

Análise Morfoestrutural da Formação Tupanciretã (Cenozoico), Planalto Meridional do Rio Grande do Sul, Brasil

Mateus da Silva REIS¹, Clódis de Oliveira ANDRADES-FILHO² & Dilce de Fátima ROSSETTI³

¹ Programa de Pós-graduação em Ambiente e Sustentabilidade, Universidade Estadual do Rio Grande do Sul. Rua Santos Dumont, 450, CEP 95.400-000, São Francisco de Paula, RS, Brasil (mateus-reis@uergs.edu.br)

² Departamento de Geodésia, Instituto de Geociências, Programa de Pós Graduação em Sensoriamento Remoto, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. CEP 91501-970, Porto Alegre, RS, Brasil (clodis.filho@ufrgs.br)

³ Coordenação-Geral de Observação da Terra, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. CEP 12227-010, São José dos Campos, SP, Brasil (rossetti@dsr.inpe.br)

Resumo. A porção sul da Bacia sedimentar intracratônica do Paraná carece de estudos que considerem a possível influência de atividade tectônica na evolução do relevo após o Cretáceo. Este trabalho visa hierarquizar morfoestruturas na porção sul da Bacia do Paraná, abrangendo as Formações Tupanciretã e Serra Geral, com base em topologia de redes de drenagem e lineamentos morfoestruturais. O estudo é desenvolvido com o uso de dados de sensoriamento remoto, incluindo: modelo digital de elevação (MDE) World 3D30 (AW3D30), adquiridos a bordo do *Advanced Land Observing Satellite* (ALOS); imagens do Satélite Sentinel-2, sensor MSI (*MultiSpectral Instrument*); e imagens do veículo aéreo remotamente pilotado (VARP) *Phantom 4 PRO*. As informações obtidas desses produtos foram integradas com dados morfológicos coletados em campo, bem como com a base cartográfica oficial do Estado do Rio Grande do Sul em escala de 1:25.000. O resultado da análise morfoestrutural revelou relevo com indícios de deformação tectônica, registrada por inúmeras anomalias, com destaque para: padrões de drenagem anômalos, como o treliça e subtipos; inflexões abruptas de canais formando ângulos de 90°; e lineamentos morfoestruturais. Duas fases deformacionais principais foram hierarquizadas: a primeira de direção NE-SW, compatível com estruturas tectônicas do Cenozoico Inferior da Bacia do Paraná; e a segunda de direção E-W, concordante com estruturas transcorrentes do Cenozoico Superior, formadas durante a abertura do Oceano Atlântico Sul. Além disso, ocorrem lineamentos morfoestruturais de direção N-S, que foram relacionados com compressão decorrente da colisão das placas de Nazca e Sulamericana.

Palavras-chave: Lineamentos. Anomalias de drenagem. Sensoriamento Remoto.

Abstract. MORPHOSTRUCTURAL ANALYSIS OF TUPANCIRETÃ (CENOZOIC) FORMATION, RIO GRANDE DO SUL SOUTHERN PLATEAU, BRAZIL. The southern portion of the Paraná intracratonic sedimentary basin lacks studies that consider the possible influence of tectonic activities in the relief evolution after the Cretaceous. Thinking about it, this work performs morphostructures identification and hierarchization on Paraná Basin's southern portion, covering the Tupanciretã and Serra Geral Formations, emphasized in the drainage network topology and morphostructural lineament. For this purpose, analyses were conducted using data derived from a digital elevation model (DEM), World 3D30 (AW3D30) onboard the Advanced Land Observing Satellite (ALOS), satellite data Sentinel-2, sensor MSI (MultiSpectral Instrument), remotely piloted aircraft (RPA) Phantom 4 PRO images, field data collected and Rio Grande do Sul State official cartographic basis on scale 1:25.000. The joint analysis of morphostructural data enabled to gather signs of tectonic deformation printed on terrain. Morphostructural anomalies were registered on the whole study area, including, mainly, anomalous drainage pattern, as lattice and subtypes associated; abrupt canal inflexions creating a 90° angle and morphostructural lineament. Ranking the lineaments enabled to identify two mainly deformational stages: the first one, with compatible orientations of tectonic structures reactivation of Paraná Basin's framework on lower Cenozoic (NE-SW); and the second one, with structures reactivations on higher Cenozoic associated to the dynamic elapsed in the South Atlantic opening (E-W). Still in the higher Cenozoic, deformational signs (N-S) were identified, which can be associated to the compression regimen of Nazca tectonic plate beneath the South American plate.

Keywords: Lineaments. Drainage anomalies. Remote Sensing.

1 Introdução

Relevos produzidos por deformações tectônicas durante o Cenozoico têm sido registrados com frequência no Brasil (p.e., Bezerra & Vita-Finzi, 2000, Bezerra *et al.*, 2014; Almeida Filho *et al.*, 2009; Cogné *et al.*, 2013; Rossetti *et al.*, 2011; Bricalli & Mello, 2013; Alves *et al.*, 2020), apesar da placa Sulamericana ser considerada já estável nesse período geológico subsequente à separação continental e abertura do Oceano Atlântico no Cretáceo (Almeida, 1967; Sztatmari *et al.*, 1987).

A análise de redes drenagem e lineamentos é essencial na caracterização morfoestrutural (Howard, 1967; O'leary *et al.*, 1976). Nesse sentido, produtos de sensoriamento remoto, em especial modelos digitais de elevação (MDEs), vem sendo avaliados visando aplicações em abordagens morfotectônicas (p.e., Ramli *et al.*, 2010; Andrades Filho & Rossetti *et al.*, 2012ab; Jacques *et al.*, 2014ab). Esse tipo de abordagem, aliado a análises estratigráficas e estruturais, contribuíram no registro da neotectônica em várias bacias das regiões sul e sudeste do Brasil, tais como nas bacias de Curitiba, pertencente ao rifte continental do sudeste brasileiro (Salamuni *et al.*, 2003, 2004), Santos e Pelotas (Machado, 2010), e na bacia intracratônica do Paraná (Jacques *et al.*, 2014ab; 2015, Riccomini *et al.*, 2016; Peyerl *et al.*, 2018; Santos *et al.*, 2019; Tomasi & Roisenberg, 2019). Esses estudos têm sido apoiados por dados sismológicos crescentes, obtidos no âmbito da rede sismográfica brasileira (RSBR) estabelecida nos termos do Regulamento Técnico da Agência Nacional do Petróleo (ANP 05/2005). Por exemplo, a implantação de 12 estações sismográficas, combinada com dados de outras estações do território nacional (RSBR, 2020), resultou no registro de centenas de abalos sísmicos na Bacia do Paraná. Isso reforça a importância de estudos sobre a influência da tectônica na evolução dessa bacia e seus efeitos sobre a paisagem atual.

Portanto, análises morfoestruturais tem potencial de aplicação na detecção de

estruturas neotectônicas na Bacia do Paraná, onde investigações sobre a evolução geológico-geomorfológica pós-cretácea são ainda escassas. Em particular no Estado do Rio Grande do Sul, inexistem estudos desse gênero abordando essa bacia. Assim, este trabalho objetivou a análise morfoestrutural das formações Tupanciretã e Serra Geral da Bacia do Paraná expostas na região norte desse Estado. A hipótese a ser testada é se a gênese e/ou conformação atual dos depósitos areníticos pós-cretáceos da Formação Tupanciretã, diretamente sobrepostas às rochas basálticas extrusivas da Formação Serra Geral (Juro-Cretáceo) (Menegotto *et al.*, 1968), tem relação com reativações tectônicas.

2 Área de estudo e arcabouço geológico

A área de estudo ocupa uma superfície de 16.620 km² da Bacia do Paraná na porção norte do Estado do Rio Grande do Sul (Figura 1). Essa bacia, de orientação principal norte-sul, desenvolveu-se inteiramente sobre a crosta continental, tendo se formado de um rifte durante o Ordoviciano (Zalán *et al.*, 1990). As características estruturais mais importantes são os arcos regionais e lineamentos NE-SW e NW-SE (Figura 2), que correspondem a estruturas proterozoicas reativadas. Secundariamente ocorrem lineamentos de direção E-W (Zalán *et al.*, 1990).

