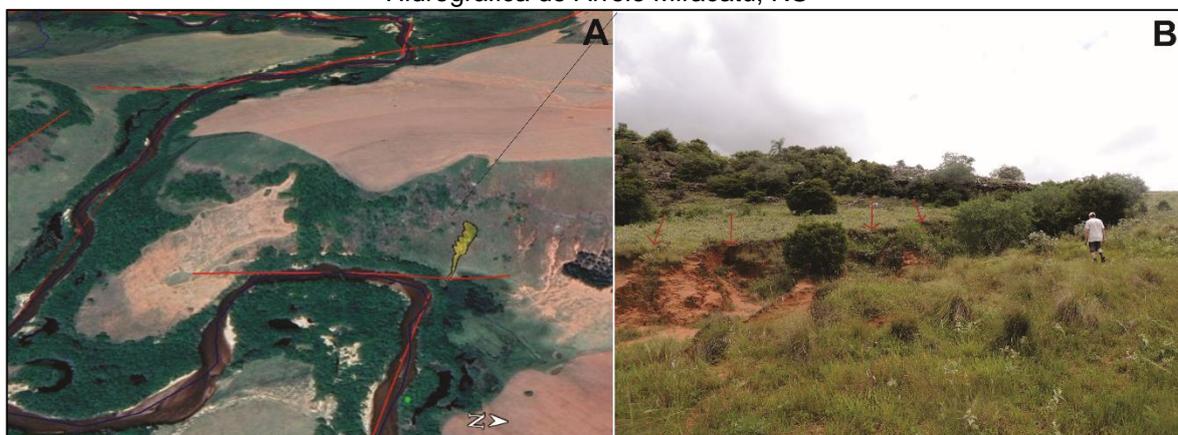
Fonte: acervo pessoal de Roberto Verdum (abril de 2018)

A Feição Erosiva 3, localizada nas coordenadas 29°28'53.43"S, 55°17'4.71"W, na posição central na bacia, próxima ao leito do curso principal do Arroio Miracatu (Figura 25 e Figura 35), possui cerca de 100 metros de extensão e ocorre em cotas altimétricas que variam entre 101 e 115 metros, na base de uma vertente, cuja inclinação média é de 13%. Trata-se de uma ravina, cujo desenvolvimento se dá sobre o substrato da Formação Guará (CPRM, 2006).

A incisão erosiva avança para jusante, em direção à rede de drenagem principal, e por erosão remontante com eixos de canais mais recentes, demonstrando um desenvolvimento lateral, seguindo a assimetria da vertente. O eixo preferencial de erosão remontante segue a direção N78°W.

Na margem esquerda, a Feição Erosiva 3 possui paredes laterais, indicando estabilidade, com a presença de musgos e de vegetação pioneira. Já as paredes da ravina, na margem direita, demonstram a evolução do processo de erosão lateral, com eixos erosivos ativos, com os ângulos na direção $N78^{\circ}E$, seguindo a assimetria da vertente do mesmo lado, que possui 10° de inclinação, indicado pelas setas, na Figura 35B.

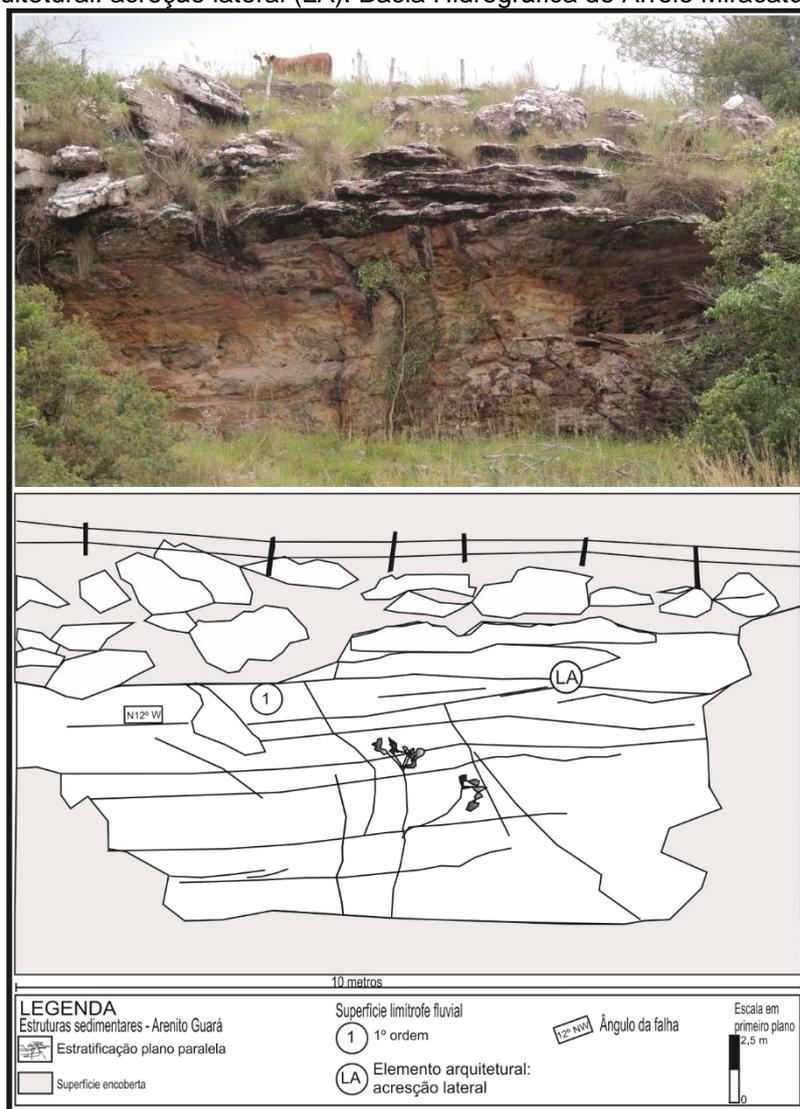
Figura 35 – Imagem de satélite da Ravina 3 e de seu entorno (A), como delimitação das drenagens, dos lineamentos e do leito do processo erosivo. Em (B), visão lateral da ravina 3, com vista para os eixos laterais direitos, pelos quais a erosão avança (setas indicativas em vermelho). Bacia Hidrográfica do Arroio Miracatu, RS



Fonte: Google Earth®, acervo de campo, Juliana Dummer, (abril de 2018)

O avanço lateral e remontante da ravina indica relação, sobretudo, com os planos de estratificação do arenito Guará, que se encontram sotapostos, sobre a Formação Botucatu, situada no topo e coincidente com o mapeamento da CPRM (2006). Esta condição, somada ao contato com a estrutura bastante fraturada dos blocos de arenito da Formação Guará, propicia a formação de dutos e de cavidades subterrâneas. Estes dutos auxiliam, na ação da água, em superfície e em subsuperfície, propiciando o avanço da erosão. Em aferição de fratura, em bloco situado acima da cabeceira da ravina, constatou-se que os planos de falha estão na direção $N12^{\circ}W$, concordantes com as direções principais, constadas nos lineamentos. O detalhamento do bloco pode ser verificado no fotomosaico da Figura 36.

Figura 36 – Formação Guará (Jurássico - Sistema Fluvial). Arenito com feio de canal. Elemento arquitetural: acreo lateral (LA). Bacia Hidrográfica do Arroio Miracatu, RS



Fonte: acervo pessoal de Roberto Verdum (abril de 2018)

A Feio Erosiva 4 está localizada nas coordenadas 292921.71S, 551921.18W, na porão centro-sul da bacia e em cotas altimétricas que variam entre 121 e 132 metros, na base de uma encosta, cuja inclinao média  de 10%. O eixo principal da ravina 4 possui 136 metros de extensão (Figura 25 e Figura 37).

