

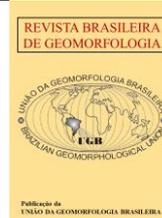


<https://rbgeomorfologia.org.br/>  
ISSN 2236-5664

## Revista Brasileira de Geomorfologia

v. 24, nº ESPECIAL (2023)

<http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v24i00.2318>



Artigo de Pesquisa

# Controle estrutural nos processos erosivos hídricos e na arenização, bacia hidrográfica do Arroio Miracatu - Rio Grande do Sul

*Structural control in water erosive processes and sandization, Arroio Miracatu hydrographic basin - Rio Grande do Sul*

Juliana Dummer<sup>1</sup> e Roberto Verдум<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal do Rio Grande do Sul, PPG em Geografia (POSGEA)/IGEO, Porto Alegre, Brasil. [dummerjuliana@hotmail.com](mailto:dummerjuliana@hotmail.com).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0108-5128>

<sup>2</sup> Universidade Federal do Rio Grande do Sul, PPG em Geografia (POSGEA)/IGEO, Porto Alegre, Brasil. [verдум@ufrgs.br](mailto:verдум@ufrgs.br).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0528-4343>

Recebido: 11/11/2022; Aceito: 17/10/2023; Publicado: 04/12/2023

**Resumo:** No oeste do Rio Grande do Sul, em Manoel Viana e São Francisco de Assis, há a ocorrência de ravinas e voçorocas, associadas às formações superficiais e aos areais, processo este conhecido como arenização. Os areais se contrapõem à noção de “deserto ou núcleos de desertificação”, relacionados ao uso inadequado do solo, quando da expansão agrícola, a partir dos anos 1970. Neste sentido, objetiva-se analisar os aspectos relacionados aos contextos litológicos, pedológicos e morfoestruturais, na gênese dos processos erosivos hídricos. A área de estudo é a Bacia Hidrográfica do Arroio Miracatu, 61.584 ha, sendo que a pesquisa se desenvolve em três etapas: a) a análise da degradação dos solos por processos erosivos hídricos lineares; b) das anomalias e dos parâmetros morfométricos; c) dos processos erosivos lineares associados às litologias, aos solos e aos lineamentos. Como resultados, identifica-se que há uma dinâmica erosiva associada ao controle morfoestrutural, sobretudo com a exposição das Formações Guará e Botucatu, associadas à morfologia do tipo *horst*. Nas áreas de intersecção de lineamentos de porte médio há uma maior densidade erosiva e, conseqüentemente, a presença dos areais, evidenciando a relação entre: lineamentos - processos erosivos hídricos - areais.

**Palavras-chave:** areais; formações superficiais Quaternárias; lineamentos tectônicos; ravinas; voçorocas.

**Abstract:** In the western region of Rio Grande do Sul state, Brazil, in the municipalities Manoel Viana and São Francisco de Assis, there is a significant occurrence of ravines and gullies, associated with surface formations that generate sand, a process known as sandization. These sands contrast with the notion of “desert or desertification nuclei”, which are related to improper land use during the agricultural expansion since the 1970s. In this context, the objective is to analyze aspects related to lithological, pedological, and morphostructural contexts in the genesis of hydro-erosive processes. The study area is the Miracatu Stream watershed, covering 61,584 hectares, and the research is divided into three stages: a) the analysis of soil degradation by linear water erosion processes; b) anomalies and morphometric parameters; c) erosive processes, relating them to lithologies, soils and lineaments. As a result, it is identified an erosive dynamic associated with morphostructural control, being identified lithologies in discordant altimetric positions. The exposure of the Guará and Botucatu Formations, demonstrates that this lithological exposure is related to the horst-type morphology. In the areas of intersection of medium-sized lineaments there is a greater erosive density and, consequently, the presence of sands, evidencing the relationship between: lineaments - water erosion processes - sands.

**Keywords:** sands; Quaternary surface formations; tectonic lineaments; ravines; gullies.

## 1. Introdução

No contexto das pesquisas geomorfológicas, os conhecimentos relativos à tectônica e às litologias são fundamentais na compreensão dos processos erosivos, pois permitem identificar as características geológicas que predisõem uma região a diferentes tipos de erosão, incluindo a erosão linear (GUTIÉRREZ; SCHNABEL; FELICÍSIMO, 2009; BONZANINI; LUPINACCI; SANCHES, 2022). Neste sentido, a importância de tratar a relação entre os lineamentos estruturais e a erosão linear é notável, uma vez que essas feições geológicas podem atuar como condicionantes diretos, que induzem o fluxo de água superficial e subsuperficial e, conseqüentemente, a geração de ravinas e voçorocas (COELHO NETTO, 2003). As dificuldades em compreender plenamente a relação entre lineamentos estruturais, litologia e erosão linear residem na complexidade das interações entre esses fatores geológicos, tornando crucial uma investigação detalhada que leve em consideração as nuances geológicas e geomorfológicas específicas de cada área de estudo.

Na região oeste do Rio Grande do Sul, nos municípios de São Francisco de Assis, Manoel Viana e Alegrete, a expansão das atividades agrícolas, sobretudo, do monocultivo da soja, a partir dos anos 1970, intensificou o processo de arenização, associado à erosão (VERDUM, 1997; SUERTEGARAY et al. 2001, SUERTEGARAY et al. 2012). O uso inadequado do solo desenvolve uma crise erosiva nas bacias hidrográficas, sendo que esta dinâmica de forte escoamento concentrado gera um aprofundamento do canal principal, o que, por sua vez, dá início aos processos de ravinamento e voçorocamento. Esta associação induz estes fenômenos de degradação pedológica, 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 não houve exploração agrícola por monocultivos, o que indicou a necessidade de aprofundamento dos estudos relativos às fragilidades do meio aos processos erosivos.

Diante do exposto, a respeito da problemática na área de estudo, se buscou, entre os anos de 2015 e 2019, realizar estudos em escalas espaciais de maior detalhe, na região. Neste sentido foi feito um detalhamento, no que diz respeito aos condicionantes litológicos, pedológicos e tectônicos, relacionados à gênese dos processos erosivos hídricos concentrados, na forma de ravinas e de voçorocas (DUMMER, 2019). O objetivo principal foi investigar os condicionantes tectônico e litológico, por meio do estudo dos lineamentos estruturais de maior escala, assim como da sua relação com a localização e o desenvolvimento da erosão linear (ravinas e voçorocas). Cabe destacar que nesta pesquisa se diferencia os conceitos de ravina e voçoroca, pelo potencial erosivo dos processos hídricos associados somente à pluviometria, no primeiro conceito, e pluviometria associada ao escoamento de subsuperfície no segundo, conforme a caracterização estabelecida por Verdum (1997) na área de estudo.

## 2. Materiais e Métodos

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. 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, 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 Manoel 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 morfoestruturais.

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 obtenção do Modelo Digital de Elevação (MDE) e para a identificação e a delimitação de feições do relevo, foi utilizado o conjunto de dados SRTM (90 m) e TOPODATA (30 m) (VALERIANO; ROSSETTI, 2012).

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 de drenagem 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.

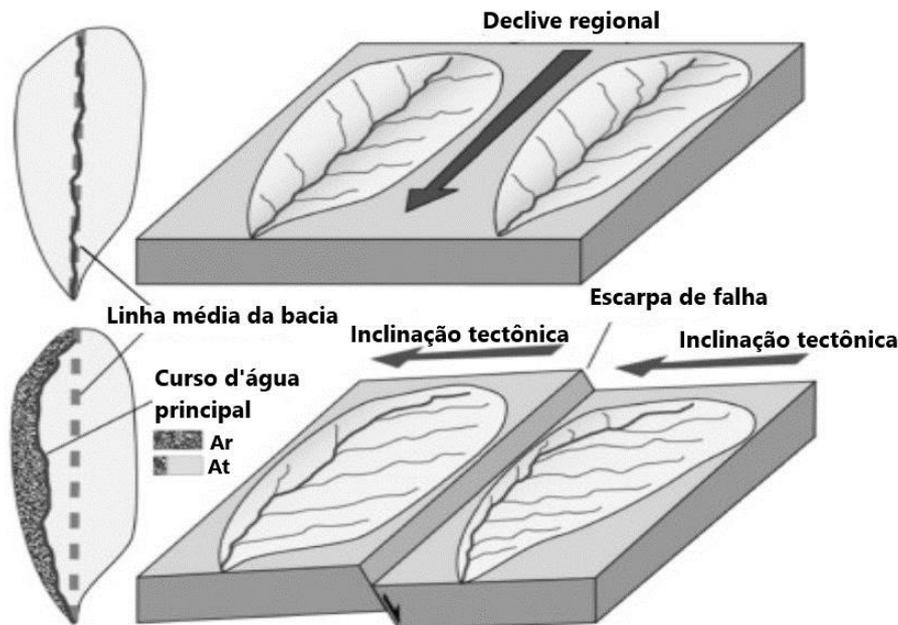
Em relação à caracterização morfométrica, foram utilizados os procedimentos executados em análises hidrológicas e ambientais, que revelam os indicadores físicos específicos do entendimento da dinâmica de uma bacia. Assim, foram utilizados: o Índice de Circularidade (*IC*); o Índice de Sinuosidade (*IS*); 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 *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 *IS* 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 *FABD*, introduzido por Hare e Gardner (1985), 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