A Bacia do Paraná foi preenchida por aproximadamente 7000 m de depósitos sedimentares e rochas magmáticas intrusivas e extrusivas. Seu contorno atual é definido por limites erosivos relacionados, em grande parte, à história geotectônica meso-cenozoica da América do Sul (Milani *et al.*, 2007). A evolução tectonoestratigráfica dessa bacia está relacionada a uma sucessão interativa de fenômenos orogênicos nas bordas da placa Sulamericana, com eventos epirogênicos representados por períodos de soerguimento, subsidência e magmatismo (Milani & Ramos, 1998; Pinto & Vidotti, 2019).

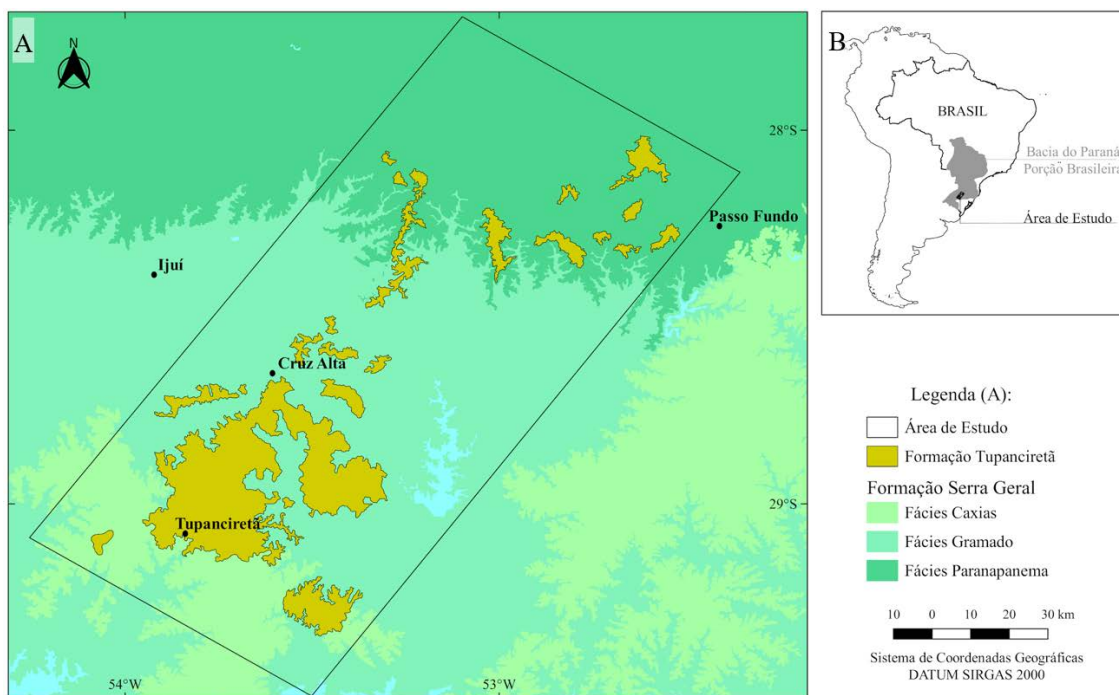


Figura 1. Localização e contexto geológico da área de estudo. A) Detalhe da localização da área de estudo e contexto geológico da região (modificado de CPRM, 2006); B) Localização da área de estudo na porção sul da Bacia do Paraná.

Figure 1. Location and geological context of the study area. A) Detail of the location of the study area and geological context of the region (modified from CPRM, 2006); B) Location of the study area in the southern portion of the Parana Basin.

A evolução da Bacia do Paraná tem sido bastante estudada quanto às unidades geológicas datadas até o período Cretáceo, quando se encerraram os eventos magmáticos extrusivos. A gênese da Formação Serra Geral (Eocretáceo) está associada aos processos tectônicos que culminaram com a abertura do Oceano Atlântico Sul (p.e., Milani *et al.*, 2007) e resultaram nos basaltos toleíticos, andesitos toleíticos e riolitos que dominam a superfície da bacia.

Os arenitos da Formação Tupanciretã (Cenozoico) ocorrem inteiramente sobre a Formação Serra Geral, na porção abrangida pelo território do RS. Esses arenitos foram primeiramente descritos por Menegotto *et al.* (1968) em pesquisas realizadas restritamente ao município de Tupanciretã, quando eles foram referenciados como pós-Serra Geral. Até então, esses depósitos sedimentares eram

considerados como “janelas” da Formação Botucatu (i.e., mesozoico, no eozóico-eocretáceo; Milani *et al.*, 2007).

Na década de 70, a área de ocorrência espacializada da Formação Tupanciretã foi ampliada (Gamermann *et al.*, 1973) sem, contudo, definição exata dos seus limites físicos. Segundo dados de mapeamento geológico (CPRM, 2006), a ocorrência dessa formação é restrita à região norte do Estado do Rio Grande do Sul (Figura 1).

Estudo prévio de proveniência da Formação Tupanciretã indicou rochas ígneas intrusivas, metamórficas de alto grau ou sedimentares retrabalhadas como fontes principais (Menegotto *et al.*, 1968). Segundo os mesmos autores, a base dessa formação consiste em um pacote litológico composto por conglomerados basais e finas camadas de argila.

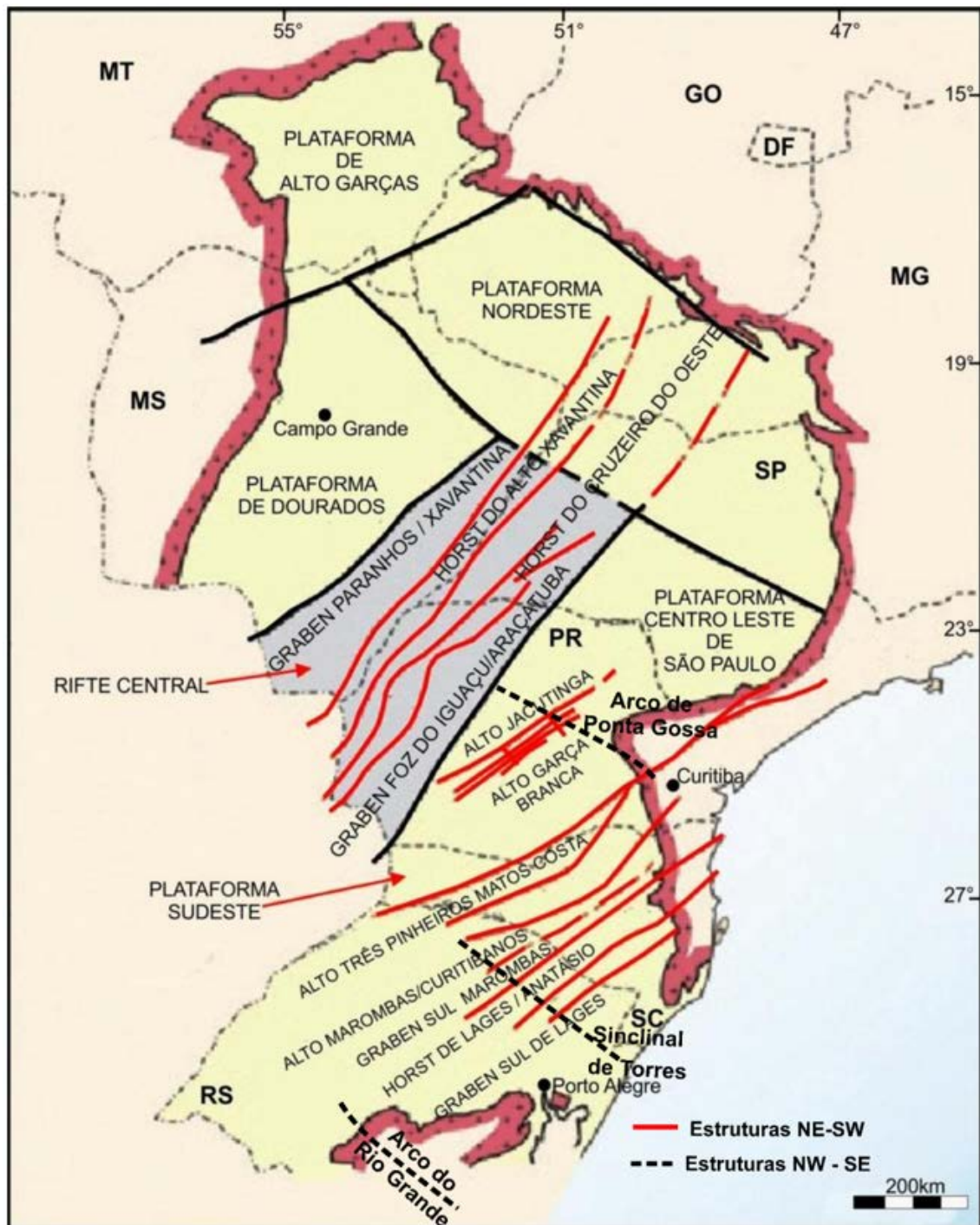


Figura 2. Arcabouço tectônico da Bacia do Paraná (modificado de Marques et al., 1993).
Figure 2. Tectonic framework of the Paraná Basin (modified from Marques et al., 1993).