A rea em que se desenvolve esta feio erosiva  caracterizada pela presença da Formao Guará, de acordo com o mapeamento da CPRM (2006). O arenito fluvial da Formao Guará  bastante evidente, em diversos pontos do interior da ravina. Predominam blocos fraturados em duas direes principais: uma, na direo N50W, e outra, na direo N31E. A ravina apresenta vários eixos de desenvolvimento, mas, assim como aquele percorrido, em campo, os demais segmentos apresentam duas

direções principais, coincidentes com as fraturas citadas acima. A Figura 37B mostra a presença de *pipings*, na confluência dos dois lineamentos, na cabeceira da ravina. Os *pipings* correspondem a zonas de fraqueza dos blocos, são formados pelo escoamento subsuperficial, nas fraturas da rocha, e contribuem para o desmoronamento das paredes da ravina e, assim, para o avanço do processo erosivo lateral e à montante.

Figura 37 – Vista geral da Ravina 4 e de seu entorno, como delimitação das drenagens, dos lineamentos e do leito do processo erosivo (A). Em (B), detalhe da cabeceira do leito percorrido a campo (delimitado em vermelho, à esquerda), que segue duas direções principais: uma, a N50°O (desenvolvimento remontante, seta azul) e outra, a N31°E (desenvolvimento lateral, seta amarela). Nota-se a presença de *pipings*, na confluência dos dois lineamentos, identificados na cabeceira da ravina. Bacia Hidrográfica do Arroio Miracatu, RS



Fontes: Google Earth® e acervo pessoal de Juliana Dummer (janeiro de 2017)

Figura 38 – Formação Guará (Jurássico - Sistema Fluvial). Arenito com feição de canal com estratificação plano-paralela e estratificação cruzada tangencial. Afloramento no município de Manuel Viana, noroeste do Rio Grande do Sul



Fonte: acervo pessoal de Roberto Verdum (abril de 2018)

A Feição Erosiva 5 está localizada nas coordenadas $29^{\circ}27'18.82''S$, $55^{\circ}15'55.39''W$, em cotas altimétricas que variam entre 112 e 120 metros, em uma encosta, cuja inclinação média é de 7% (Figura 25 e Figura 39), possui aproximadamente 100 metros de extensão e está conectada a uma drenagem de primeira ordem. Trata-se de uma ravina que se desenvolve sobre a Formação Guará, de acordo com o mapeamento da CPRM (2006). Blocos de arenito Guará foram identificados, à montante da ravina, na cota de 124 m de altitude, com fraturas principais com ângulo de $N64^{\circ}E$. Caracteriza-se por conter estratificação cruzada truncante, de possível origem fluvial, conforme fotomosaico da Figura 40.

A erosão ocorre, inicialmente, por um eixo principal de $N10^{\circ}W$, convertendo para um segundo eixo de $N67^{\circ}E$, que se observa, na Figura 39. De certa forma, a mudança brusca de desenvolvimento da erosão para $N67^{\circ}E$ mostra-se concordante com a fratura mapeada na rocha, $N64^{\circ}E$.

Figura 39 – Vista geral da Ravina 5 e de seu entorno, como delimitação das drenagens, dos lineamentos e do leito do processo erosivo (A). Em (B), vista lateral esquerda, em campo, dos eixos de desenvolvimento da ravina 5. Município de São Francisco de Assis, sudeste do Rio Grande do Sul



Fontes: Google Earth® e acervo de campo (janeiro de 2018)

Figura 40 – Estrutura sedimentar, com características de estratificações cruzadas truncantes, de origem fluvial (Formação Guará – Jurássico). Município de São Francisco de Assis, Rio Grande do Sul



Fonte: acervo de campo (janeiro de 2017)

A Feição Erosiva 6, localizada nas coordenadas 29°23'29.40"S, 55° 8'14.21"W, está situada em cotas altimétricas que variam de 177 a 157 metros, à jusante de duas encostas, cujas inclinações médias são de 21% (Figura 25 e Figura 41). Trata-se de uma ravina que possui um eixo de desenvolvimento a N76°E, com aproximados 350 metros de extensão, conectada a drenagem de segunda ordem. Paralelamente, a ravina 6 possui diversos eixos de desenvolvimento, nas margens direita e esquerda.

Seguindo a inclinação das vertentes, os lineamentos identificados, nas paredes dos eixos laterais, seguem as direções com maior frequência de $N45^{\circ}W$ e $N30^{\circ}W$, $N60^{\circ}E$ e $N82^{\circ}E$. Na cabeceira da ravina, foi obtido o ângulo de $N88^{\circ}E$.

A cabeceira da ravina 6, por sua vez, permitiu analisar a estrutura sedimentar de origem fluvial do arenito Guará, cujas características são, ora de estratificaces cruzadas acanalada/tangencial (St), ora de estratificaco cruzada de baixo ngulo (SI), de sedimentos de cores claras e escuras intercaladas. Foram identificados, na cabeceira desta ravina, clastos argilosos. Tanto a alternância, na disposico e na cor das camadas, quanto a presença dos clastos argilosos são indicativos de mudanças climáticas do passado que geraram maior ou menor potencial hídrico do canal, como, também, a disponibilidade de matéria orgânica, no ambiente (Figura 42).

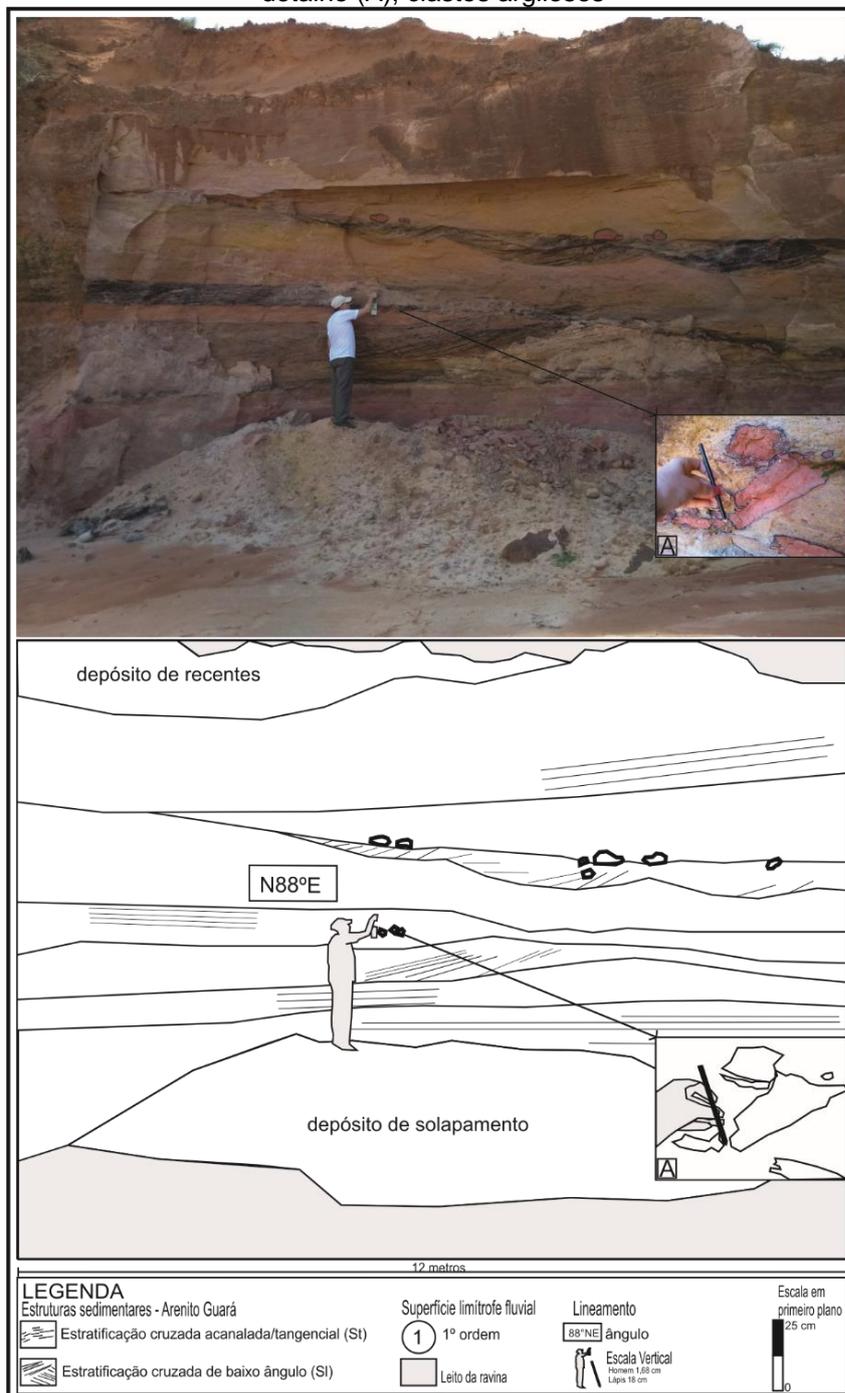
Blocos mais preservados do arenito Guará foram identificados, no entorno da ravina 6. As fraturas identificadas ocorrem na direco $N12^{\circ}E$ (principal) e $N45^{\circ}W$, (secundária). Como se observa, na Figura 43, os ângulos das fraturas são concordantes com as das drenagens principal e secundária. Esta condico reafirma a hipótese de que as estruturas da rocha, assim como as do relevo, exercem forte influência sobre o desenvolvimento das drenagens e dos processos erosivos, na área de estudo.