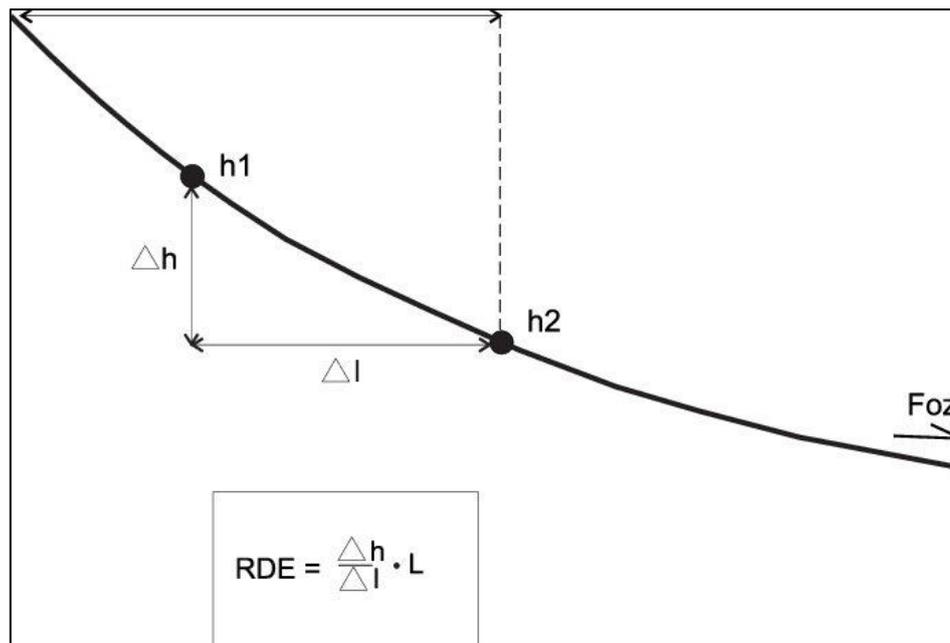
(Figura 1). Este índice é alcançado, por meio da aplicação da equação  $FA = 100 \times \frac{Ar}{At}$ , em que  $Ar$  é a área da bacia, à direita do rio (em direção à jusante) e  $At$  é a área total da bacia. O *FSTT*, introduzido por Cox (1994) corresponde à assimetria do perfil topográfico transversal 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 1.** Resposta da drenagem em relação à elevação, ao longo de uma escarpa de falha, por migração lateral do curso d'água principal.  $Ar$  é a área da bacia à direita, visada a jusante do fluxo principal, e  $At$  é a área total da bacia de drenagem. Fonte: modificada de Mahmood e Gloaguen (2012).

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.

O índice *SL* (*stream length-gradient index*), comumente referenciado como *RDE* no Brasil (Figura 2), 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:  $\Delta h$  (diferença altimétrica do trecho selecionado para a análise),  $\Delta l$  (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 2).



**Figura 2.** 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;  $\Delta h$  = diferença de altitude entre duas isoípsas subsequentes; e  $\Delta l$  = projeção horizontal do comprimento do segmento de drenagem entre duas isoípsas subsequentes. Fonte: Etchebehere et al. (2004).

Alguns autores propuseram modificações no cálculo e aplicação do método RDE para a interpretação de distintos graus de controle estrutural. Seeber e Gornitz (1983) sugeriram a comparação dos valores do índice RDE para segmentos fluviais analisados com um valor designado para todo o canal fluvial, formulado pela amplitude de relevo dividido logaritmo natural do comprimento do canal, o qual representaria o índice RDE do rio em sua totalidade (RDE total), abrangendo desde sua nascente até sua desembocadura ou até a confluência com um rio de maior extensão. Etchebehere et al. (2004) e Fujita et al. (2011) sugerem que a razão entre RDE/RDE total 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. 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 (ETCHEBEHERE et al., 2004; FUJITA et al., 2011).

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 compilado, 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 cartografia de fotolineamentos (drenagem, estruturas litológicas, formas de relevo e processos erosivos), 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.

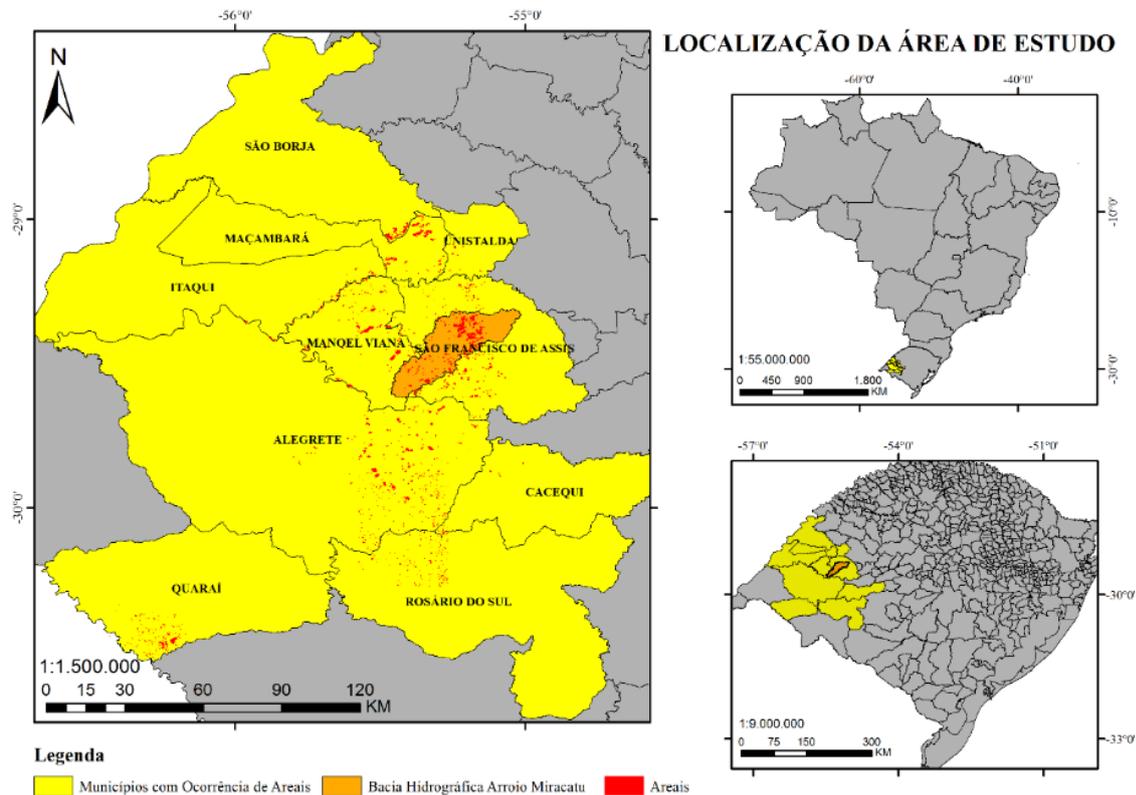
A associação dos processos erosivos com os lineamentos registrados em campo e por fotoanálise, por sua vez, ocorre em duas escalas de análise. Em uma escala de menor detalhe (1:150.000), em nível de bacia, se produziu o mapa de densidade de processos erosivos lineares da bacia, em confrontação com os 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 foi gerado automaticamente, pelo programa ArcGIS®, sendo realizada a contagem das feições, dentro de um raio de 5 km<sup>2</sup>.

### 3. Resultados

#### 3.1. Evidências pedológicas, litológicas e tectônicas na Bacia Hidrográfica do Arroio Miracatu

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 superfície de 61.584 ha (Figura 3). Como indícios do controle tectônico nessa bacia, foram identificadas litologias em posição altimétrica discordante da posição estratigráfica de referência, mostrando 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, formação Guará do Jurássico superior, em cotas altimétricas iguais ou próximas das formações Botucatu (do Jurássico superior/Cretáceo inferior) e Serra Geral (Cretáceo inferior). O soerguimento da Formação Guará, entre a Formação Botucatu, em porções bem delimitadas, na bacia, também se associa à presença de *necks* vulcânicos (Figura 4).

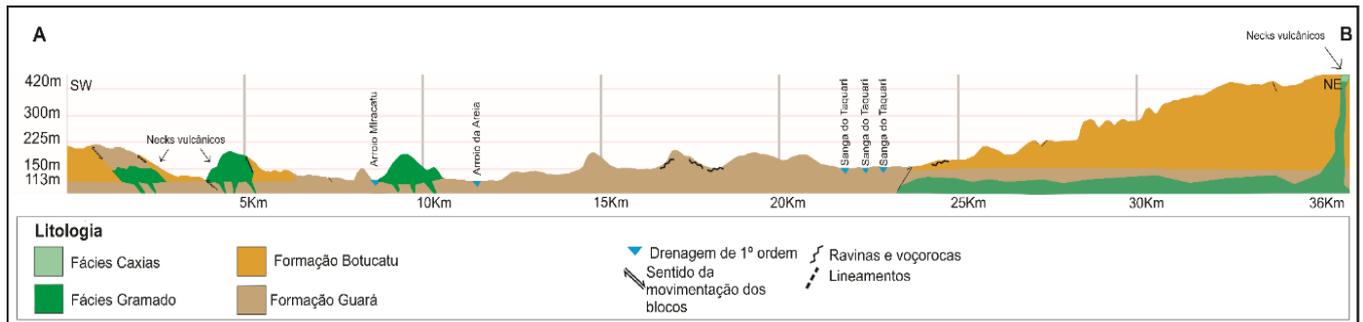


**Figura 3.** Localização da área de ocorrência de areais no Estado do Rio Grande do Sul e da Bacia Hidrográfica do Arroio Miracatu (A), no Brasil (B) e Estado do Rio Grande do Sul (C). Fonte: Guasselli (2012), a partir de mapas modificados do IBGE.