3 Materiais e métodos

A metodologia foi desenvolvida com o intuito de caracterizar as morfoestruturas da área de estudo. Para isto, os dados foram integrados em um banco de dados georreferenciado no sistema de projeção *Universal Transversa de Mercator UTM* (metros), *datum* SIRGAS 2000 (*datum* oficial

do Brasil) e executados em ambiente de Sistema de Informações Geográficas (SIG).

3.1 Materiais

A pesquisa incluiu dados cartográficos, de sensoriamento remoto e geomorfológicos de campo. Os dados de drenagem foram obtidos da base cartográfica oficial do Estado

do Rio Grande do Sul (Rio Grande do Sul, 2018), disponibilizada gratuitamente desde o ano de 2019, em formato vetorial na escala 1:25.000.

Dentre os dados de sensoriamento remoto, utilizou-se o MDE AW3D30, disponibilizado pela Agência de Exploração Aeroespacial do Japão (JAXA, 2015) em formato *raster*, de resolução espacial de 30 m. Este produto é originário do processamento semiautomático dos dados do sensor PRISM, embarcado no satélite ALOS, que resultou no modelo digital de superfície (MDS) AW3D, de resolução espacial de 5 m. Por reamostragem, foi gerado o “AW3D30”, esse de resolução espacial de 30 m (JAXA, 2015). Foi utilizado um total de 7 cenas, datadas em 31.03.2014 (S028W053, S028W054, S029W053, S029W054, S029W055, S030W054 e S030W055) na análise da área de estudo. Além disso, utilizou-se, ainda, dados do Satélite Sentinel-2, que faz parte da missão da *European Space Agency* (ESA) lançado em 2015. Esse satélite gera imagens orbitais com período de revisita a cada cinco dias. Sua resolução espacial é dependente da banda espectral específica. Na presente pesquisa, foram utilizadas as bandas 02 azul (490 nm), 03 verde (560 nm) e 04 vermelho (665 nm), de resolução espacial de 10 m.

Imagens aéreas foram adquiridas com o VARP DJI *Phantom 4 PRO* equipamento multirrotor leve e de pequena dimensão, com peso aproximado de 1,5 kg. O mesmo transportou um sensor CMOS de 20 megapixels, de distância focal nominal de 24 mm, que permitiu a aquisição de imagens referentes às bandas do visível (resolução espectral de 490 a 665 nm).

O processamento dos dados do Satélite ALOS Word 3D30 e Sentinel-2 foi realizado no aplicativo Spring v.5.5.5, disponibilizado gratuitamente pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE (Câmara et al., 1996). Algoritmos do ArcGIS v.10.5 foram utilizados em processamentos específicos. Imagens obtidas pelo VARP foram processadas no aplicativo *Agisoft PhotoScan*. O aplicativo *Google Earth Pro* disponibilizou as imagens ópticas de alta resolução, para visualização de detalhes das morfologias de interesse.

3.2 Métodos

A metodologia envolveu duas etapas: (i) análise da rede de drenagem com o auxílio de imagens orbitais, para a definição de padrões de drenagem e caracterização de anomalias; (ii) extração e análise de lineamentos morfoestruturais com o uso do MDE ALOS W3D30 e dados em campo.

3.2.1 Rede de Drenagem

O mapa da rede de drenagem foi gerado a partir da base cartográfica do Estado do RS (Rio Grande do Sul, 2018). Tendo em vista que a mesma já é disponibilizada em *datum* SIRGAS 2000, inicialmente foi realizado um ajuste para o sistema de coordenadas do projeto (UTM), a fim de obter as coordenadas geográficas em coordenadas cartesianas (métricas). Com base neste arquivo, foram realizados o recortes da área de estudo e a exclusão dos cursos d’água de primeira e segunda ordem, gerados pelo método *Strahler* (Sema, 2018) a fim de ter uma visualização mais ampla da rede de drenagem sobre os modelos digitais de elevação, trabalhando com canais de drenagem mais evidentes no terreno. Ambos os processamentos foram realizados com o auxílio do ArcGIS v.10.5.

A segunda etapa de processamento foi a geração de um mapa de densidade de drenagem (Dd). A densidade é expressa pela relação entre o comprimento total de canais de drenagem e a área que ele ocupa (Horton, 1945), então seu cálculo foi obtido por meio da equação $Dd=Lt/A$ (Dd = densidade de drenagem, Lt = comprimento total e A=área em que ocupa).

De posse da base vetorial da rede de drenagem, foram identificados, por interpretação visual, os padrões e as anomalias de drenagem. A metodologia de extração manual, segundo Vargas (2015) é uma ferramenta de baixo custo e de alta eficácia para identificação de comportamentos morfoestruturais no relevo e sua rede de drenagem. Para esta etapa utilizou-se, também, imagens do satélite Sentinel-2, na composição colorida R4G3B2.

3.2.2 Lineamentos

A extração dos lineamentos em escala de nível orbital ocorreu apoiado em produtos derivados do processamento do satélite ALOS W3D30. Os dados foram vetorizados manualmente, levando em consideração o relevo positivo e negativo sobre as variáveis geomorfométricas orientação de vertentes (ON), bem como modelos sombreados de relevo combinados a diferentes padrões personalizados de paletas de cores e tons de cinza. A área de estudo foi representada por um único mosaico, que gerou os subprodutos de orientação de vertentes (ON) e os modelos de relevos sombreados. Os últimos foram escolhidos a partir de diferentes testes de orientação solar e ângulo de iluminação, até identificar três produtos que revelaram maior distinção de feições lineares no terreno. A primeira correspondeu ao azimute de 135°/elevação de 45°/exagero de relevo igual a 10, a segunda ao azimute de 240°/elevação de 45°/exagero de relevo igual a 10, e a terceira ao azimute de 025° elevação de 10°/exagero de relevo igual a 10. De posse dos subprodutos, fez-se a interpretação visual, que possibilitou a extração de traços retilíneos do relevo. Ambos os processamentos foram realizados no SPRING v. 5.5.5, com escala de visualização de 1:200.000.

A análise da disposição espacial dos lineamentos foi gerada baseada em mapas de densidade, obtidos de informações quantitativas de comprimento e número de feições lineares, além das relações espaciais estabelecidas entre elas. Este processamento foi feito no ArcGIS, utilizando-se a ferramenta de geração de mapas de densidade, que calcula a magnitude de vetores por unidade de área com a função de *Kernel* (Silverman, 1988).

As propriedades direcionais dos lineamentos morfoestruturais foram ainda analisadas com base na geração de diagramas de roseta, relativamente ao comprimento absoluto (i.e., tamanho absoluto de lineamentos) em cada intervalo de 010° azimutal, com auxílio do SPRING v.5.5.5.

A validação das informações adquiridas em escala orbital foi feita por levantamento aéreo com o VARP *Phantom 4 Pro*. Para isso,

foi escolhida uma área de afloramento da Formação Tupanciretã, onde fraturas em planta foram previamente identificadas em campo. A área localiza-se no município de Tupanciretã (latitude -29.077430° e longitude -53.867639°; SIRGAS 2000), (ver localização na Figura 1). Com o auxílio da ferramenta, foi possível gerar um mosaico de imagens georeferenciadas no *Agisoft PhotoScan*, possibilitando desenvolver a mesma análise de propriedade direcional dos dados orbitais.