Figura 41 – Vista geral da Ravina 6 e de seu entorno, como delimitaco das drenagens, dos lineamentos e do leito do processo erosivo (A). Em (B), vista lateral direita parcial da erosão e seus eixos de desenvolvimento. Município de São Francisco de Assis, sudeste do Rio Grande do Sul



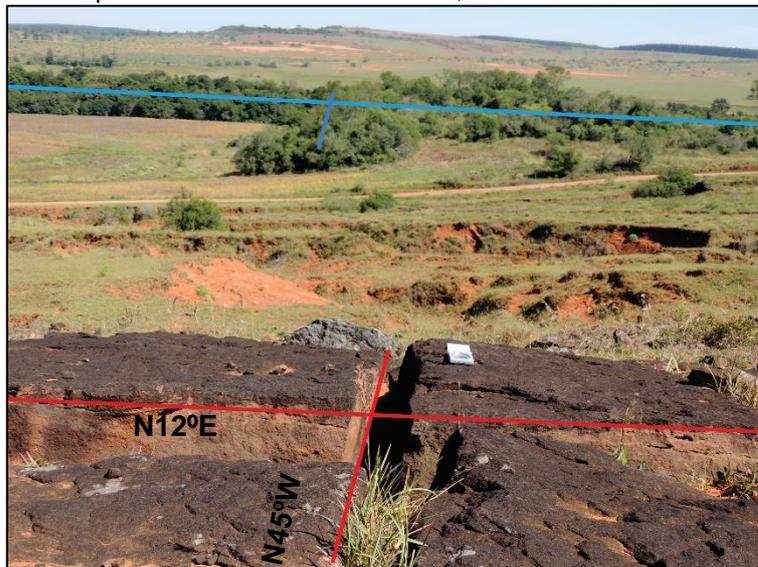
Fontes: Google Earth® e acervo pessoal de Juliana Dummer (abril de 2018)

Figura 42 – Estrutura sedimentar, com características de estratificações cruzadas acanalada/tangencial (St) e estratificação cruzada de baixo ângulo (SI), de origem fluvial (Formação Guará – Jurássico) cabeceira da ravina 6. Município de São Francisco de Assis, Rio Grande do Sul. No detalhe (A), clastos argilosos



Fonte: Acervo pessoal de Juliana Dummer (abril de 2018)

Figura 43 – Bloco da Formação Guará, no entorno da Ravina 6, cujas fraturas ocorrem na direo principal N12E e secundária N45W, concordantes com as drenagens delimitadas, ao fundo (linhas azuis). Município de São Francisco de Assis, sudoeste do Rio Grande do Sul

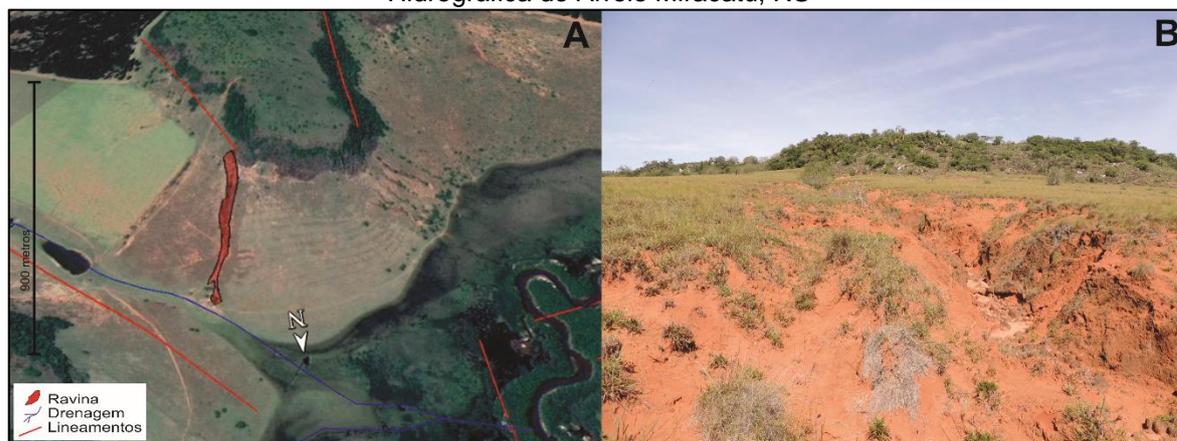


Fonte: acervo pessoal de Roberto Verdum (abril de 2018)

Por fim, o último processo erosivo observado a campo, denominado de Feio Erosiva 7, está localizado pelas coordenadas 2931'1.73"S, 5518'35.01"W e situado na porão centro sul da bacia (Figura 25 e Figura 44). A ravina 7 ocorre em cotas altimétricas que variam de 101 a 142 metros, em uma encosta, cuja inclinao média  de 11%. Possui cerca de 330 metros de extensão e está conectada  drenagem de segunda ordem. No que diz respeito  litologia, a área em que se desenvolve a ravina 7 está caracterizada pela presença da Formao Guará, de acordo com o mapeamento da CPRM (2006). No percurso de campo, no leito da ravina 7 e em seu entorno, foram identificados blocos do arenito Guará, no entanto a disposio destes não possibilitou uma boa tomada fotográfica, para a sua caracterizao, para compor o fotomosaico.

Contudo, a erosão se caracteriza pelo seu desenvolvimento, no sentido da vertente, sobretudo por um eixo principal com direo N24E, e alguns pequenos eixos de desenvolvimento, paralelos a este. A direo do eixo principal  concordante com o lineamento demarcado, no entorno da referida ravina, o que  possível aferir, na Figura 44.

Figura 44 – Vista geral da Ravina 7 e de seu entorno, como delimitação das drenagens, dos lineamentos e do leito do processo erosivo (A). Em (B), vista a partir da jusante da ravina. Bacia Hidrográfica do Arroio Miracatu, RS



Fontes: Google Earth® e acervo pessoal de Juliana Dummer (abril de 2018)

6.1 CONCLUSÃO PARCIAL

A análise do cenário de degradação dos solos, por processos erosivos lineares, na bacia, resultou no mapeamento de 453 processos erosivos lineares, cujos desenvolvimentos ocorrem, sobretudo, sob Latossolos Vermelhos, classe que abrange a maior parte da bacia. Estes, quando possuem textura arenosa, caracterizam-se por média suscetibilidade à erosão. A escala de mapeamento disponível mostrou, no entanto, generalizar a área de ocorrência de Latossolos e de Argissolos, uma vez que já foram identificados solos caracterizados como Neossolo Quartzarênico Órtico, nestas porções. Este último, por sua vez, caracteriza-se por alta fragilidade à erosão.