A análise de perfis de elevação, com a sobreposição do mapeamento geológico, possibilitou identificar as discordâncias altimétricas, em relação à posição estratigráfica das formações litológicas. Na Figura 4, observa-se que a Formação Botucatu aflora em cota acima de 200 m, por vezes igualada, altimetricamente, às rochas vulcânicas da Fácies Gramado (Formação Serra Geral). 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.

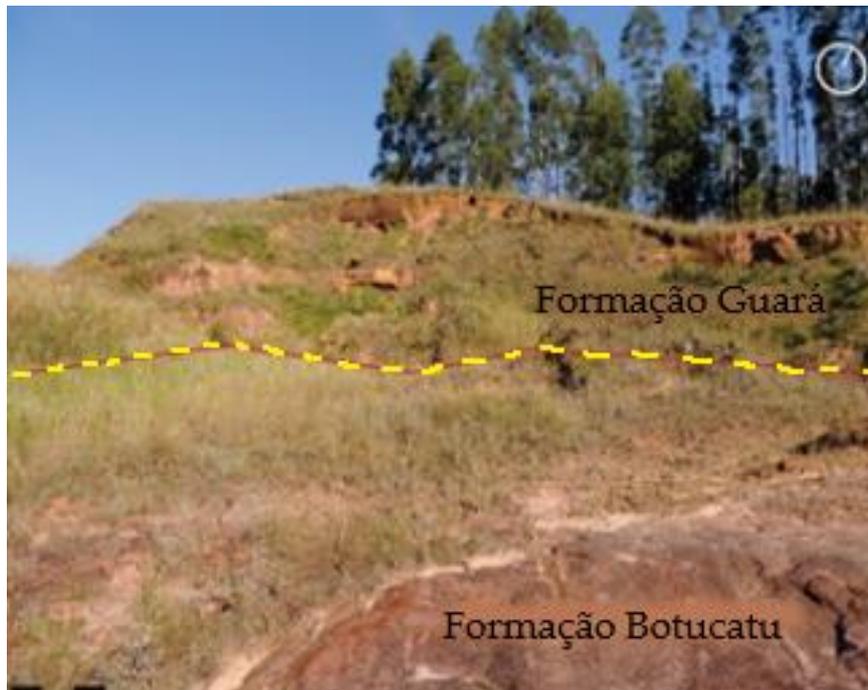
De sudoeste para nordeste, nota-se, entre 0 e 4 km, o soerguimento da Formação Guará, em meio à Botucatu, o que se relaciona à presença de um *neck* vulcânico, como aqueles que afloram entre 4 e 11 km, já observados por Verdum (1997), na área da bacia. Entre 4 e 11 km, ocorrem, portanto, afloramentos, 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, elevada tectonicamente e que se encontra na extremidade nordeste da bacia, com as rochas vulcânicas da Fácies Caxias (Formação Serra Geral). Assim, se observa no perfil esquemático de elevação, as litologias em posição estratigraficamente inferior aos derrames vulcânicos, mas que afloram em altitudes semelhantes, devido à movimentação tectônica e à posterior erosão diferencial.



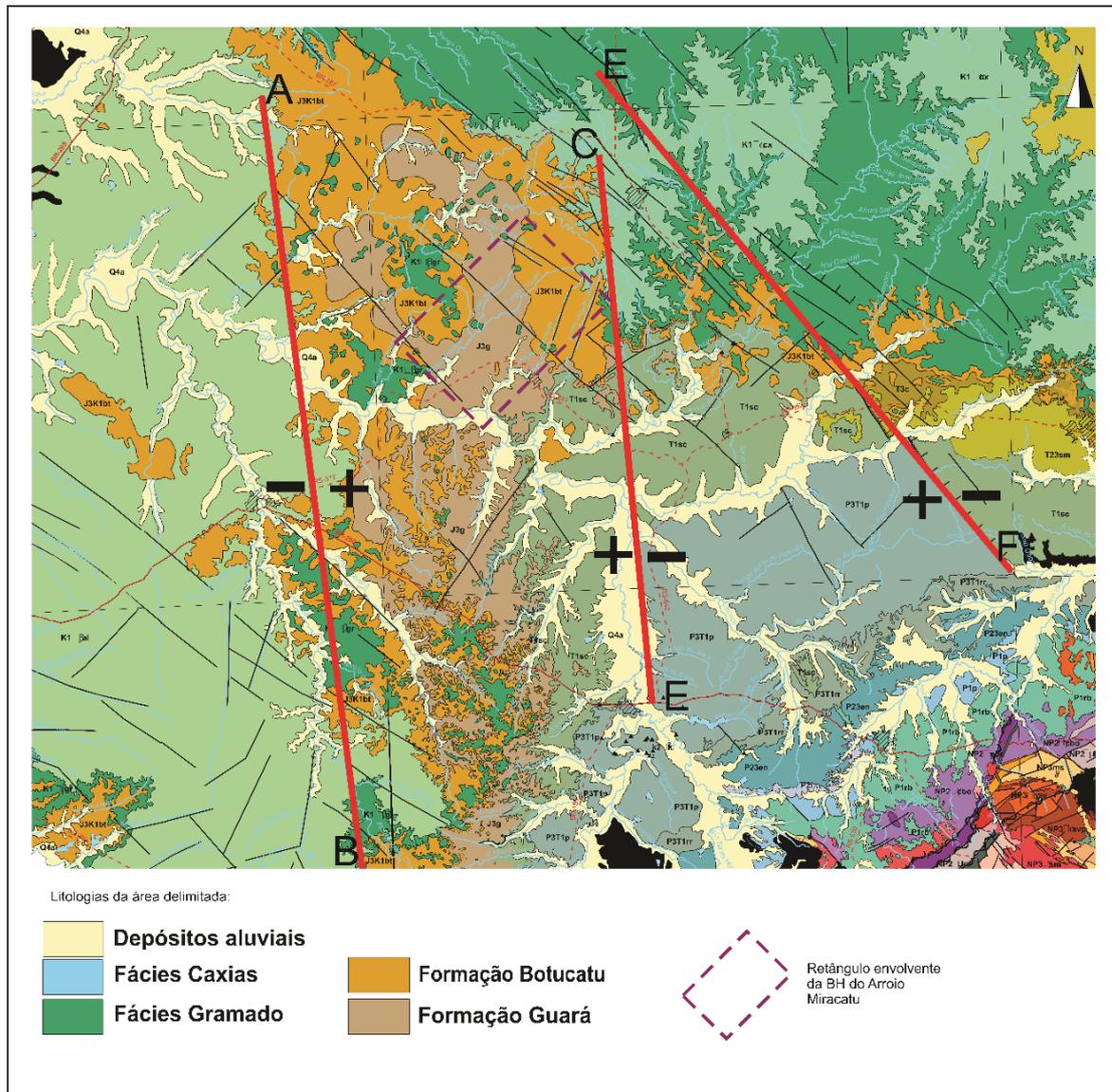
**Figura 4.** Perfil esquemático representativo do modelo de evolução tectônica proposto para a seção A-B (Sudoeste/Nordeste), a partir do mapeamento das unidades litológicas, dos lineamentos sobrepostos e de observações de campo. Bacia do Arroio Miracatu, sudoeste do Rio Grande do Sul. Fonte: elaboração técnica e interpretativa dos autores (2018).

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 uma porção da Formação Guará em cota altimétrica superior (128 m) àquela da Formação Botucatu (123 m), cuja falha é do tipo normal e que segue a direção principal N 40° E (Figura 5).



**Figura 5.** Afloramento de rochas da Formação Botucatu (primeiro plano), sotoposto ao bloco da Formação Guará (segundo plano). Foto: acervo pessoal dos autores, 2016.

Verifica-se que a bacia, como um todo, está compreendida, no interior da estrutura denominada de Muro de Manoel Viana, do tipo *horst*, na qual todas as formações litológicas, que caracterizam o contexto estratigráfico, na bacia hidrográfica do Arroio Miracatu, estão alçadas (Figura 6). As rochas vulcânicas da Fácies Gramado (Formação Serra Geral), que encobrem estratigraficamente a Formação Botucatu, afloram em cotas que chegam a 110 m, demonstrado estar relacionado à inclinação do Muro de Manoel Viana, de leste a oeste, já indicada, nos estudos de Trainini (2005).



**Figura 6.** Recorte do Mapa Geológico do Estado do Rio Grande do Sul, 1:750.000 (WILDNER et al., 2005). A linha E-F delimita, a nordeste, o Domo de Itu (CARRARO et al., 1972). As linhas A-B e C-D delimitam o Muro de Manoel Viana, alçado pela neotectnica. Os sinais + e - indicam blocos alto e baixo, respectivamente. A linha roxa pontilhada corresponde ao retângulo da área de estudo. Fonte: Trainini (2005).

Assim, ao se analisar a morfologia das feições arenosas da Bacia Hidrográfica do Arroio Miracatu, no interior do Muro de Manoel Viana, v-se que os topos dos cerros são constituídos por arenitos eolicos 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 7.