Além dos dados extraídos dos produtos de sensoriamento remoto, também foram utilizadas informações obtidas por meio de registros feitos em trabalhos de campo, realizado em duas campanhas. A primeira campanha ocorreu entre os dias 26 a 30 de novembro de 2018, e a segunda entre 29 de janeiro e 01 de fevereiro de 2020. Nessas ocasiões, fez-se a observação e o registro fotográfico das fraturas, cujas atitudes foram devidamente georreferenciadas e mensuradas. Posteriormente, as medidas obtidas em campo foram submetidas aos cálculos estatísticos de comprimento absoluto propostos aos dados de sensoriamento remoto.

4 Resultados

Os arenitos da Formação Tupanciretã (Figura 3A) possuem cores avermelhadas a amareladas e são de granulometria fina a média, sendo constituídos basicamente de grãos de feldspato alterado, quartzo e caulinita (Menegotto *et al.*, 1968). Esses arenitos são maciços ou estratificados (Figura 3 B, C), ocorrendo estratificações cruzadas tabulares ou acanaladas, em geral de médio porte. Feições erosivas sob forma de voçorocas são comuns (Figura 3 A, D), principalmente em áreas de prática agrícola intensa e de extração mineral. A análise do mapa geológico demonstra que esses depósitos estão distribuídos na área de estudo como uma série de corpos descontínuos, em geral alongados, sendo os maiores localizados a sul (Figura 4). A sobreposição do mapa geológico com o MDE em escala hipsométrica de cores indicou que esses arenitos ocorrem nas maiores altitudes (350 a 675 m) registradas nessa área (Figura 4).

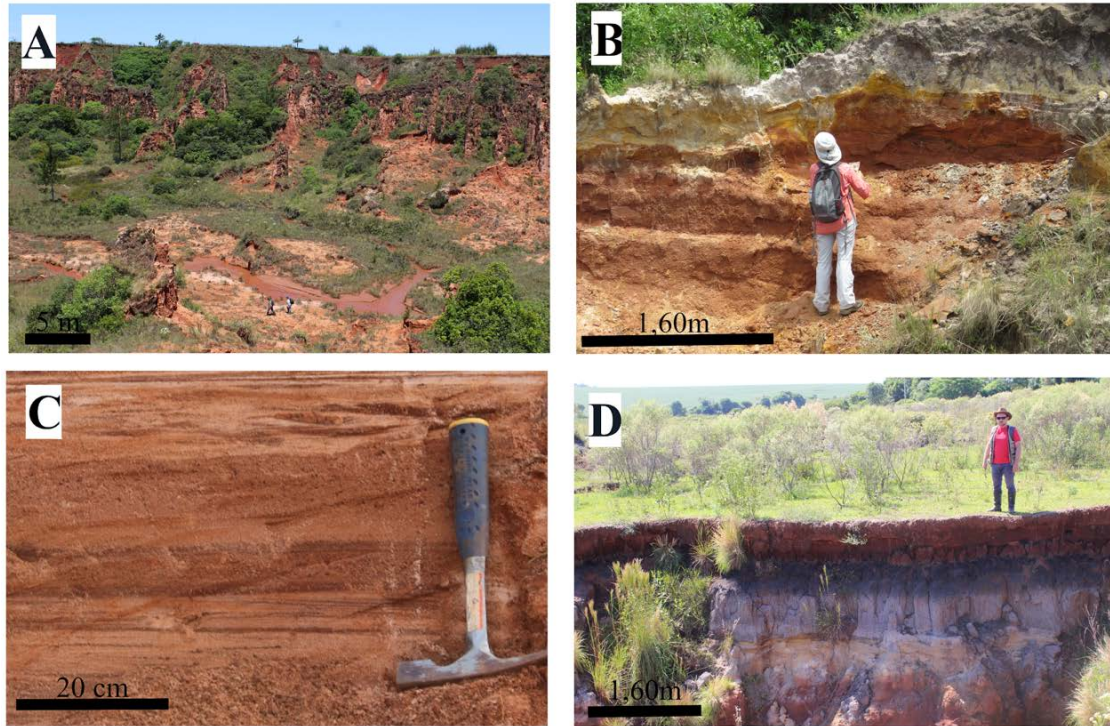


Figura 3. Formação Tupanciretã vista em campo. A, B) Vista geral (A) e detalhe (B) da Voçoroca do Ivaí (Lat. -29.002441° e Long. -53.450939°); C) Detalhe do arenito na base da Voçoroca de Santa Bárbara (Lat. -29.003858° e Long. -53.452828°); D) Margem da Voçoroca (Lat. -29.033142° e Long. -53.315782°).
 Figure 3. Tupanciretã Formation seen in the field. A, B) General view (A) and detail (B) of Voçoroca do Ivaí (Lat. -29.002441° Long. -53.450939°). C) Detail of the sandstone at the base of Voçoroca de Santa Bárbara (Lat. -29.003858° and Long. -53.452828° D) Margin of Voçoroca (Lat. -29.033142° and Long. -53.315782°).

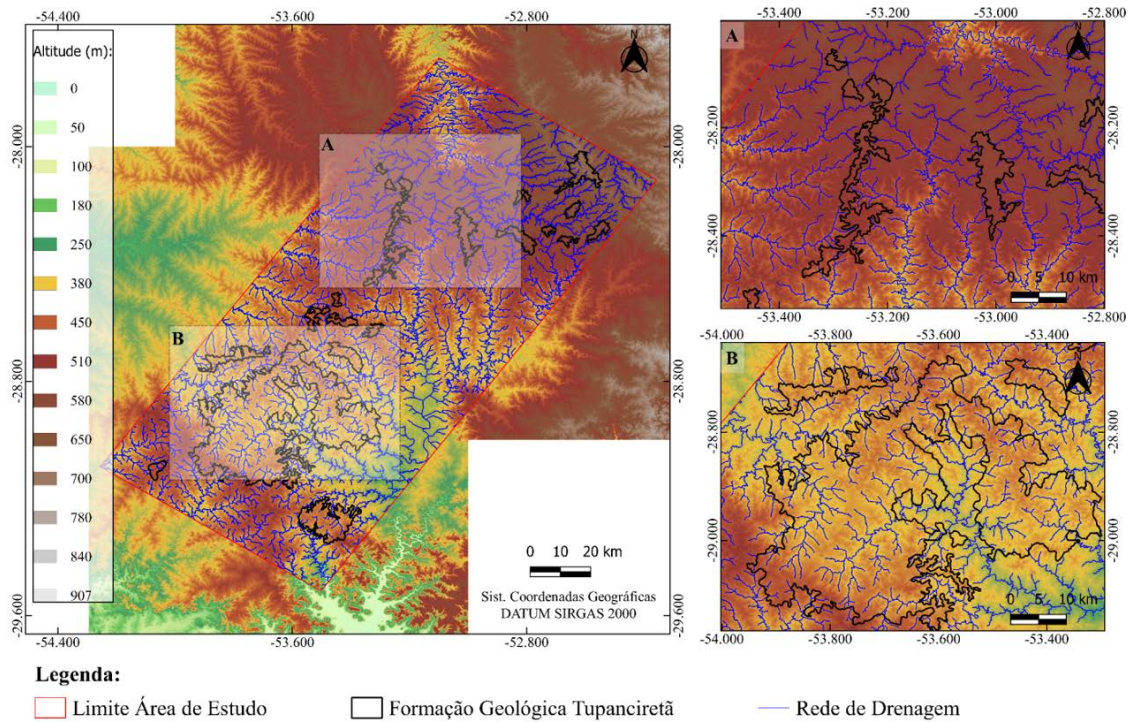


Figura 4. MDE em escala hipsométrica de cores, com sobreposição do mapa de ocorrências da Formação Tupanciretã e o mapa da rede de drenagem.
 Figure 4. DEM in a hypsometric scale of colors, with overlapping the Tupanciretã Formation map and the drainage network map.

A análise da rede de drenagem indicou que a área de estudo se caracteriza por densidade de drenagem variável entre muito baixa a muito alta, com valores entre 0 a 0,80 km/km² (média de 0,40 km/km²) (Figura 5). A rede de drenagem que intercepta a Formação Tupanciretã tem densidade de muito baixa a

alta, porém se concentrando em áreas com domínio de densidade baixa e, secundariamente, muito baixa. As maiores densidades (alta a muito alta) foram verificadas a norte, sobre rochas da Formação Serra Geral.