Os eixos de desenvolvimento principais seguem as direções NW-SE e NE-SW, com concentração maior entre os ângulos $N40^{\circ}-80^{\circ}W$ e $N50^{\circ}-80^{\circ}E$. A maioria das incisões erosivas se caracteriza por estar nas cabeceiras das drenagens ou conectadas a estas. A maior densidade de feições erosivas está na porção média-superior da bacia, cuja litologia corresponde à da Formação Guará, na qual também se concentra a ocorrência de areais.

A análise do mapa de densidade de erosão linear, na bacia, confrontada com a espacialização dos lineamentos e com os dados dos diagramas de roseta, comprova que os ângulos de desenvolvimento principal das feições erosivas são coincidentes com as direções dos lineamentos estruturais. É nas áreas de intersecção de lineamentos de médio porte, nas direções NW-SE e SE-NW, que estão as áreas de

maior densidade de feições erosivas lineares e, conseqüentemente, de areais. Evidencia-se a forte relação lineamentos - ravinamentos - areais.

As incursões a campo mostraram que as sete ravinas analisadas se desenvolvem, preferencialmente, na direção NW-SE, mais precisamente, nas direções N68°W, N9°E, N78°W, N51°W, N67°E, N76°E e N24°E, respectivamente. Estes ângulos mostram-se concordantes com as direções preferenciais dos lineamentos identificados, na área da bacia.

Apesar das variações altimétricas do terreno, em que se desenvolvem as feições erosivas, em todas estas foram constatados afloramentos da Formação Guará. Do ponto de vista estratigráfico, esta formação se situa abaixo das formações Botucatu e Serra Geral. Esta constatação demonstra o alto grau de erosão vertical do talvegue, em direção a esse nível de base local, sobretudo, nas áreas nas quais a litologia, de características friáveis, vem sendo exposta. Neste sentido, reforça-se a hipótese de que esta erosão vertical se desenvolve pela fragilidade estrutural e textural dessa rocha, pelo soerguimento tectônico de toda a estrutura da bacia, que reativa um novo nível de base local mais profundo, e pela intensificação dos processos erosivos em clima subtropical úmido.

Afloramentos de rochas verificados próximo ou no interior dos processos erosivos apresentaram fraturas, cujos ângulos são concordantes com os ângulos de desenvolvimento dos eixos principais ou secundários dos processos erosivos analisados. Da mesma forma, as anomalias de relevos altos e baixos lineares (lineamentos) também são coincidentes com os ângulos de desenvolvimento das ravinas e das voçorocas, o que denota o controle do condicionamento da morfotectônica sobre os processos erosivos lineares identificados.

A respeito da caracterização dos sete processos erosivos, cabe individualizar algumas considerações. O processo erosivo número 1 demonstra, em um perfil exposto, no seu interior, o acúmulo de seixos sobrepostos ao arenito de origem eólica (Formação Botucatu) e sotapostos a depósitos aluviais recentes Quaternários. Somado às características encontradas, há evidências de que esta erosão é relacionada aos “valões preenchidos”, ou seja, às cavidades formadas em período de maior potencial hídrico e de erosão, preenchidos em períodos de menor potencial hídrico e intensificação de processos de deposição.

A identificação de lineamentos paralelos e transversais à erosão indica que a sua exposição atual está relacionada à reativação de falhas e de fraturas das rochas subjacentes, em um período mais recente. Esta movimentação teria proporcionado modificações, na circulação hídrica externa e interna, fazendo com que estes valões estejam expostos, novamente, no presente.

O processo erosivo 2, o mais expressivo em extensão, 1.400 metros, apresenta em seu eixo principal diversas inflexões, concordantes com os lineamentos cartografados, no seu entorno, bem como com o ângulo de faturamento, no bloco de arenito da Formação Guará, identificado, no seu interior (N67°E). Nesta erosão, fica evidente, ainda, o condicionamento relacionado à estratificação do arenito Botucatu, uma vez que o seu desenvolvimento ocorre assimetricamente à inclinação da vertente e à inclinação das paleodunas identificadas.

O processo erosivo 3, diferente dos demais, avança, sobretudo, por erosão remontante e lateral, cujos eixos erosivos ativos seguem a direção N78°E, seguindo a assimetria da vertente do mesmo lado, que possui 10° de inclinação, em relação ao plano horizontal.

O desenvolvimento lateral desta erosão indica seu condicionamento, por planos de estratificação cruzada das paleodunas do arenito Botucatu, que, somado ao contato com a estrutura bastante fraturada dos blocos de arenito Guará sotapostos, propicia a formação de dutos e de cavidades subterrâneas (*pipings*). Estes dutos auxiliam, na ação da água em superfície e subsuperfície, propiciando o avanço da erosão.

O processo erosivo 4 apresenta, como particularidade, o grande número de eixos de desenvolvimento e a evidente ação do escoamento subsuperficial por dutos, *pipings*, sob o fraturado do arenito fluvial da Formação Guará. Presentes, na confluência dos lineamentos, na cabeceira da ravina, os *pipings* correspondem a zonas de fraqueza estrutural e são os principais indutores do desmoronamento das paredes e do avanço remontante desta erosão.

O processo erosivo 5 apresenta, como característica, o desenvolvimento principal, convergindo, em determinado ponto, para um ângulo muito próximo (N67°E) daquele identificado, nas fraturas de um bloco da Formação Guará, situado a montante (N64°E). De semelhante modo, cabe destacar, para o processo erosivo de número 6, a presença de arenitos da formação Guará, no seu entorno, cujas fraturas

identificadas ocorrem nas direções N12°E (principal) e a N45°W, (secundária) e são concordantes com as direções das drenagens principal e secundária, próximas dali.

Na erosão 7, não foi possível a identificação de afloramentos bem preservados, porém o seu desenvolvimento ocorre, no sentido da vertente, sobretudo, por um eixo principal, com direção N24°E, e alguns pequenos eixos de desenvolvimento, paralelos a este. O eixo principal, por sua vez, é concordante com o lineamento demarcado, no entorno desta ravina. Em ambas as erosões, reafirma-se a hipótese de que as estruturas das rochas existentes, assim como as do relevo, exercem forte influência sobre o desenvolvimento da rede de drenagem e dos processos erosivos, na área de estudo.

7

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo da tese foi o de investigar o condicionante tectônico, no desenvolvimento de erosões lineares (ravinas e voçorocas), visando um detalhamento maior da gênese desses processos, na Bacia Hidrográfica do Arroio Miracatu, nos municípios de São Francisco de Assis e de Manuel Viana/RS.

Para responder ao objetivo central e para construir os elementos que sustentassem a hipótese formulada, isto é, de como interpretar o controle das estruturas do relevo sobre a gênese dos processos erosivos, iniciou-se o trabalho de busca por referenciais, nesta temática, as quais se mostraram bastante escassas. Porém, se caracterizaram como sendo referenciais importantes e concordantes, no que diz respeito à identificação e à explicação das morfoestruturas do relevo, pois revelaram que a principal explicação aos fenômenos estudados reside em uma caracterização detalhada da rede de drenagem, bem como na análise de parâmetros morfométricos.

Assim, após a interpretação e o mapeamento de 453 processos erosivos lineares, passíveis de identificação, em imagens de satélite do Google Earth®, em escala de 1:5.000, o segundo passo foi, justamente, a elaboração do mapa de drenagens da bacia. Este foi elaborado com base no mapeamento disponibilizado pelo IBGE e posterior trabalho de sobreposição, em imagem de satélite, para correção do traçado. A obtenção minuciosa do traçado dos canais foi fundamental para a caracterização detalhada da drenagem, na bacia hidrográfica do Arroio Miracatu, permitindo a identificação das anomalias, dos parâmetros morfométricos, bem como a interpretação dos lineamentos do relevo.