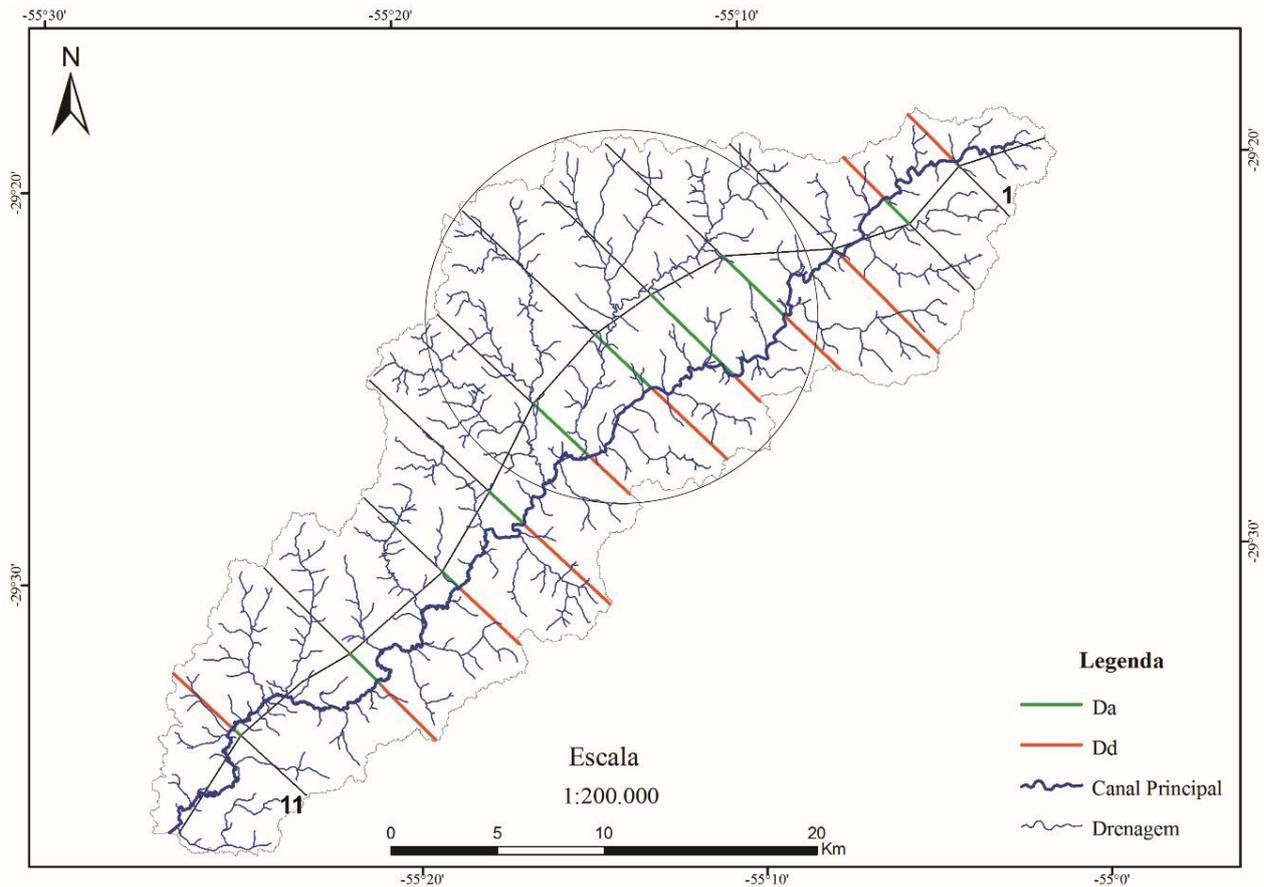
O alçamento tectônico na área de estudo determinou um novo nível de base, provocando, portanto, uma reestruturação na drenagem e na retomada da erosão, gerando processos hídricos por meio da ativação de ravinamentos e de voçorocamentos, responsáveis pela gênese da formação dos areais.



**Figura 7.** 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 ao ravinamento e voçorocamento. Bacia Hidrográfica do Arroio Miracatu, Município de São Francisco de Assis. Fonte: acervo pessoal dos autores (2016).

Ao analisar a drenagem, se confirma às evidências do controle tectônico na bacia, à medida que o padrão paralelo identificado é o resultado da conformação da drenagem às estruturas tectônicas, principalmente, dos relevos orientados, nas direções de lineamentos (NE-SW). A influência da tectônica revelou-se, também, no FABD, cujo valor foi de 62,66, isto é, de médio a alto, sugere um basculamento, no sentido NE. Na mensuração do FSTT, esta influência se mostrou mais evidente ainda, isto é, no setor da bacia, a partir de 16 km da nascente, até a sua porção central, em torno de 28 km da nascente, os depósitos fluviais da Formação Guará estão alçados em cotas de 260 metros. Este setor demonstra um basculamento e uma captura de drenagem, entre a Sanga da Areia e o Arroio Miracatu (trecho Sanga do Taquari) e, portanto, o deslocamento deste arroio para a margem esquerda da bacia (Figura 8).

A RDE, analisado em três cursos principais da bacia, apresenta valores  $>6$ , que correspondem a anomalias de 1ª ordem, indicando uma significativa influência de controle estrutural (Quadro 1). O valor significativamente elevado de 25,30 de RDE total ocorreu no curso principal e mais extenso do Arroio Miracatu, no quadrante NE-SW. Ao integrar os perfis longitudinais e seus respectivos RDEs totais, as informações geológicas disponibilizadas pela CPRM (2006), as obtidas pelos estudos das drenagens e dos 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 indica, sobretudo, um controle estrutural, ligado à presença de falhas e de diques vulcânicos.



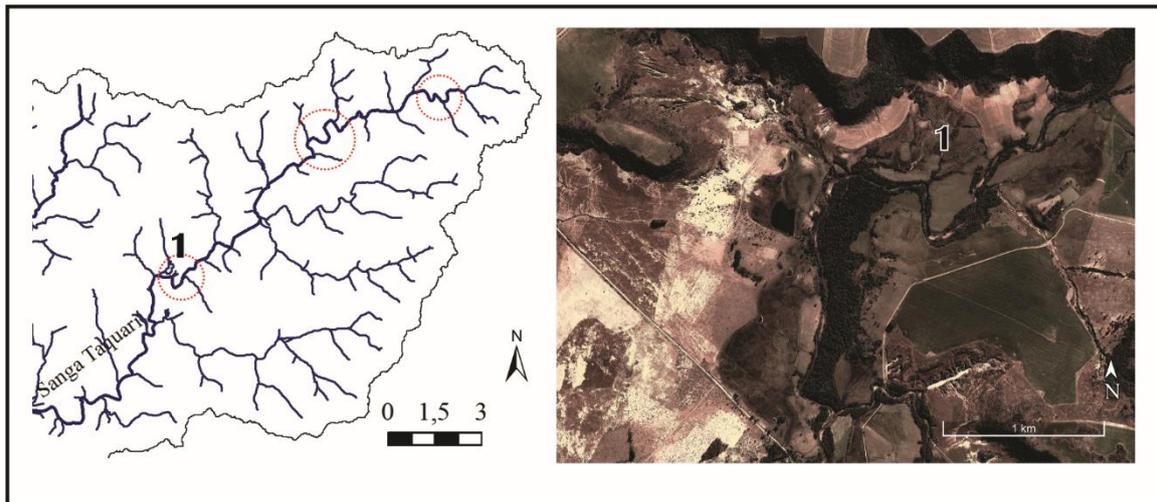
**Figura 8.** Localização das seções transversais, utilizadas para o cálculo de Fator de Simetria Topográfica Transversal (FSTT). Área de ocorrência de assimetria elevada (círculo). Bacia Hidrográfica do Arroio Miracatu. Fonte: Banco de dados Spring®, com elaboração técnica dos autores (2018).

**Quadro 1.** Relação Declividade-Extensão total (RDE total) para drenagens selecionadas na bacia do Arroio Miracatu.

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

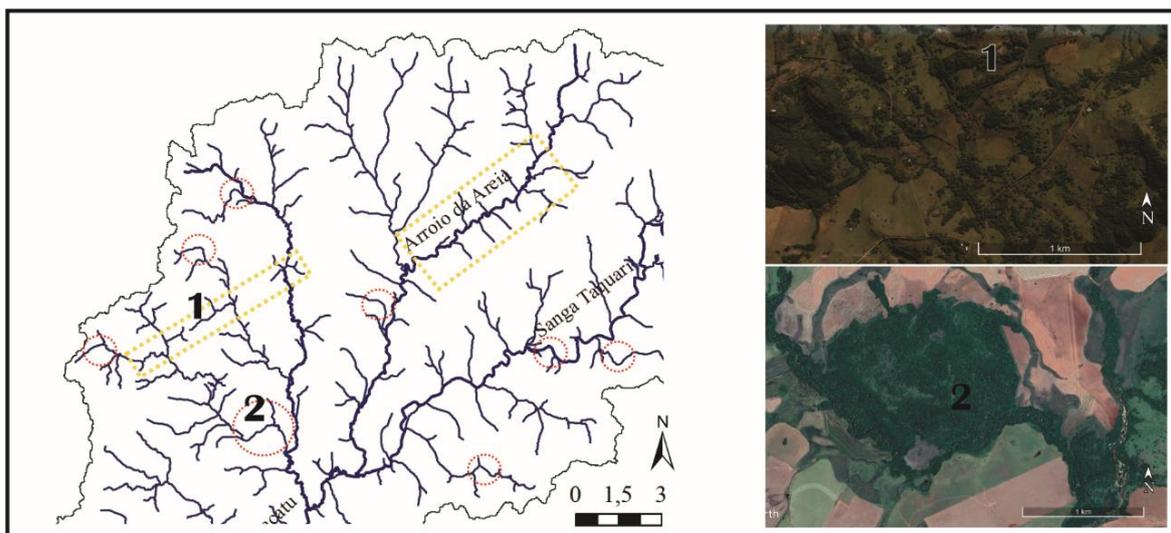
Fonte: Banco de dados Spring®.