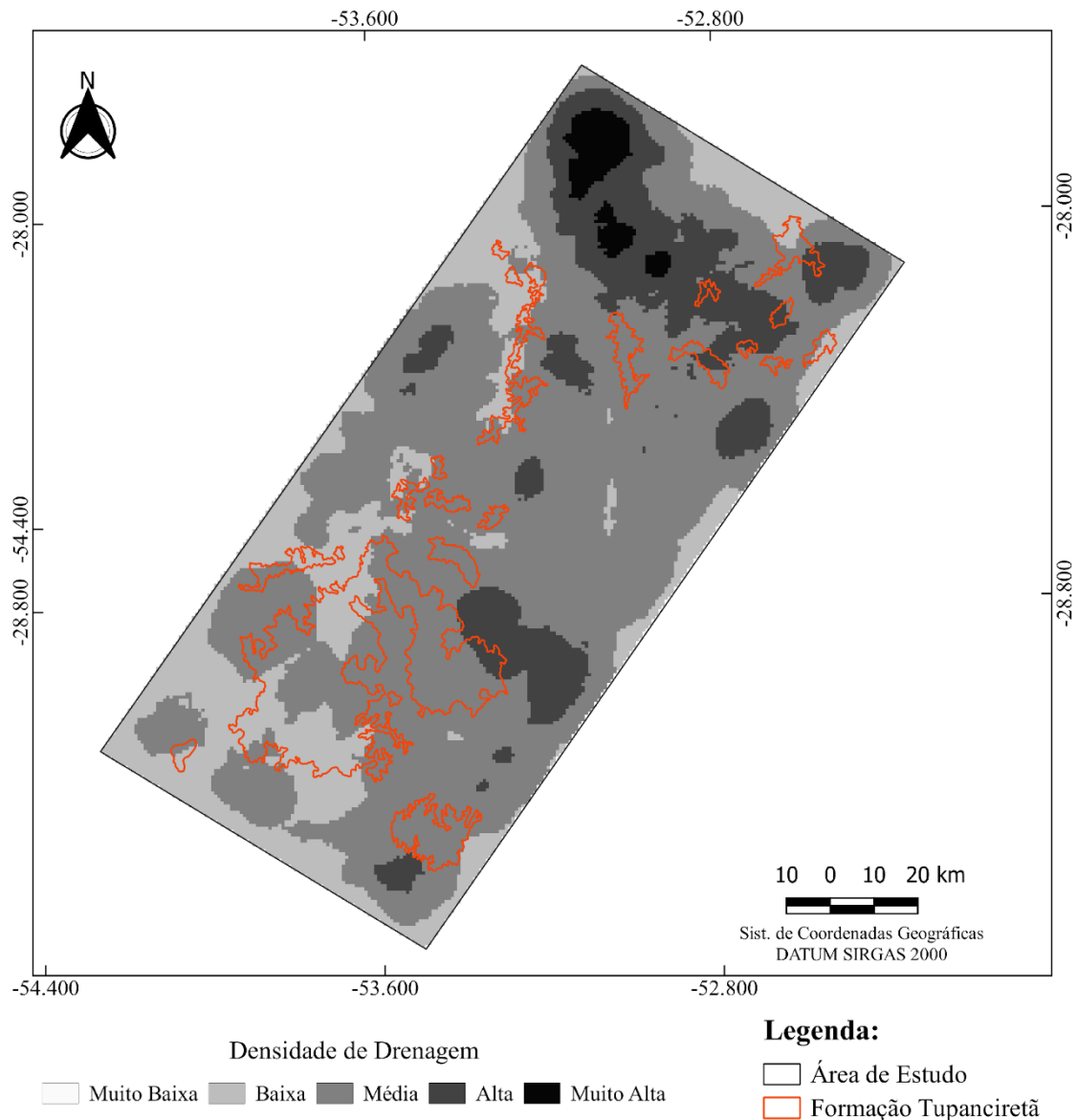


Figura 5. Mapa de densidade de drenagem (Muito Baixa de $\leq 0,10$ – Baixa 0,10 a 0,30 – Média 0,30 a 0,45 – Alta 0,45 a 0,65 – Muito Alta 0,65 a 0,80 km/km²).

Figure 5. Drainage density map (Very Low from ≤ 0.10 – Low 0.10 to 0.30 – Medium 0.30 to 0.45 – High 0.45 to 0.65 – Very High 0.65 to 0, 80 km/km²).

Quatro padrões de drenagem básicos foram identificados na área de estudo: subdendrítico, subtreliça, treliça e treliça recurvada. Dentre esses, há predomínio do padrão subtreliça (área de 8.695 km², 52% da

área total), seguido por treliça (área de 2.950 km², 18% da área total), subdendrítico (área de 2.548 km², 15% da área total) e treliça recurvada (área de 2.427 km², 15% da área total) (Figura 6).

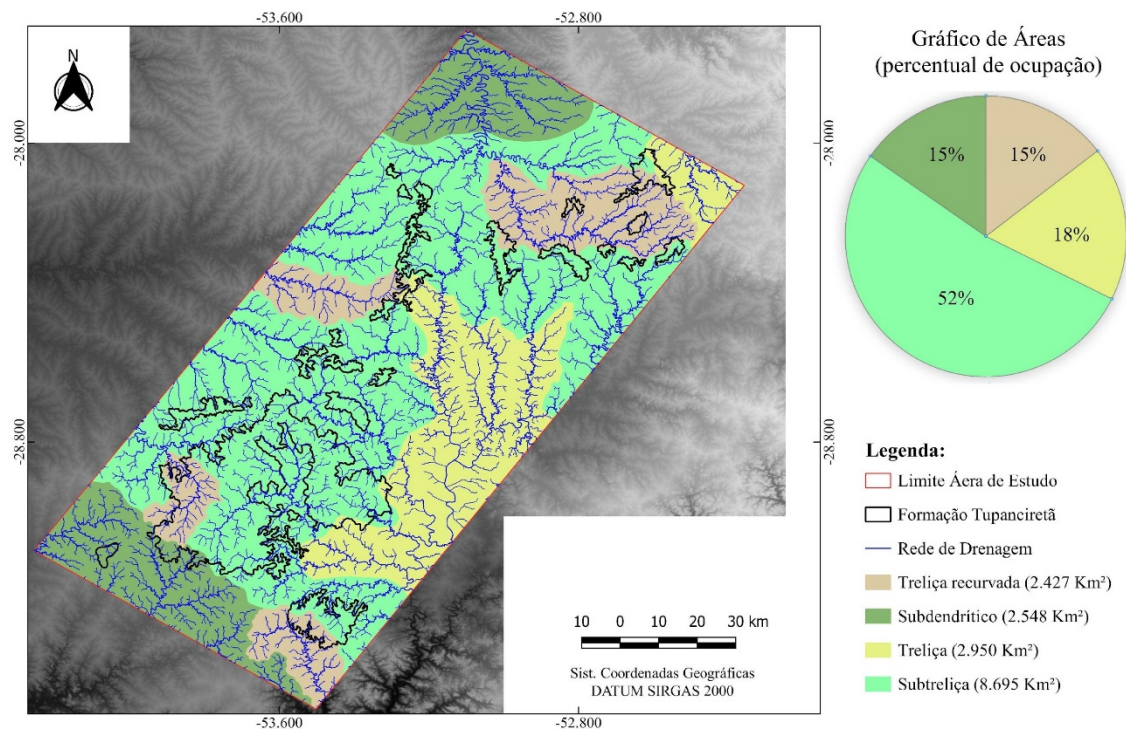


Figura 6. Padrões de drenagem principais identificados na área de estudo.
Figure 6. Main drainage patterns identified in the study area.

A sobreposição do mapa da Formação Tupanciretã com o mapa de classes de drenagem indicou que aproximadamente 90% dessa unidade apresenta drenagem subtreliça, com o restante dividindo-se entre as classes treliça e treliça recurvada.