Este dado, cruzado com os mapeamentos geológico e pedológico, ainda disponíveis, embora somente em escalas pequenas de representação, para a área de estudo, unido aos levantamentos de campo, permitiu uma análise conjunta, para se confirmar, em tese, que a bacia em estudo possui uma dinâmica erosiva presente, sob o controle estrutural e tectônico, à medida que:

- As formações litológicas são identificadas em posição altimétrica discordante da posição estratigráfica;

- A bacia está compreendida, em sua totalidade, no interior de estrutura do tipo *horst*, denominada de Muro de Manuel Viana, na qual os sedimentos da Formação Botucatu e Guará estão alçados;
- As rochas vulcânicas da Fácies Gramado afloram em cotas consideravelmente baixas (110m);
- A drenagem apresenta compatibilidade com a estruturação tectônica, com padrões paralelos isolados e concordantes com os lineamentos cartografados;
- Foram cartografadas 353 feições lineares de relevo (lineamentos), na direção principal NE-SW, condizentes com o condicionamento tectônico regional;
- O *trend* NE-SW foi identificado, na primeira metade da bacia, formando vales incisivos, ao longo desta direção, com a nítida verticalização dos talwegues dos cursos de água principais e secundários;
- O curso principal da bacia, o Arroio Miracatu, apresentou baixa sinuosidade (1,4), valor compatível com áreas soerguidas por forças endógenas;
- O Fator Assimetria da Bacia de Drenagem (FABD) médio a alto (62,66), sugere basculamento da bacia, no sentido NE;
- O Fator de Simetria Topográfica Transversal (FSTT) é evidente, em um setor da bacia, a partir de 16 km da nascente, até a sua porção central (28 km da nascente), na qual os depósitos fluviais da formação Guará estão alçados em cotas de 260 metros;
- O mesmo setor da bacia apresenta um basculamento e uma captura de drenagem, entre a Sanga Passo da Areia e o Arroio Miracatu (trecho Sanga do Taquari), ocasionando, portanto, o deslocamento deste para a margem esquerda da bacia;
- A Relação Declividade X Extensão (RDE) dos cursos de água analisados apresenta valores > 6 , que correspondem a anomalias de 1ª ordem, com significativa influência de controle estrutural;
- O Arroio Miracatu, curso principal, e mais extenso, que percorre a bacia, no quadrante NE-SW, apresentou um RDE total significativamente elevado (25,30);
- Os canais de drenagem da Bacia Hidrográfica do Arroio Miracatu apresentam várias mudanças bruscas de direcionamento, em seus segmentos, com meandros isolados e com inflexões em ângulos ortogonais, na direção, em geral, L-W, apesar de possuir um padrão regional de escoamento, na direção NE-SW;

- Todos os lineamentos morfoestruturais foram cartografados, nas direções NW-SE e NE-SW, com destaque para os ângulos N80°-90°W; N40°-50°W e N50°-60°W.

No sentido de alcançar o objetivo principal da tese, partiu-se para a caracterização dos processos erosivos lineares identificados, nesta bacia hidrográfica, a sua localização e o cruzamento com os mapeamentos temáticos (litologia e pedologia), os lineamentos traçados em gabinete e os dados de campo. A influência da litologia e das estruturas tectônicas, na gênese das ravinas e das voçorocas mapeadas, ficou comprovada, pois:

- Os 453 processos erosivos lineares identificados e mapeados, na bacia, seguem as direções NW-SE e NE-SW, com concentração maior entre os ângulos N40°-80°W e N50°-80°E, concordantes com a direção dos lineamentos estruturais do relevo, inclusive em âmbito regional;

- A maior densidade de feições erosivas está na porção média-superior da bacia, cuja litologia corresponde à da Formação Guará, na qual também se concentra a ocorrência dos areais;

- É nas áreas de intersecção de lineamentos de médio porte, nas direções NW-SE e SE-NW, que estão as áreas de maior densidade de feições erosivas lineares e, conseqüentemente, de areais, evidenciando a forte relação lineamentos-ravinamentos-areais;

- Os sete processos erosivos analisadas desenvolvem-se, preferencialmente, na direção NW-SE, mais precisamente, nas direções N68°W, N9°E, N78°W, N51° W, N67°E, N76°E e N24°E, as quais são concordantes com as preferenciais dos lineamentos identificados, na área da bacia;

- O alçamento de porções da bacia expôs o arenito Guará, de característica friável, contribuindo para a intensificação dos processos erosivos, sob a influência do clima subtropical úmido;

- Apesar da variação altimétrica, em todas as feições erosivas, foram constatados afloramentos da Formação Guará, evidenciando o alto grau de erosão, em direção a esse nível de base local;

- Os ângulos, nas fraturas dos blocos de rochas identificados, são concordantes com os ângulos de desenvolvimento dos eixos principais ou secundários dos processos erosivos detalhados;

- As anomalias de relevos altos e baixos lineares (lineamentos) também são coincidentes com as direções de desenvolvimento das ravinas, o que denota, senão, o controle, o condicionamento da morfotectônica sobre os processos erosivos lineares identificados.

Por fim, acredita-se que os estudos de campo e de laboratório não se esgotam, aqui, mas são capazes de sustentar a hipótese de que há uma influência das estruturas presentes, no relevo, tanto no desenvolvimento quanto na orientação das feições erosivas lineares, existentes na Bacia do Arroio Miracatu e que estas, por sua vez, são tanto ativadoras quanto agravantes dos processos de arenização existentes. As áreas mais vulneráveis demonstraram ser aquelas, nas quais a Formação Guará está exposta, na superfície, assim como os Latossolos Vermelhos e os Neossolos Quartzarênico Órticos, essencialmente arenosos, com predomínio das frações de areia média e fina, com reduzidos percentuais de argila e de matéria orgânica.

A sua vulnerabilidade natural à erosão, devido ao condicionante geológico estrutural e pedológico e à ação das águas de escoamento superficial e subsuperficial, causa as feições erosivas lineares, que, por sua vez, dão origem ao surgimento e ao avanço dos areais.

Ainda, como proposição para uso dos dados e para ações futuras, prevê-se a difusão do estudo para as autoridades e para os responsáveis pelo gerenciamento ambiental dos Municípios de Manuel Viana e de São Francisco de Assis, a fim de que o estudo sirva de base para a implantação de projetos de planejamento e de ordenamento do uso das áreas agrícolas afetadas pela problemática das erosões lineares e dos areais a elas associados.

REFERÊNCIAS

- AB'SABER, A.N. A revanche dos ventos: destruição de solos areníticos e formação de areais na Campanha Gaúcha. **Ciência & Ambiente**, Santa Maria, v. 11, p. 7-31, jul./dez. 1995.
- ALVES, F. C. **Análise Morfoestrutural da bacia dos Rios Paraíba e Mamanguape (PB), com base em MDE-SRTM e Imagem Palsar/Alos-1**. 181 f. 2015. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto. Ministério da Ciência, Tecnologia e Informação. Instituto de Pesquisas Espaciais.
- ADAMS, J. Active tilting of the United States midcontinent: geodetic and geomorphic evidence. **Geology**, v. 8, p. 442-446, 1980.
- ANDRADES-FILHO, C. de O.; GUASSELLI, L. A.; SUERTEGARAY, D. M. Investigação sobre a relação entre lineamentos estruturais e a ocorrência de areais no sudoeste do Rio Grande do Sul. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, 12., 2007, Natal. **Anais...** Natal: Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2007. p. 243-257.
- ANDRADES-FILHO, C. de O.; GUASSELLI, L. A.; SUERTEGARAY, D. M. Arenização no sudoeste do Rio Grande do Sul: investigação sobre a relação entre areais, drenagem e orientação do relevo. *In*: **VI Simpósio Nacional de Geomorfologia**, 2006, Goiás. Disponível em: <http://lsie.unb.br/ugb/sinageo/6/10/411.pdf>.
- AZEVEDO, A. C.; KAMINSKI, J. Considerações sobre os solos dos campos de areia no Rio Grande do Sul. **Ciência & Ambiente**, Santa Maria, v.11, p. 65-70, jul./dez. 1995.
- BACCARO, C. A. D. Processos erosivos no domínio do Cerrado. *In*: GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S. da; BOTELHO, R. G. M. **Erosão e conservação dos solos**. 6ª ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2010. 340p.
- BADGLEY P. C. (1965). **Structural and Tectonic Principles**. New York: Harper & Row Publishers. 521 p.
- BAHIA, V. G.; CURI, N.; CARMO, D. N. Fundamentos da erosão do solo. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 16, n. 176, p. 25-31, 1992.
- BEAVIS, S. G. Structural controls on the orientation of erosion gullies in mid-western New South Wales, Australia. **Geomorphology**, v. 33, p. 59-72, 2000.
- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. 5. ed. São Paulo: Ícone, 2005. 355 p.
- BINDA, A. L. **Eventos Hidrológicos Extremos e Morfodinâmica Fluvial em Área Afetada por Processos de Arenização no Sudoeste do Rio Grande do Sul – Bacia Hidrográfica do Arroio Miracatu**. 293 f. 2016. Tese de Doutorado –

Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

BIGARELLA, J. J. *et al.* **Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais**. v. 3. Florianópolis: Editora da UFSC, 2007.