Embora a bacia hidrográfica do Arroio Miracatu possua um padrão regional de escoamento na direção NE-SW, os canais de drenagem apresentam mudanças bruscas de direcionamento em seus segmentos, 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 direção E-W (Figura 9).



**Figura 9.** Meandros com fortes inflexões, em ângulos ortogonais (círculos vermelhos). Fonte: editado de SRTM-TOPODATA e Google Earth®, com elaboração dos autores (2018).

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 10).



**Figura 10.** Anomalias de drenagem, na porção central do Arroio Miracatu. Presença de drenagem paralela (retângulo amarelo), mesmo que a bacia possua um padrão dendrítico principal. Detalhe de inflexões em ângulo reto, com junção perfeita em 90° (círculo vermelho), na porção sul da bacia. Fonte: editado de SRTM-TOPODATA e Google Earth®, com elaboração dos autores (2018).

Os estudos de campo e de laboratório não se esgotaram aqui, mas foram capazes de trazer evidências do controle tectônico na bacia, seja por meio das variações altimétricas da litologia, assim como das características da drenagem. As movimentações tectônicas pretéritas geraram áreas frágeis à erosão ao exporem, sobretudo, a friável Formação Guará à superfície.

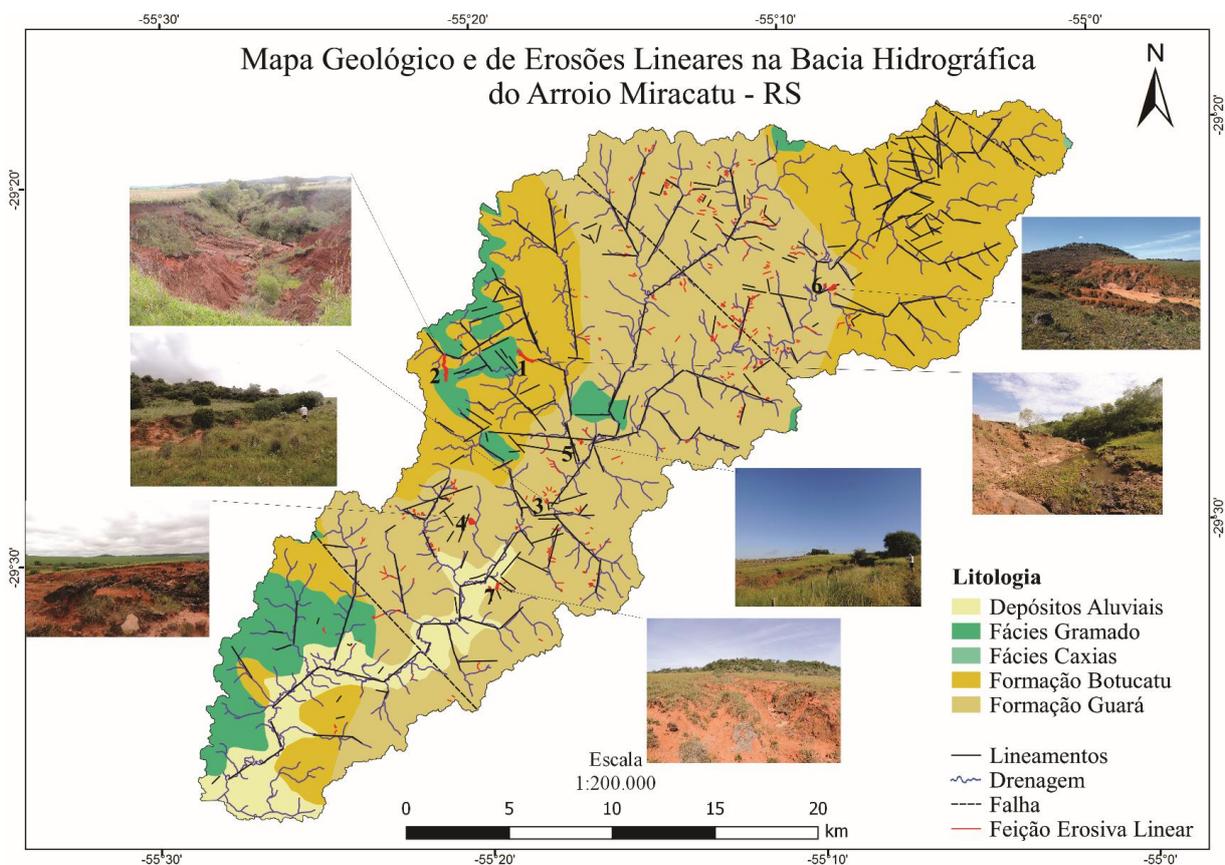
### 3.2. Evidências pedológicas litológicas e tectônicas, associadas aos processos erosivos mapeados na Bacia Hidrográfica do Arroio Miracatu

Ao analisar o cenário de degradação dos solos, por processos erosivos lineares, especialmente aqueles com dimensões reconhecíveis na escala 1:5.000, se pode cartografar 453 deles, nos quais se traçou o eixo principal dos processos erosivos (ravinas e voçorocas). Na figura 11, é possível visualizar a distribuição espacial das feições

erosivas, bem como aquelas em que foi realizada uma análise detalhada, se destacando as características mais relevantes, de acordo com os objetivos do estudo.

Conforme a Figura 12 A, 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°-80°W e N50°-80°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 11) e aos solos do tipo Latossolo Vermelho (Figura 12).

Cabe destacar que a área de maior concentração de processos erosivos lineares é, também, a de maior concentração de areais. Estas áreas se caracterizam pela ocorrência, além dos Latossolos Vermelhos, cartografados na escala de 1:750.000, de Neossolos Quartzarênicos Órticos, identificados por Binda (2016). Devido à ausência de um mapeamento em escala de maior detalhe, para a bacia em estudo, esses estão agrupados, nas classes de Latossolos ou Argissolos (classificados, outrora, como Podzólicos), de textura arenosa ou franco-arenosa (AZEVEDO; KAMINSKI, 1995; STRECK et al., 2008; MEDEIROS et al., 2013).

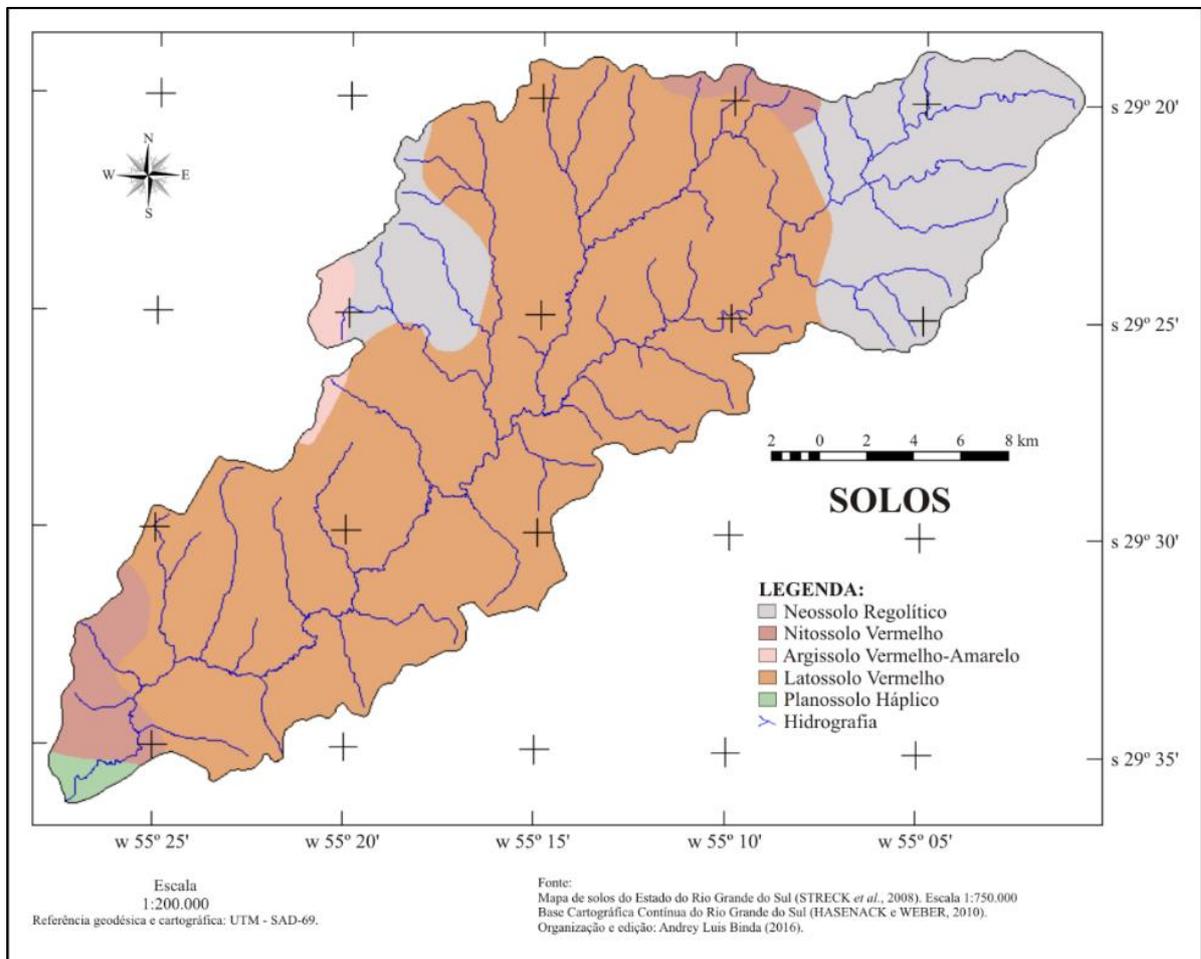


**Figura 11.** Mapa geológico com a localização dos processos erosivos mapeados na bacia e as ravinas selecionadas para o estudo em campo.