A análise da rede de drenagem permitiu identificar, ainda, que a área de estudo tem um número elevado (i.e., 625) de anomalias de drenagem representadas por inflexões ortogonais e subortogonais, onde os canais mudam de direção abruptamente em curvas

anômalas (Figura 7). É interessante salientar que essas anomalias ocorrem principalmente a norte, em áreas de drenagem com padrões treliça, treliça recurvada e subdendrítico. As anomalias foram verificadas em diferentes ordens de drenagem, desde afluentes de menor até a maior ordem. Ainda, a incidência de anomalias de drenagem é maior na porção sul da Formação Tupanciretã, sendo quase nula em outras áreas de ocorrência dessa unidade (Figura 8).

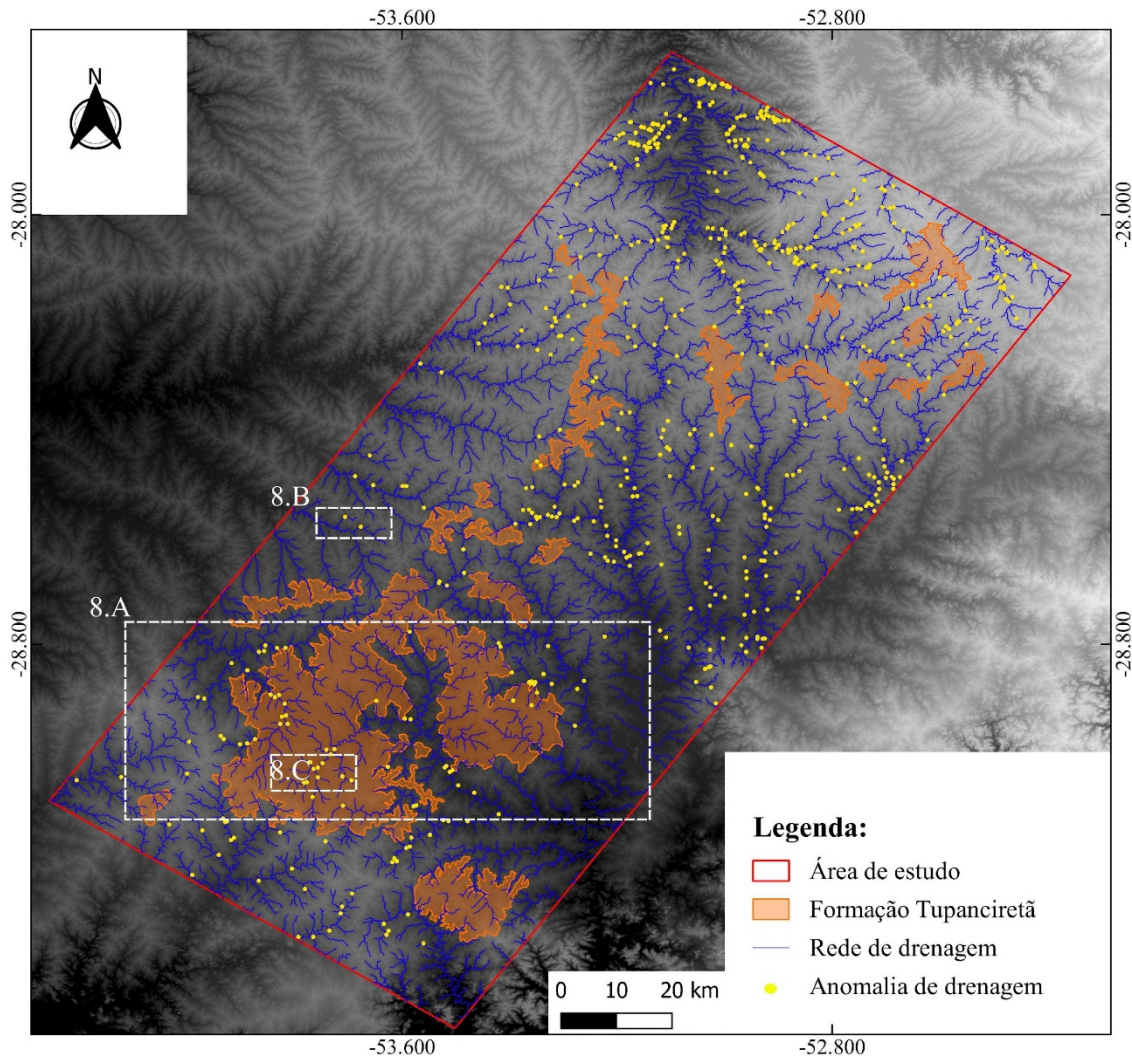


Figura 7. Mapa de anomalias de drenagem, representada por inflexões ortogonais e subortogonais de canais fluviais. Os retângulos descritos como 8.A, 8.B e 8.C referem-se aos limites das áreas apresentadas na Figura 8.

Figure 7. Map of drainage anomalies represented by orthogonal and suborthogonal inflections of river channels. The rectangles described as 8.A, 8.B and 8.C refer to the boundaries of the areas shown in Figure 8.

Os produtos geomorfométricos orientação de vertentes e relevo sombreado foram eficientes na extração de lineamentos morfoestruturais, tanto para baixos como altos topográficos. Em especial, os ângulos de inclinação e direção no relevo sombreado ressaltaram os gradientes topográficos facilitando a extração dos lineamentos morfoestruturais (Figura 9).

Foi extraído um total de 2.108 lineamentos morfoestruturais considerando altos e baixos topográficos, com comprimentos variando entre 100 e 10.000 m. A densidade de lineamentos varia de 0 (muito baixa) a 1,62 km/km² (muito alta). Nas porções

central e norte da área, dominada pela Formação Serra Geral, a densidade varia de média a alta, com predomínio da primeira classe. Para sul, com maiores ocorrências da Formação Tupanciretã, a densidade varia de baixa a muito baixa.

Diagramas de roseta com base nos lineamentos morfoestruturais indicaram duas modas principais de direções E-W e secundariamente NE-SW, sendo esta última sensivelmente mais expressiva na Formação Tupanciretã (Figura 10). Verificou-se, ainda, modas de direção N-S nessa unidade e NW-SE em ambas unidades.

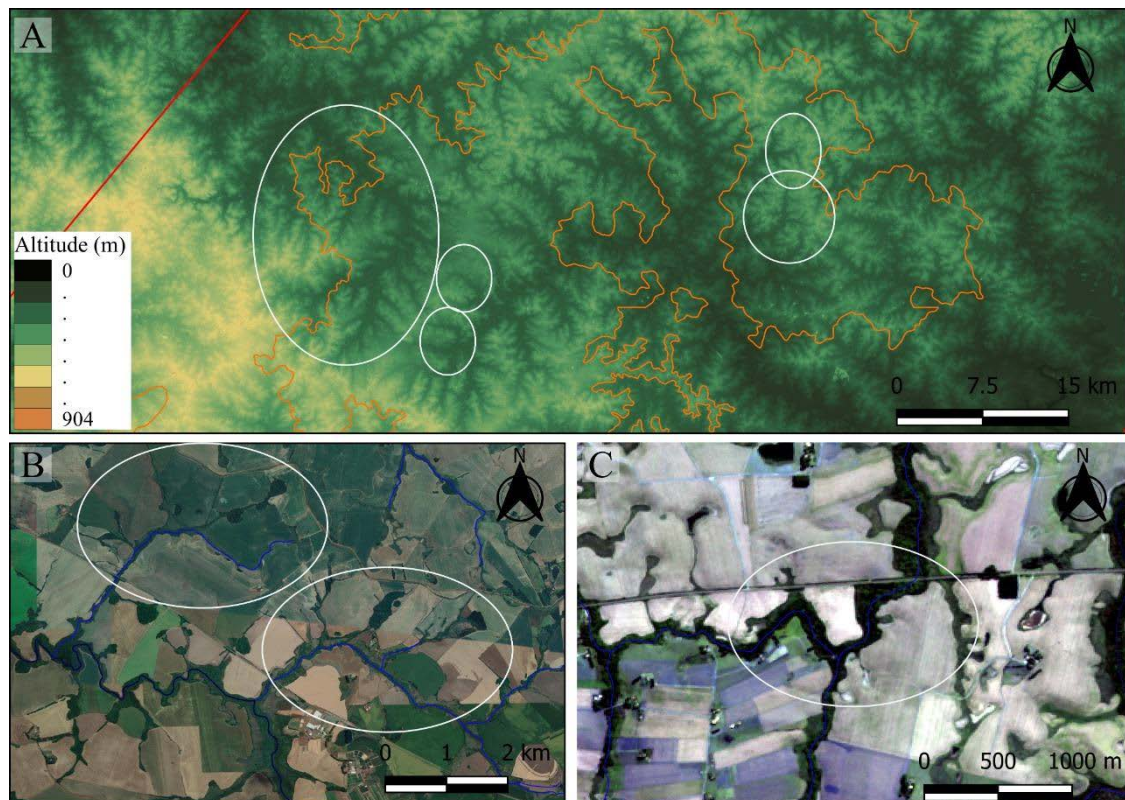


Figura 8. Exemplos de anomalias de drenagem consistindo em inflexões ortogonais/subortogonais em canais visualizadas em diferentes produtos de sensoriamento remoto (ver localização na Figura 7). A) Em MDE ALOS W3D30, com paleta de cores (linha laranja=limite da Formação Tupanciretã); B) Em imagens de alta resolução Google Earth Pro; C) Em imagens do satélite Sentinel-2.