BIZZI, L. A.; SCHOBENHAUS, C.; VIDOTTI, R. M.; GONÇALVES, J. H. (Orgs.) **Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil**: texto, mapas & SIG. Brasília: CPRM – Serviço Geológico do Brasil, 2003. 692 p.

BORTOLUZZI, C. A. Contribuição à Geologia da Região de Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil. **Pesquisas**, Instituto de Geociências da UFRGS, Porto Alegre. v. 4, p. 7-86, 1974.

CORBONNOIS, J.; VERDUM, R. L'érosion des sols sableux dans les campos du sud du Brésil (bassin de l'Ibicui, Rio Grande do Sul). **Géomorphologie**: relief, processus, environnement, v. 1, p. 53-64, 2011.

CARRARO, C. C.; GAMERMANN, N.; EICK, N. C.; BORTOLUZZI, C. A.; JOST, H.; PINTO, J. F. Mapa Geológico do Estado do Rio Grande do Sul. **Pesquisas**, Porto Alegre, v. 8, p. 1-29, 1974.

CAREY, B. **Erosion Gully**. 2006. Disponível em: <http://www.derm.qld.gov.au/factsheets/pdf/land/l81.pdf>. Acesso em: 19 de novembro de 2018.

CASSOL, E. A.; LIMA, V. S. Erosão em entressulcos sob diferentes tipos de preparo e manejo do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 38, n. 1, 2003, p. 117-124.

CASSOL, E. A. **Erosão do Solo**. Porto Alegre: UFRGS, Faculdade de Agronomia, Departamento de Solos, 2007. 20 p. Notas de Aula da disciplina AGR 03006 – Erosão e Conservação do Solo.

CENTRO ESTADUAL DE PESQUISAS EM SENSORIAMENTO REMOTO E METEOROLOGIA (Rio Grande do Sul). **Mapa de Unidades Geomorfológicas do Rio Grande do Sul**. Disponível em: <https://atlassocioeconomico.rs.gov.br/midia/imagem/unidadesgeomorfologics>. 2001. Acesso em: 14 ago. 2015.

Christofoletti, A. **Geomorfologia**. São Paulo: Edgard Blücher, 1980. 188p.

COLLISCHONN, Erika. **Inundações em Venâncio Aires/RS**: Interações entre as dinâmicas natural e social na formação de riscos socioambientais urbanos. 2009 (Tese de Doutorado em Geografia) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

CORDEIRO, C. de A.; SOARES, L. de C. A erosão nos solos arenosos da região Sudoeste do Rio Grande do Sul. **Brás. Geográfica**, Rio de Janeiro, v. 39, n. 4, p. 31-150, 1977.

COSTA, J. B. S.; HASUI, Y.; PINHEIRO, R. V. L. **Bacias sedimentares**: aspectos gerais da geometria, desenvolvimento, preenchimento e inversão. Belém: Editora da UFPA, 1992. 106 p.

CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL (Rio Grande do Sul). **Mapa Geológico do Estado do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre, julho de 2006. Escala 1:750.000.

CROWLEY, T. J.; NORTH, G. R. **Paleoclimatology**. New York: Oxford University Press, 1991. 339 p.

DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA (São Paulo). **Controle de erosão**: bases conceituais e técnicas; diretrizes para o planejamento urbano e regional; orientações para o controle de voçorocas urbanas. São Paulo: DAEE/IPT, 1989. 92p.

DEFFONTAINES, B.; CHOROWICZ, J. Principles of drainage basin analysis from multisource data: application to the structural analysis of the Zaire Basin. **Tectonophysics**, v. 194, n. 3, p. 237-263, 1991.

DENARDIN, J. E.; KOCHHANN, R. A.; FLORES, C. A.; FERREIRA, T. N.; CASSOL, E. A.; MONDARDO, A. & SCHWARZ, R. A. Manejo de enxurrada em sistemas plantio direto. *In: Fórum Estadual de Solo e Água*, Porto Alegre, RS, 2005. 88p

DOORNKAMP, J. C. Geomorphological approaches to the study of neotectonics. **Journal of the geological society**, v. 143, p. 335-342, 1986.

DORAN, J. W. Soil Quality and Sustainability. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO*, 26, 1997, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: EMBRAPA, 1997. CD-ROM.

DUMMER, Juliana. **Voçorocas no Meio Rural**: Um Diagnóstico de Processos Erosivos no Município de Chувиска, RS. 112 f. 2011. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso de Bacharelado em Geografia) – Instituto de Ciências Humanas, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2011.

DUMMER, Juliana.; KOESTER, Edinei.; BRUCH, Alexandre. F. Levantamento Geológico Visando Estudo Sobre Erosão do Solo no Município de Chувиска, RS. **Anais do XVI Encontro Nacional de Geografia**, Porto Alegre, nº 1296, 2010.

DUMMER, Juliana. **Análise dos Condicionantes do Meio e dos Usos Agrícolas na Ocorrência de Erosão Linear no Município de Chувиска, RS**. 90 f. 2014. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

DURY, H. G. Tidal Stream Action and Valley Meanders. **Geographical Research**, 1969.

EGBOKA, B.; NWANKWOR, G.; ORAJAKA, I. Implications of Paleo- and

Neotectonics in Gully Erosion - Prone Areas of Southeastern Nigeria. **Natural Hazards**, Netherlands, v. 3, p. 219-231, 1990.

ELLISON, W. D. Soil erosion studies. Part II: Soil detachment hazard by raindrop splash. **Agric. Eng.**, 28:197-201, 1947.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (Rio de Janeiro). **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, 2006. 306p.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (Rio de Janeiro). **Recuperação de Voçorocas em Áreas Rurais**. Rio de Janeiro, 2006. Disponível em: <http://www.cnpab.EMBRAPA.br/publicacoes/sistemasdeproducao/vocoroca/recuperacao.htm>. Acesso em: 17 março de 2018.

ETCHEBEHERE, M. L. C. **Terraços neo-quaternários no vale do rio do Peixe, planalto ocidental paulista**: Implicações estratigráficas e tectônicas. 2000. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Rio Claro, 2000.

FOSSEN, H. **Structural geology**. Cambridge: Cambridge University Press, 2010. 362 p.

FRASCA, A. A. S.; SEMELMANN, F. R.; LISBOA, N. A.. O Controle Morfotectônico e Morfoestrutural na Localização de Areais Demonstrado em Imagens Digitais Landsat-TM5 Processadas. **Anais do X Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. Foz do Iguaçu, abril, 2001, INPE, p. 271-273 (Sessão Pôster)

FUJITA, R. H; GON, P. P; STEVAUX, J. C; SANTOS, M. L; ETCHEBEHERE, M. L. C. Perfil longitudinal e a aplicação do índice de gradiente (RDE) no rio dos Patos, bacia hidrográfica do rio Ivaí, PR. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 4, n. 41, dezembro de 2011. p. 597-603.