Conforme De Nardin (2009), a bacia em estudo apresenta quatro agrupamentos de classes de solos: 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 (Latossolos 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 (Figura 12).

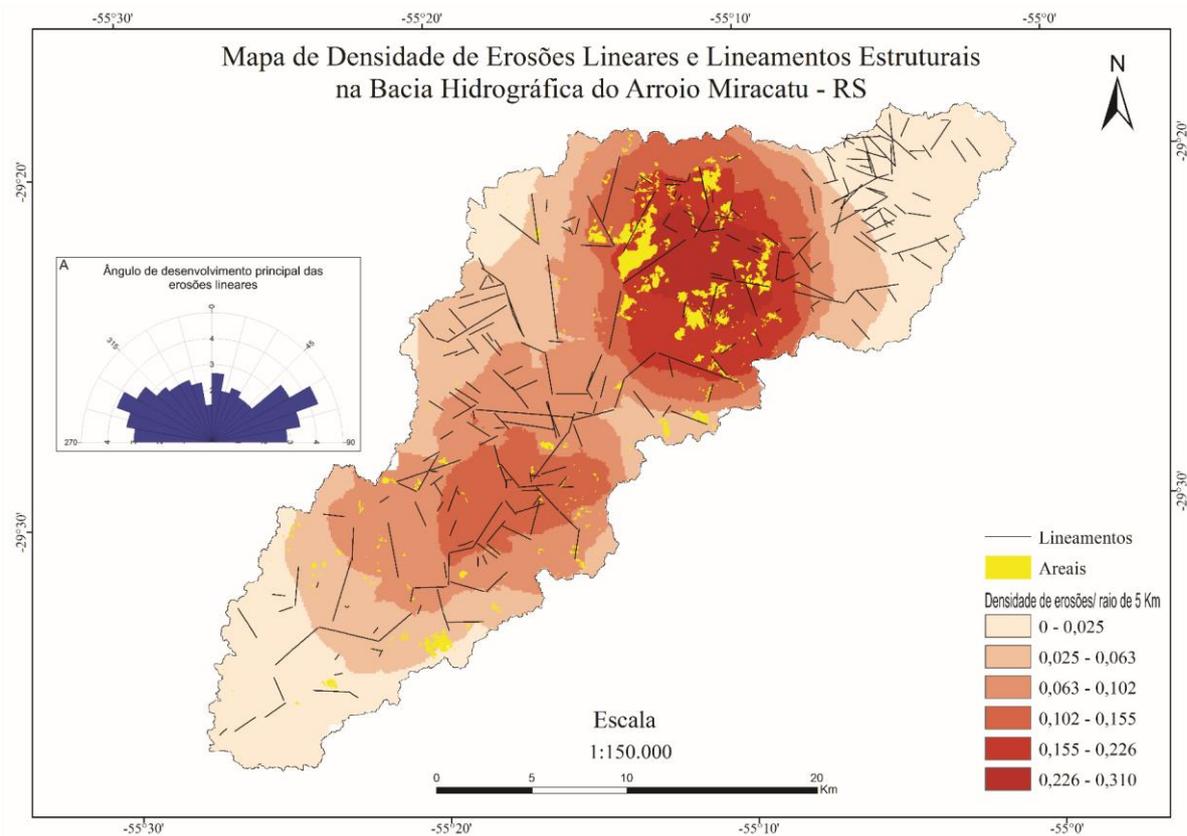
A presença de Neossolos Quartzarênicos Órticos denota o meio friável, em seus aspectos pedológicos, submetidos à dinâmica hídrica, na forma de erosão linear (ravinas e voçorocas). Derivados do intemperismo e de

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).



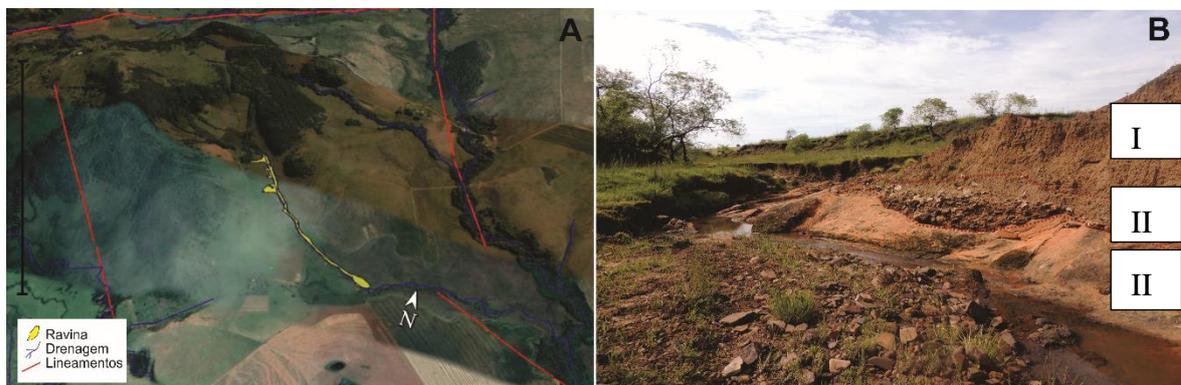
**Figura 12.** Mapa de solos da Bacia Hidrográfica do Arroio Miracatu. Fonte: Binda (2016).

Ao analisar a densidade de erosão linear, confrontada com a espacialização dos lineamentos e com os dados dos diagramas de roseta (Figura 13 A), 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 areas. Evidencia-se a forte relação lineamentos - erosão linear (ravinas e voçorocas) - areas. Do total de 453 processos erosivos identificados em gabinete, foram analisados sete deles em campo, conforme assinalados na Figura 11, dos quais serão destacadas as características mais relevantes.



**Figura 13.** 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 dos autores (2018).

A Feição Erosiva 1, localizada pelas coordenadas 29°24'06"S, 55°17'37"W, está situada na porção média e a 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 11). Trata-se de uma ravina que possui 900 metros de comprimento e está conectada à rede de drenagem. Conforme a Figura 14A, o eixo principal tem direção concordante com os lineamentos mapeados, a sua direita e a sua esquerda. Na 14B, os eixos de desenvolvimento secundários, além da vertente de maior inclinação, são concordantes ao lineamento mapeado ao fundo da ravina (Figura 14).



**Figura 14.** (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 sotopostos a depósitos fluviais recentes Quaternários (III); Bacia Hidrográfica do Arroio Miracatu. Fontes: Google Earth® e acervo pessoal dos autores (janeiro de 2017).

Associados ao pavimento de concreções ferruginosas (Figura 15) 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 Verdum (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 no fundo dos vales. 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, posteriormente, em períodos de menor potencial hídrico e intensificação de processos de deposição.



**Figura 15.** Carapaça ferruginosa, sobreposta a um bloco de arenito Botucatu. Leito da ravina 1, Município de Manoel Viana, Rio Grande do Sul. Fonte: acervo pessoal dos autores (janeiro de 2017).

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, proporcionaram um maior aporte de água, no sistema, gerando novos mecanismos pedogenéticos e erosivos, que podem ser verificados, na Figura 16. 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. 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.



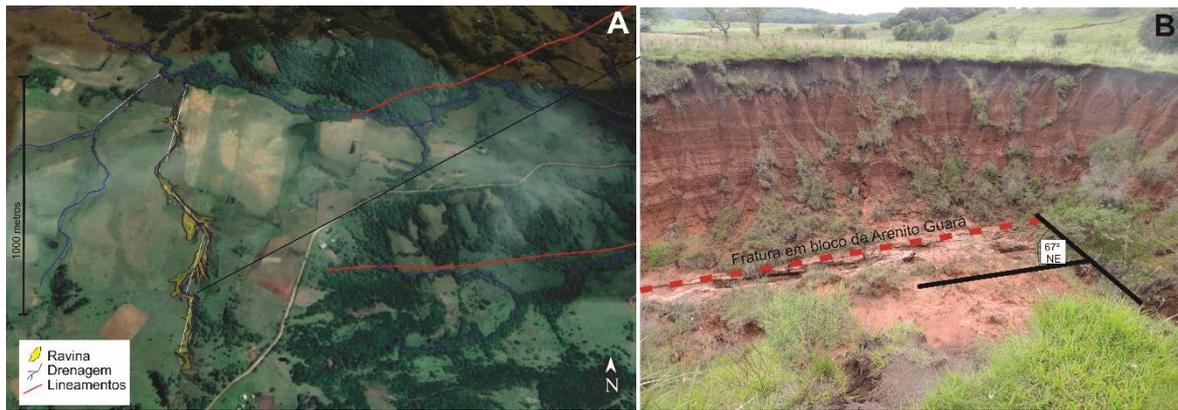
**Figura 16.** Entorno da ravina 1. No primeiro plano, vê-se um dos eixos secundário de desenvolvimento da ravina, em um valão reativado e em intenso processo de erosão. Em linha pontilhada, está delimitado um valão preenchido, o qual um dos eixos da erosão deve avançar, futuramente. Ao fundo, a linha vermelha delimita um lineamento mapeado, indicando o ponto de soerguimento do relevo. Fonte: acervo pessoal dos autores (janeiro de 2017).