Figure 8. Examples of drainage anomalies consisting of orthogonal / suborthogonal inflections and channels viewed in different remote sensing products (see location in Figure 7). A) In DEM ALOS W3D30, with color palette (orange line = limit of the Tupanciretã Formation); B) In high resolution Google Earth Pro images; C) In images from the Sentinel-2 satellite.

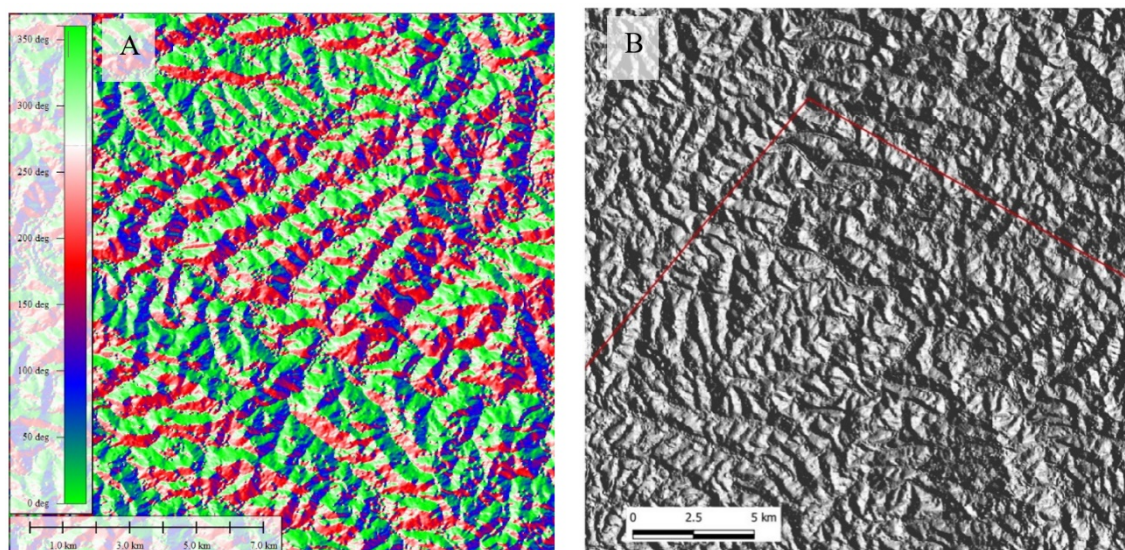


Figura 9. Exemplos de produtos de sensoriamento remoto utilizado na extração de lineamentos morfoestruturais. A) Orientação de vertentes ON; B) Relevo sombreado com azimuth de 25°, elevação de 10°, exagero de relevo igual a 10.

Figure 9. Examples of remote sensing products used in the extraction of morphostructural lineaments. A) slope orientation ON B) Shaded relief with azimuth of 25°, elevation of 10°, exaggeration of relief equal to 10.

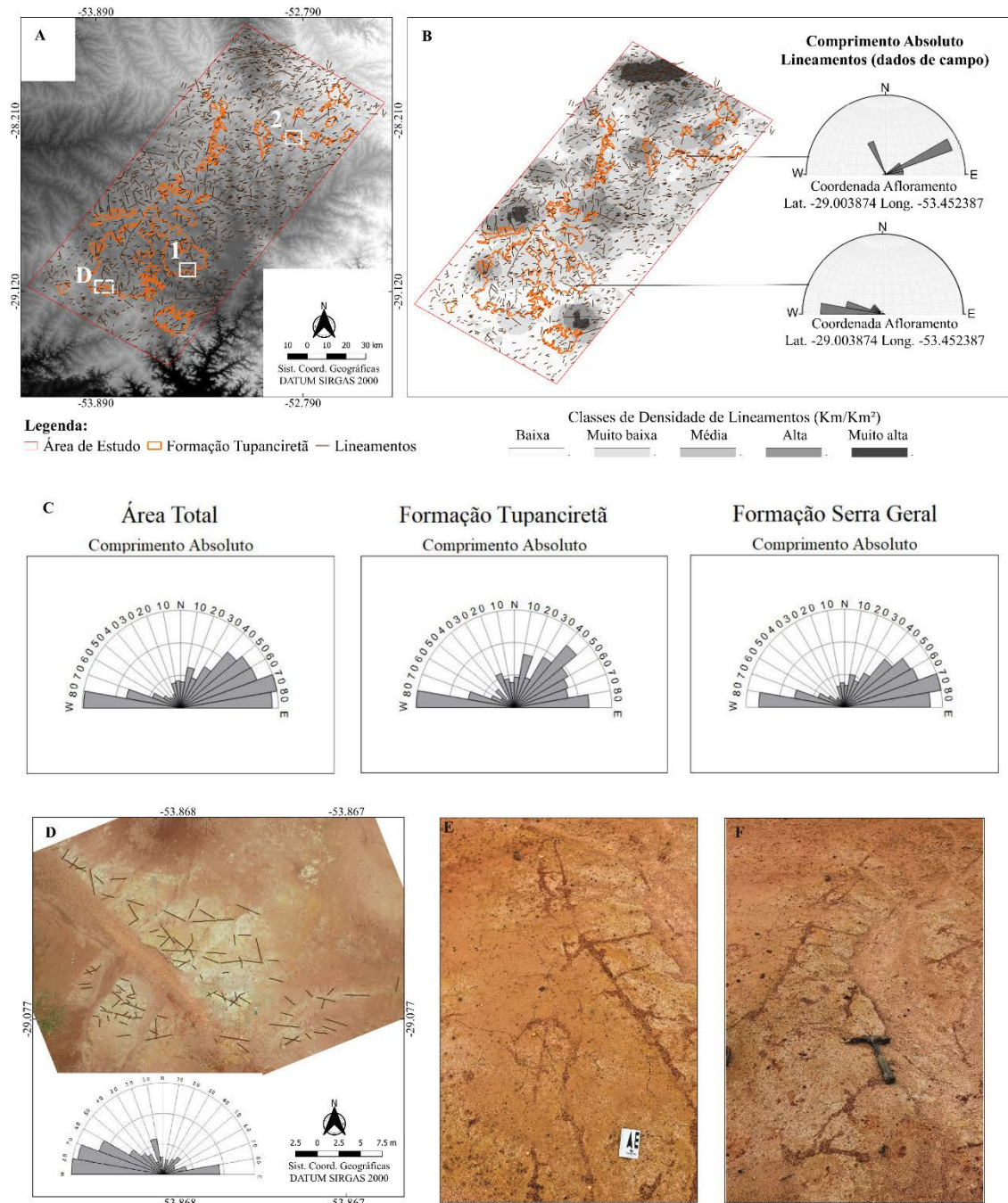


Figura 10. Lineamentos morfoestruturais da área de estudo. A) Lineamentos obtidos com base em dados orbitais e de campo (1 e 2 indicam locais de coleta dos dados de campo mostrados em B); B) Densidade de lineamentos; C) Diagrama de rosetas com dados de comprimento absoluto obtidos de dados orbitais e de campo (ver localização destes em A); D) Lineamentos gerados obtidos de imagens VARP; E e F) Fraturas em planta, registradas nas imagens VARP.