GLADCZENKO, T. P.; HINZ, K.; ELDHOIM, O.; MEYER, H.; NEBEN, S.; SKOGSEID, J. South Atlantic volcanic margins. **Journal of the Geological Society of London**, v. 154, p. 465-470, 1997.

GONTIJO, A. H. F. **Morfotectônica do médio vale do rio Paraíba do Sul**: região da serra da Bocaina, Estados de São Paulo e Rio de Janeiro. 1999. Tese (Doutorado em Geologia) – Universidade Estadual de São Paulo, Rio Claro, 1999.

GOUDIE, A. S. **Encyclopedia of geomorphology**. International Association of Geomorphologists. London: Taylor and Francis Group, 2004. 1202 p.

GUASSELLI, L. A., SUERTEGARAY, D. M. A.; OLIVEIRA, M. G.; SIRANGELO, F.; EVERS, H. Relação entre a Ocorrência de Areais e os Arenitos da Formação Botucatu e Guará no Sudoeste do Estado do Rio Grande do Sul, Brasil. **Anais do VIII Simpósio Nacional de Geomorfologia I Encontro Ibero-americano de Geomorfologia e III Encontro Latino Americano de Geomorfologia**. Disponível em: <http://sie.unb.br/ugb/sinageo/8/7/10.pdf>. Acesso em: 03 maio 2018.

- GUASSELLI, Laurindo Antônio. O mapeamento de areias a partir de sensoriamento remoto. *In*: SUERTEGARAY, D. M. A.; SILVA, L. A. P. da; GUASSELLI, L. A. (Org.). **Arenização Natureza Socializada**. Porto Alegre: Compasso Lugar – Cultura / Imprensa Livre, 2012, p. 97-123.
- GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S.; BOTELHO, R. G. M. **Erosão e Conservação dos Solos**: aplicações, temas e conceitos. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2005. 340p.
- GUERRA, A. J. T., ARAUJO, G. H. S., ALMEIDA, J. R. **Gestão Ambiental de Áreas Degradadas**. 2. ed. Rio de Janeiro: Bertrand, 2007. 320p.
- HACK, J. T. Stream-profile analysis and stream-gradient. Index. **U.S. Geol. Survey Jour. Research**, v. 1, n. 4, p. 421-429, 1973.
- HOWARD, A. D. Drainage analysis in geologic interpretation: a summation. **American Association of Petroleum Geologists Bulletin**, v. 51, n. 11, p. 2.246-2.259, 1967.
- FAO-ONU. Informe da Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (2015)**. Disponível em: <http://www.fao.org/3/a-i5199e.pdf>. Acesso em: 13 nov. 2016.
- KELLER, E. A.; PINTER, N. **Active tectonics**: earthquakes, uplift, and landscape. New Jersey: Prentice Hall, 1996. 362p.
- KLAMT, E.; SCHNEIDER, P. Solos suscetíveis à erosão eólica e hídrica na região da Campanha do Rio Grande do Sul. **Ciência & Ambiente**, Santa Maria, v. 11, p. 71-80, jul./dez. 1995.
- LUINZ, V. **Contribuição à geologia dos derrames basálticos do sul do Brasil**. Rio de Janeiro: DNPM, 1949. 52p.
- MALIK, J. N., MOHANTY, C.. Active tectonic influence on the evolution of drainage and landscape: Geomorphic signatures from frontal and hinterland areas along Northwestern Himalaya, India. **Journal of Asian Earth Sciences**, v. 29, n. 5-6, p. 604-618, 2007.
- MANTELLI, L. R.; ROSSETTI, D. F. Significado tectônico de lineamentos de drenagem no sudoeste da Ilha do Marajó. **Geociências**, v. 39, n. 1, p. 42-54, 2009.
- MATTOS, J. T. de; JIMÉNEZ-RUEDA, J. R.; OHARA, T.; MENDES, M. L. de B.; SANTANA, M. A. Critérios para mapeamento de classes de risco a erosão de solos em imagem TM-Landsat. *In*: SIMPOSIO LATINOAMERICANO DE PERCEPCIÓN REMOTA, n. 9, Cochabamba. **Anais do...** Cochabamba: SELPER, 2002.

MEDEIROS, E. R.; PEDRON, F. A.; REINERT, D. J.; SCCOTI, A. A. V. Filiação entre arenitos da Formação Guará e sua cobertura pedológica no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, n. 37, p. 555-564, maio/jun. 2013.

MEYER, L. D.; FOSTER, G. R.; NIKOLOV, S. Effect of flow rate and canopy on rill erosion. **Trans. Of the ASAE**, St. Joseph, v. 18, n. 5, 1975.

MILANI, E. J. Geodinâmica Fanerozóica do Gondwana Sul-Occidental e a Evolução Geológica da Bacia do Paraná. *In*: HOLZ, M.; DE ROS, L. V. **Geologia do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: CIGO/UFRGS, 2002. p. 275-302.

MORINAGA, M. S.; JIMÉNEZ-RUEDA, J. R. Análise morfoestrutural aplicada para avaliação de suscetibilidade à degradação ambiental por erosões hídricas lineares no interior do Estado de São Paulo. **Geologia USP - Série Científica**, v. 15, p. 45-56, 2015. doi: 10.11606/issn.2316-9095.v15i1p45-56.

NÚCLEO DE GEOTECNIA - UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA.

Geologia Capítulo 9. Disponível em:

<http://www.ufjf.br/nugeo/files/2009/11/Geologia-Cap9.pdf>. Acesso: 05 mar. 2017.

ANEJIONU, Obinna, C. D., NWILO, Peter C. ; EBINNE, Elijah S.. Long Term Assessment and Mapping of Erosion Hotspots in South East Nigeria. **FIG Working Week 2013 Environment for Sustainability**, Abuja, Nigéria, 2013. Disponível em: https://www.fig.net/resources/proceedings/fig_proceedings/fig2013/papers/TS03B/TS03B_anejionu_nwilo_et_al_6448.pdf. Acesso em: 18 mar. 2017.

O'LEARY, D. W.; FRIEDMAN, J. D.; POHN, H. A. Lineament, linear, lineation: some proposed new standards for old terms. **GSA Bulletin**, v. 87, p. 1.463-1.469, 1976.

PHILLIPS, L. F.; SCHUMM, S. A. Effect of regional slope on drainage networks. **Geology**, v. 15, p. 813-816, 1987.

PLUIJM, B. A.; MARSHAK, S. **Earth structure**: an introduction to structural geology and tectonics. 2 ed., 2004. 656 p.

RAMALHO, M. F. J. L. **Geomorfologia e Dinâmica Ambiental**: vale do rio Pitimbu. Natal: Imagem Gráfica, 2003. 87p.

ROBAINA, L. E. S.; TRENTIN, ROMARIO; VERDUM, ROBERTO; CORBONNOIS, JEANNINE. Pavimento de Concreções Ferruginosas no Areal do Caraguataí, Bacia do Ibicuí, RS. **Boletim Gaúcho de Geografia**, v. 42, p. 689-700, 2015.

SALAMUNI, Eduardo; EBERT, Hans Dirk; HASUI, Yociteru. Morfotectônica da Bacia Sedimentar de Curitiba. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo. v. 34, n. 4, p. 469-478, 2004.

Scherer, C. M. S.; Lavina, E. L. C. Sedimentary cycles and facies architecture of aeolian-fluvial strata of the Upper Jurassic Guará Formation, Southern Brazil. **Sedimentology**, Amsterdam, v. 52, p. 1323-1341. 2005.

Scherer, C. M. S.; Lavina, E. L. C. Stratigraphic evolution of fluvial-eolian succession: the example of the Upper Jurassic-Lower Cretaceous Guar and Batucada formations, Paraná Basin, Southern Brazil. **Gondwana Research**, v. 9, p. 475-484, 2005.

SCOPEL, I.; SUERTEGARAY, D. M. A.; SOUSA, M. S.; PEIXINHO, D. M.; FERREIRA, D. M. Neossolos quartzarênicos órticos das áreas de areais do sudoeste do Rio Grande do Sul: características físicas e morfológicas. *In*: SUERTEGARAY, D. M. A.; SILVA, L. A. P.; GUASSELLI, L. A. (Orgs.). **Arenização: natureza socializada**. Porto Alegre, RS: Compasso Lugar-Cultura/Imprensa Livre, 2012. p. 503-540.