A Feição Erosiva 2, localizada nas coordenadas 29°25'27"S, 55°19'57"W, está situada na porção centro-oeste da bacia, em cotas altimétricas que variam entre 186 e 228 metros, e a encosta, cuja inclinação média é de 3,4% (Figura 11 e Figura 17), possui cerca de 1.400 m de extensão e está conectada a uma drenagem de segunda ordem.

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°E, sofre inflexões a N67°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 18A.



**Figura 17.** 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 dos autores (janeiro de 2017).



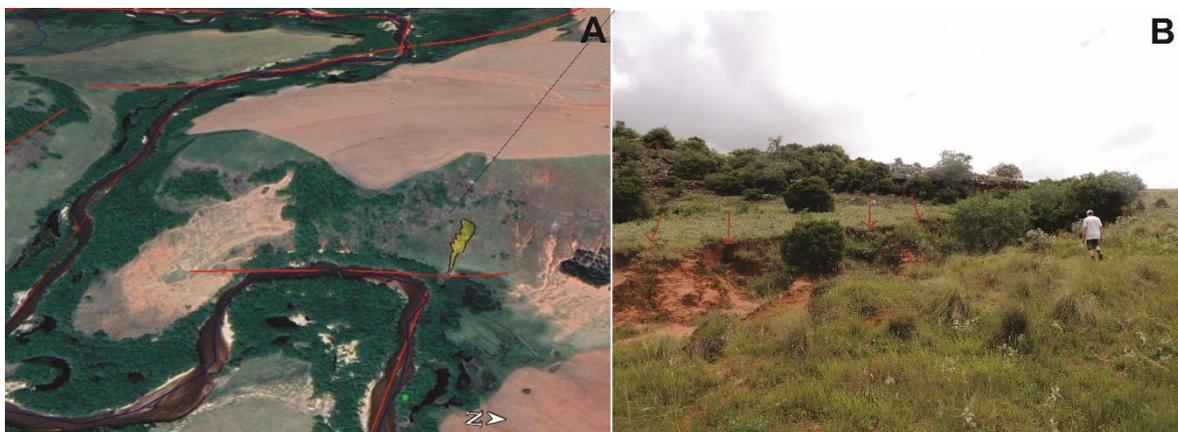
**Figura 18.** Imagem de satélite da Ravina 2 e de seu entorno (A), como delimitação das drenagens, dos lineamentos e do leito do processo erosivo. Em (B), o interior do eixo principal de desenvolvimento da ravina 2, na qual ocorre forte inflexão, no canal, a  $N67^{\circ}E$ , seguindo o ângulo da falha, 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 dos autores (janeiro de 2017).

A Feição Erosiva 3, localizada nas coordenadas  $29^{\circ}28'54''S$ ,  $55^{\circ}17'05''W$ , na posição central na bacia, próxima ao leito do curso principal do Arroio Miracatu (Figura 11 e Figura 19), 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.

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  $N78^{\circ}W$ .

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  $10^{\circ}$  de inclinação, indicado pelas setas, na Figura 19B.

O avanço lateral e remontante da ravina indica relação, sobretudo, com os planos de estratificação do arenito da Formação Guará, que se encontram sotopostos, 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.



**Figura 19.** 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 pessoal dos autores (abril de 2018).

A Feição Erosiva 4 está localizada nas coordenadas 29°29'22''S, 55°19'21''W, na porção centro-sul da bacia e em cotas altimétricas que variam entre 121 e 132 metros, na base de uma encosta, cuja inclinação média é de 10%. O eixo principal dessa feição erosiva possui 136 metros de extensão (Figura 11 e 20).

A área em que ela se desenvolve é caracterizada pela presença da Formação Guará, de acordo com o mapeamento da CPRM (2006). O arenito fluvial desta formação sedimentar é bastante evidente, em diversos pontos do interior da ravina. Predominam blocos fraturados em duas direções principais: uma, na direção N50°W, e outra, na direção 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 20B 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 a montante.



**Figura 20.** 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 dos autores (janeiro de 2017).

A Feição Erosiva 5 está localizada nas coordenadas 29°27'19"S, 55°15'56"W, em cotas altimétricas que variam entre 112 e 120 metros, em uma encosta, cuja inclinação média é de 7% (Figura 11 e Figura 21), 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, a montante da ravina, na cota de 124 m de altitude, com fraturas principais com ângulo de N64°E.

A erosão ocorre, inicialmente, por um eixo principal de N10°W, convertendo para um segundo eixo de N67°E, que se observa, na Figura 20. De certa forma, a mudança brusca de desenvolvimento da erosão para N67°E mostra-se concordante com a fratura mapeada na rocha, N64°E.



**Figura 21.** 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. Bacia Hidrográfica do Arroio Miracatu, RS. Fontes: Google Earth® e acervo pessoal dos autores (janeiro de 2018).

A Feição Erosiva 6, localizada nas coordenadas  $29^{\circ}23'30''S$ ,  $55^{\circ}08'14''W$ , está situada em cotas altimétricas que variam de 177 a 157 metros, a jusante de duas encostas, cujas inclinações médias são de 21% (Figura 11 e Figura 21). Trata-se de uma ravina que possui um eixo de desenvolvimento a  $N76^{\circ}E$ , com aproximados 350 metros de extensão, conectada a drenagem de segunda ordem. Paralelamente, essa feição erosiva 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  $N88^{\circ}E$ .

Blocos mais preservados do arenito Guará foram identificados, no entorno da Feição Erosiva 6. As fraturas registradas em campo ocorrem na direção  $N12^{\circ}E$  (principal) e  $N45^{\circ}W$ , (secundária). Como se observa, na Figura 23, os ângulos das fraturas são concordantes com aqueles das drenagens principal e secundária. Esta condição reafirma a hipótese de que as estruturas da rocha, sobretudo da Formação Guará, assim como a conformação do relevo, exercem forte influência no desenvolvimento das drenagens e dos processos erosivos, na área de estudo.

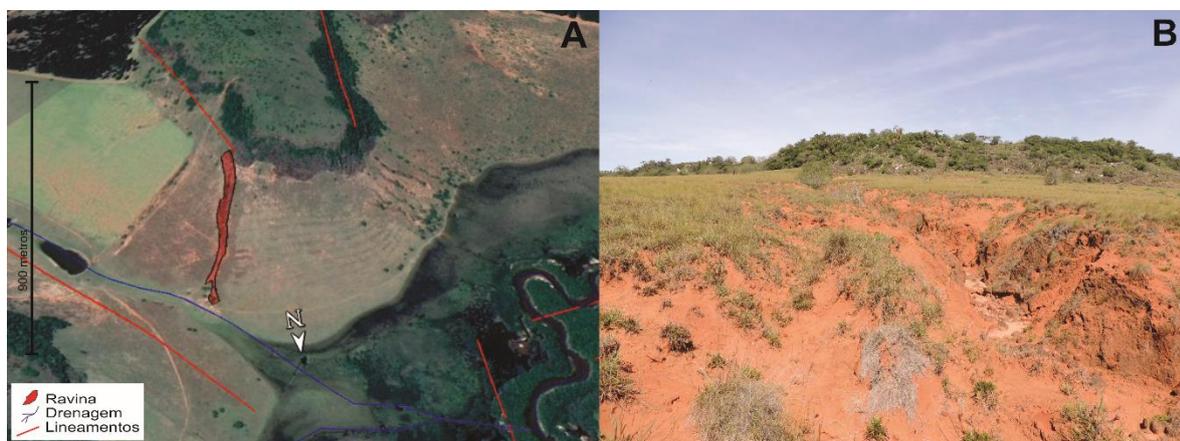


**Figura 22.** Vista geral da Ravina 6 e de seu entorno, como delimitação das drenagens, dos lineamentos e do leito do processo erosivo (A). Em (B), vista lateral direita parcial da erosão e seus eixos de desenvolvimento. Bacia Hidrográfica do Arroio Miracatu, RS. Fontes: Google Earth® e acervo pessoal dos autores (abril de 2018)



**Figura 23.** Bloco da Formação Guará, no entorno da Feição Erosiva 6, cujas fraturas ocorrem na direção principal  $N12^{\circ}E$  e secundária  $N45^{\circ}W$ , concordantes com as drenagens delimitadas, ao fundo (linhas azuis). Bacia Hidrográfica do Arroio Miracatu, RS. Fonte: acervo pessoal dos autores (abril de 2018).

Por fim, o último processo erosivo observado a campo, denominado de Feição Erosiva 7, está localizado pelas coordenadas  $29^{\circ}31'02''S$ ,  $55^{\circ}18'35''W$  e situado na porção centro sul da bacia (Figura 11 e Figura 24). A Feição Erosiva 7 ocorre em cotas altimétricas que variam de 101 a 142 metros, em uma encosta, cuja inclinação média é de 11%. Possui cerca de 330 metros de extensão e está conectada à drenagem de segunda ordem. No que diz respeito à litologia, a área em que se desenvolve esta ravina, está caracterizada pela presença da Formação Guará, de acordo com o mapeamento da CPRM (2006). A erosão se caracteriza pelo seu desenvolvimento, no sentido da vertente, sobretudo por um eixo principal com direção  $N24^{\circ}E$ , e alguns pequenos eixos de desenvolvimento, paralelos a este. A direção do eixo principal é concordante com o lineamento demarcado, no entorno da referida ravina, o que é possível aferir, na Figura 23.



**Figura 24.** Vista geral da Feição Erosiva 7 e de seu entorno, com a delimitação das drenagens, dos lineamentos e do leito em processo erosivo (A). Em (B), vista a partir da jusante da ravina, em direção a sua cabeceira. Bacia Hidrográfica do Arroio Miracatu, RS. Fontes: Google Earth® e acervo pessoal dos autores (abril de 2018).

#### 4. Discussão

Em uma análise de aspectos litológicos e tectônicos associados se observou 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 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 Manoel 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, demonstrado estar relacionado a uma provável inclinação do muro, de leste a 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 retilinização 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 FABD, cujo valor foi de 62,66, isto é, de médio a alto, que sugere um basculamento, no sentido NE. Na mensuração do 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 razão RDE/RDE total 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 E-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.

Na busca de uma análise do cenário de degradação dos solos, por processos erosivos lineares, na bacia, se obteve o 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°-80°W e N50°-80°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 - ravinações - 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 sotopostos 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 sotopostos, 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 as 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.

## 5. Conclusões

O objetivo principal do estudo 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 Manoel Viana/RS.

Para responder a este objetivo e 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, os quais se mostraram bastante escassos. 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 detalhe do sistema de drenagem da bacia hidrográfica. 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, embora somente em escalas de pequena representação, 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 Manoel Viana, na qual os sedimentos da Formação Botucatu e Guará estão alçados;
- As rochas vulcânicas da Fácies Gramado (Formação Serra Geral) afloram em cotas consideravelmente baixas (110 m);
- 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 talvegues 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 FABD, de médio a alto (62,66), sugere basculamento da bacia, no sentido NE;
- O 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 m;
- 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.

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 hidrográfica, 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 analisados 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, 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.

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 nessa bacia, e que estas 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.

Finalmente, cabe destacar que se avalia positivamente a potencialidade deste estudo, na difusão dos conhecimentos obtidos aos administradores e técnicos dos municípios de Manoel Viana e de São Francisco de Assis, como 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 associadas.

**Contribuições dos Autores:** J.D: concepção, metodologia, validação, análise formal, pesquisa, preparação de dados, escrita do artigo. R.V.: concepção, metodologia, validação, pesquisa, recursos, escrita do artigo, revisão final, aquisição de financiamento. Todos os autores leram e concordaram com a versão publicada do manuscrito.

**Financiamento:** Esta pesquisa foi financiada pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES)-Comité Français d'Évaluation de la Coopération Universitaire (COFECUB), bolsa 88887.186172/2018-00 e pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), bolsa 88882.157108/2017-01.

**Agradecimentos:** Os autores desta pesquisa agradecem todo o suporte técnico-administrativo do PPG em Geografia (POSGEA)/IGEO/UFRGS, ao Bacharel em Letras Gustavo Suertegaray Saldivar, revisor-tradutor, e aos Profs. François Laurent e Jeannine Corbonnois, Le Mans Université, como coorientadores durante a pesquisa de tese, no âmbito do acordo CAPES-COFECUB, entre o PPG em Geografia (POSGEA)/IGEO/UFRGS e o *Laboratoire Espaces et Sociétés (ESO)/Le Mans Université/Le Mans/França*.

**Conflito de Interesse:** Os autores declaram não haver conflito de interesse.

## Referências

1. ANDRADES FILHO, C. de O.; GUASSELLI, L. A.; SUERTEGARAY, D. M. A. **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, Goiânia, 2006. Disponível em: <http://lsie.unb.br/ugb/sinageo/6/10/411.pdf>.
2. 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.
3. 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**. Tese (Doutorado em Geografia) – Programa de Pós-Graduação em Geografia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2016. 293p.
4. BONZANINI, H. L.; LUPINACCI, C. M.; SANCHES, R. M. Análise Morfométrica e Feições Erosivas na Bacia Hidrográfica do Rio Taturi (PR). **GEOGRAFIA (Londrina)**, v. 31, n. 1, p. 237–257, 2022. DOI: 10.5433/2447-1747.2022v31n1p237.
5. CARRARO, C. C.; EICK, N. C.; GAMERMANN, N. O domo de Itu. **Nota Explicativa**. Porto Alegre, RS: Instituto de Geociências/UFRGS, 1972.
6. COELHO NETTO, A. L. Evolução de Cabeceiras de Drenagem no Médio Vale do Rio Paraíba do Sul (SP/RJ): a Formação e o Crescimento da Rede de Canais sob Controle Estrutural. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 4, n. 2, 2003. DOI: 10.20502/rbg.v4i2.25.
7. COX, R. T. Analysis of Drainage Basin Symmetry as a Rapid Technique to Identify Areas of Possible Quaternary tilt Block Tectonics: An Example from the Mississippi Embayment. **Geological Society American Bulletin**, 106, p. 571-581. 1994. DOI: 10.1130/0016-7606(1994)106<0571:AODBSA>2.3.CO;2
8. CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Mapa Geológico do Estado do Rio Grande do Sul**. Escala 1:750.000. Porto Alegre, julho de 2006.
9. DE NARDIN, D. **Zoneamento geoambiental no oeste do Rio Grande do Sul: um estudo em bacias hidrográficas**. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Programa de Pós-Graduação em Geografia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2009. 230p.
10. DUMMER, J. **Aspectos Litológico, Pedológicos e Tectônicos Associados aos Processos Erosivos, na Bacia Hidrográfica do Arroio Miracatu- Rio Grande do Sul**. Tese (Doutorado em Geografia) – Programa de Pós-Graduação em Geografia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2019. 115p.
11. ETCHEBEHERE, M. L. C.; SAAD, A. R.; PERINOTTO, J. A. J.; FULFARO, V. J. Aplicação do índice “Relação Declividade-Extensão – RDE” na Bacia do Rio do Peixe (SP) para detecção de deformações neotectônicas. **Revista do Instituto de Geociências – USP – Série Científica**, São Paulo, v. 4, n. 2, p. 43-56. 2004.
12. 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**. Ano, v. 4, n 41, p.597 – 603, dezembro de 2011.

13. 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, p. 97 – 123. 2012.
14. GUTIÉRREZ, Á.; SCHNABEL, S.; FELICÍSIMO, Á. Modelling the occurrence of gullies in rangelands of southwest Spain. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 34, p. 1894-1902, 2009. DOI: 10.1002/esp.1881
15. HACK J. T. Stream-profile analysis and stream-gradient. Index. **U.S. Geol. Survey Jour. Research**, 1(4):421-429 1973.
16. HARE, P. W.; GARDNER, T. W. Geomorphic Indicators of Vertical Neotectonism along Converging Plate Margins, Nicoya Peninsula Costa Rica. In: Morisawa, M. and Hack, J.T., Eds., **Tectonic Geomorphology**. Proceedings of the 15th Annual Binghamton Geomorphology Symposium, Allen and Unwin, Boston, p. 123-134. 1985.
17. 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.
18. MAHMOOD, S. A.; GLOAGUEN, R. Appraisal of active tectonics in Hindu Kush: Insights from DEM derived geomorphic indices and drainage analysis. **Geoscience Frontiers**, v. 3, Issue 4, p. 407-42. July 2012. DOI: 10.1016/j.gsf.2011.12.002
19. 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.
20. SALAMUNI, E.; EBERT, H. D.; HASUI, Y. Morfotectônica da Bacia Sedimentar de Curitiba. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo. v. 34, n. 4, p. 469-478, 2004.
21. SCHUMM, S. A. Sinuosity of Alluvial Rivers in the Great Plains. **Bulletin of the Geological Society of America**, 74, p. 1089-1100. 1963. DOI: 10.1130/0016-7606(1963)74[1089:SOAROT]2.0.CO;2
22. 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.
23. SEEBER, L.; GORNITZ, V. River profiles along the Himalayan arc as indicators of active tectonics. **Tectonophysics**, Amsterdam, v. 92, p. 335-367, 1983.
24. 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.
25. SUERTEGARAY, D. M. A.; GUASSELLI, L. A.; PIRES DA SILVA, L. E. (Org.) **Arenização: natureza socializada**. Porto Alegre: Compasso Lugar Cultura e Imprensa Livre, 2012.
26. SUERTEGARAY, D. M. A.; GUASSELLI, L. A.; VERDUM, R. (Org.) **Atlas da Arenização, sudoeste do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia (CESRM), Secretaria de Coordenação e Planejamento e Secretaria da Ciência e Tecnologia. Governo do Estado do Rio Grande do Sul. 2001. 84p.
27. 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.
28. TRAININI, D. R. **A Influência da Neotectônica no Assoreamento de Bacias Hidrográficas**. Porto Alegre: CPRM, 2005.
29. VALERIANO, M. M.; ROSSETTI, D. F. Topodata: Brazilian full coverage refinement of SRTM data. **Applied Geography (Sevenoaks)**, v. 32, n. 2, p. 300-309, 2012. DOI: 10.1016/j.apgeog.2011.05.004
30. VERDUM, R. **Approche géographique des “déserts” dans les communes de São Francisco de Assis et Manuel Viana, État du Rio Grande do Sul, Brésil**. Tese (Doutorado em Géographie et Aménagement), Université de Toulouse Le Mirail, Toulouse. 1997. 211p.
31. 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. 58p.



Esta obra está licenciada com uma Licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) – CC BY. Esta licença permite que outros distribuam, remixem, adaptem e criem a partir do seu trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que lhe atribuam o devido crédito pela criação original.