SEEBER, L.; GORNITZ, V. River profiles along the Himalayan arc as indicators of active tectonics. **Tectonophysics**, Amsterdã, v. 92, p. 335-367, 1983.

SILVA, T. M.; MONTEIRO, H. S.; CRUZ, M. A.; MOURA, J. R. S. **Anomalias de Drenagem e Evolução da paisagem no Médio Vale do Rio Paraíba do Sul (RJ/SP)**. Rio de Janeiro: UFRJ, 2006.

SILVA, T. P. da.; SALGADO, C. M.; GONTIJO, A. H. F.; MOURA, J. R. da S. de. A influência de aspectos geológicos na erosão linear - médio-baixo vale do Ribeirão do Secretário, Paty do Alferes (RJ). **Geosul**, Florianópolis, v. 18, n. 36, p. 131-150, jul./dez. 2003.

SILVA, T. A. Análise dos Processos Erosivos Lineares – Ravinas e Voçorocas entre os Municípios de Nazareno e São João del Rei – MG. **Anais do Simpósio Mineiro de Geografia**, Alfenas. Maio de 2014. ISBN: 978-85-99907-05-4

SOARES, P. C.; FIORI, A. P. Lógica e sistemática na análise e interpretação de fotografias aéreas em geologia. **Notícia Geomorfológica**, v. 16, p. 71-104, 1976.

SCHUMM, S. A.; DUMONT, J. F.; HOLBROOK, J. M. **Active tectonics and alluvial Rivers**. Cambridge University Press, Cambridge, 2000. 401 p.

STRECK, E. V.; KÄMPF, N.; DALMOLIN, R. S. D.; KLAMT, E.; NASCIMENTO, P. C.; SCHNEIDER, P.; GIASSON, E.; PINTO, L. F. S. **Solos do Rio Grande do Sul**. 2. ed. Porto Alegre, RS: EMATER/RS-ASCAR, 2008. 222p.

SUMMERFIELD, M. A. **Global Geomorphology: an introduction to the study of landforms**. New York: Longman Scientific & Technical, 1991. 537 p.

SUERTEGARAY, Dirce Maria Antunes. **Trajétoria da natureza: um estudo geomorfológico sobre os areais de Quaraí/RS**. Tese (Doutorado em Geografia) – Programa de Pós-Graduação em Geografia Física (FFLCH), Universidade de São Paulo, São Paulo, 1987.

SUERTEGARAY, D. M. A.; VERDUM, R.; MEDEIROS, R. M.; GUASSELLI, L.; FRANK, M. W. Caracterização Hidrogeomorfológica e Usos o Solo em Áreas de Ocorrência de Areais: São Francisco de Assis/Manuel Viana. **Anais VIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Salvador, 14-19 abril 1996, p. 663-669.

SUERTEGARAY, D. M. A.; GUASSELLI, L. A. & VERDUM, R. (Org.) **Atlas da Arenização**: sudoeste do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: Secretaria da Coordenação e Planejamento do Governo do Estado do Rio Grande do Sul, 2001, v. 1. Mapas, 84 p.

TEIXEIRA, W.; TAIOLI, F.; FAIRCHILD, T. **Decifrando a Terra**. 2 ed. São Paulo: Oficina de Artes, 2009. 557 p.

TEODORO, V, L. I.; TEXEIRA, D.; COSTA, D. J. L.; FULLER, B. B. O conceito de bacia hidrográfica e a importância da caracterização morfométrica para o entendimento da dinâmica ambiental local. **Revista UNIARA**, Araraquara, n. 20, p. 137-156, 2007.

TEREZO, C. F. **Novo Dicionário de Geografia**. [s.l.]: Livroporto. 2º edição, 2008. 216 p.

TRAININI, D. R. **A Influência da Neotectônica no Assoreamento de Bacias Hidrográficas**. Porto Alegre: CPRM, 2005.

TRENTIN, R.; ROBAINA, L. E. de S. Unidades Litológicas da Bacia Hidrográfica do Rio Itu, Oeste do Rio Grande do Sul. **Ciência e Natura**, Santa Maria: UFSM, v. 28, n. 2, p. 67-84, 2006.

TRICART, J. **Ecodinâmica**. Rio de Janeiro: IBGE, 1977.

UAGODA, R. E. S.; SUERTEGARAY, D. M. A. Degraus de Abatimento: exercício científico acerca de sua gênese. *In*: **V Simpósio Nacional de Geomorfologia e I Encontro Sul-Americano de Geomorfologia**. Santa Maria: UFSM, 2004

United Nations Convention To Combat Desertification (UNCCD). UN Conference on Desertification Concludes with Success, Bonn, Germany, 19 April 2013. Disponível em: <https://www.unccd.int/news-events/un-conference-desertification-concludes-success>. Acesso em: 10 maio 2017.

VEIGA, P. **Estudo dos arenitos “intertrapps” da Formação Serra Geral na região de Santa Maria**. 1973. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Geociências-, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1973.

VALENTIN, C.; POESEM, J.; YOUNG, L. I. Gully erosion: Impacts, factors and control. **Catena**, v. 63, p. 132-153, 2005.

VALERIANO, M. de M. **Topodata guia para utilização de dados Geomorfológicos locais**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos. 73p, 2008. Disponível em: http://www.dsr.inpe.br/topodata/data/guia_utilizacao_topodata.pdf. Acesso: 05 jun. 2011.

VERDUM, R. Descoberta permanente: das areias aos areais. *In*: SUERTEGARAY, Dirce Maria Antunes; PIRES DA SILVA, Luis Alberto; GUASSELLI, Laurindo Antônio.

(Org.). **Arenização**: natureza socializada. Porto Alegre: Compasso Lugar-Cultura & Imprensa Livre, 2012, p. 73-83.

VERDUM, R.; SUERTEGARAY, D. M. A. A morfodinâmica dos areais: os processos e as formas no presente. O tempo que faz (weathering). *In*: SUERTEGARAY, Dirce Maria Antunes; PIRES DA SILVA, Luis Alberto; GUASSELLI, Laurindo Antônio. (Org.). **Arenização**: natureza socializada. Porto Alegre: Compasso Lugar-Cultura & Imprensa Livre, 2012, p. 173-183.

VERDUM, R. Depressão Periférica e Planalto. Potencial ecológico e utilização social da natureza. *In*: VERDUM, Roberto; BASSO, Luis Alberto; SUERTEGARAY, Dirce Maria Antunes. (Org.). **Rio Grande do Sul - paisagens e territórios em transformação**. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2004, p. 39-57.

VERDUM, R. **Approche géographique des “déserts” dans les communes de São Francisco de Assis et Manuel Viana, État du Rio Grande do Sul, Brésil. 1997**. 211 f. Tese (Doutorado) - UFR de Géographie et Aménagement, Université de Toulouse Le Mirail, Toulouse, 1997.

VIEIRA, C. L. **Caracterização Geomorfológica, análise ambiental integrada e avaliação do potencial de resiliência em solos arenosos no sudoeste do RS, Brasil**. 258 f. 2018. Tese (Doutorado em Ciências) - Programa de Pós-Graduação em Geografia, UFRJ, Rio de Janeiro, 2018.

VIERO, A. C. Geodiversidade do estado do Rio Grande do Sul *In*: VIERO, A. C.; SILVA, D.R.A. da (Org.). **Geodiversidade do Estado do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: CPRM, 2010. 250 p.

VIERO, A. C. **Análise da geologia, geomorfologia e solos no processo de erosão por voçorocas**: Bacia do Taboão, RS. 129 f. 2004. Dissertação. (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, UFRGS, Porto Alegre, 2004.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning. **Agriculture Handbook**, v. 537. Washington: United States Department of Agriculture, 1978. 58 p.