Figure 10. Morphostructural lineaments of the study area. A) Lineaments obtained from orbital and field data (1 and 2 indicate places of collection of field data shown in B); B) Density of lineaments; C) Rosette diagram with absolute length data obtained from orbital and field data (see location in A); D) Lineaments generated from VARP images; E and F) Fractures in the plant, recorded in the VARP images.

5 Discussão

5.1 Eficiência dos MDE ALOS W3D30 na extração de lineamentos morfoestruturais

A análise de dados do MDE estereocópico disponibilizado globalmente pelo ALOS World 3D – 30 m (AW3D30), se mostrou eficiente para a detecção de lineamentos e anomalias morfoestruturais na área de estudo, com base na metodologia abordada no trabalho. Esse MDE permitiu o destaque de morfologias no terreno na escala determinada de 1:200.000, com o uso de paleta de cores e processamento de contraste linear. Além dos dados base, os produtos topográficos gerados deste MDE (i.e., orientação de vertentes e relevo sombreado) auxiliaram no mapeamento das feições de interesse do presente estudo, com ganhos na interpretação visual.

A eficiência de MDEs na análise de lineamentos e anomalias morfoestruturais já foi demonstrada em inúmeras publicações prévias (p.e., Ramli *et al.*, 2010; Andreas & Allan, 2007; Masoud & Koike, 2006; Viridi *et al.*, 2006), inclusive, em áreas do território nacional este tipo de estudo tem crescido recentemente, principalmente em bacias sedimentares na região nordeste (Andrades Filho & Rossetti, 2012a; Alves, 2015). Entretanto, metodologias utilizando dados do MDE-ALOS para esse fim, principalmente em suas versões recentes de abrangência global, foram testadas somente em alguns poucos relevos (p.e., Takaku *et al.*, 2014; Takaku *et al.*, 2016; Tadono *et al.*, 2016; Grohmann, 2018). Esses estudos prévios compararam resultados de análises morfoestruturais derivados de diferentes MDEs, tendo-se sugerido maior eficácia do ALOS W3D30, em detrimento dos demais MDEs globais. Especificamente, sobre a comparação com MDE SRTM, amplamente utilizado em análises geomorfológicas globalmente, os dados ALOS W3D30 possuem maior acurácia vertical testada inclusive em território brasileiro. Embora, seja importante destacar que ambos são compatíveis com a escala 1:50.000, classe A, segundo o Padrão de Exatidão Cartográfica dos Produtos Cartográficos Digitais (PEC-PCD) (Souza *et al.*, 2019).

Na área de estudo, a eficácia na extração de lineamentos morfoestruturais a partir do MDE-ALOS W3D30 foi confirmada com dados de VARP e de campo. Em particular, o uso do VARP permitiu a coleta dos dados em afloramentos dispostos horizontalmente, de uma forma dinâmica e sistemática, além de proporcionar imagens de resolução espacial centimétrica georreferenciada. Essas imagens possibilitam cálculos estatísticos, já que carregam informações cartográficas de latitude, longitude e altitude. Assim, foi possível obter a equivalência direcional dos lineamentos detectados no MDE-ALOS W3D30.

5.2 Análise Morfoestrutural

A análise da rede de drenagem revelou feições anômalas que, embora não exclusivas, são compatíveis com áreas sujeitas a controle tectônico, por exemplo, padrões de drenagem como treliça e seus subtipos são comumente associados com estruturas tectônicas (Howard, 1967; Deffontaines & Chorowicz, 1991). Esses padrões se formam mais comumente por adaptação da drenagem a estruturas geológicas sob forma de uma série de canais tributários dispostos em lados opostos de um canal principal. Em geral, esses tributários são de igual tamanho, retilíneos, paralelos e se conectam ortogonalmente formando o padrão treliça, porém eles também podem ser curvos ou mesmo variarem de comprimento, caracterizando os padrões treliça recurvada e subtreliça, respectivamente. Mudanças súbitas desses padrões, como verificado na porção norte da área de estudo, são consistentes com controle tectônico (p.e., Howard, 1967).

Atividade tectônica na área de estudo é também sugerida pelas abundantes anomalias consistindo em inflexões de drenagem ortogonais a subortogonais verificadas. A ampla ocorrência dessas feições na Formação Serra Geral não é algo inusitado, já que essa unidade pode ter sido afetada por reativações tectônicas ainda associada ao rifteamento continental mesozoico. Porém, a presença abundante dessas anomalias também na Formação Tupanciretã, principalmente em sua porção sul, é interessante. Justamente, a

região onde os arenitos possuem maior ocorrência espacial, preservados junto aos divisores de água. Isto porque, admitindo-se controle tectônico, o fato dessas anomalias ocorrerem na superfície dessa unidade indicaria reativações tectônicas mais recentes, ou seja, após sua origem no Cenozoico.

O fato de a maior densidade de lineamentos morfoestruturais não ocorrerem na área central, onde predominam os sedimentos areníticos, pode ter explicação ao maior tempo de exposição das unidades geomorfológicas aos diferentes eventos tectônicos ocorridos na área. O direcionamento principal E–W dos lineamentos seguido de NE–SW, e em menor ocorrência N–S, este mais expressivo na unidade Formação Tupanciretã, são concordantes com os direcionamentos regionais das estruturas da Bacia do Paraná (Jacques *et al.*, 2014ab, Jacques *et al.*, 2015; Peyerl *et al.*, 2018; Santos *et al.*, 2019; Tomasi & Roisenberg, 2019). Em especial, direcionamentos E–W, predominantes na área de estudo, tem sido extensivamente registrado na porção sul da Bacia do Paraná, seja por reativação de estruturas pré-existentes (Jacques *et al.*, 2014ab; Jacques *et al.*, 2015) e/ou formadas durante o Cenozoico superior por transcorrência durante a abertura do Oceano Atlântico (Santos *et al.*, 2019). Estudos cinemáticos sugerem que estruturas E–W refletem atividades tectônicas do Cenozóico superior, mais precisamente Pleistoceno, na Bacia do Paraná (p.e., Peyerl *et al.*, 2018) e em bacias sedimentares adjacentes (p.e., Chavez-Cuz & Salamuni, 2008). No caso da área de estudo, a predominância de morfoestruturas E–W, validadas com dados de campo, indica que a Formação Tupanciretã foi afetada tectonicamente, possivelmente, em decorrência da dinâmica transcorrente vinculada à expansão do Atlântico Sul, conforme preconizado em estudos similares na porção sul da Bacia do Paraná (p.e., Jacques *et al.*, 2014ab; Jacques *et al.*, 2015). Esta condição é reforçada pelo fato de que as estruturas E–W afetaram acentuadamente, tanto as morfologias da Formação Serra Geral, quanto os depósitos cenozoicos da Formação Tupanciretã. Os dados aqui apresentados

suportam que ambas as unidades tenham sido afetadas pelo regime deformacional que originou as morfoestruturas E–W no Cenozoico e, presumivelmente, também no Pleistoceno (cf. Peyerl *et al.*, 2018).

O direcionamento NE–SW é associado à reativação de macroestruturas antigas do rifte central pré-cambriano dessa bacia (Zalán *et al.*, 1990), bem como aos grábens Sul e Alto Marombas que ocorrem em sua porção sul (Milani, 2004; Hasui, 2010). Além disso, esse direcionamento é compatível com estruturas paleogenas (Peyerl *et al.*, 2018; Santos *et al.*, 2019) e/ou neógenas (Nummer *et al.*, 2014) registradas em áreas adjacentes. A influência de neotectônica com direcionamento NE–SW nos sistemas de drenagem atuais foram registradas em outras áreas do sul do Brasil, como por exemplo ao longo da Falha Alto Iguaçu (Salamuni *et al.*, 2004) e nas zonas de cisalhamento Piên e Alexandra na Serra do Mar Paranaense (Nascimento *et al.*, 2013; 2016).

Os lineamentos de direção N–S, de menor expressão na área de estudo e mais evidentes na Formação Tupanciretã, são provavelmente resultantes do regime compressivo de oeste para leste, causado pela subducção da placa tectônica de Nazca sob a placa sul-americana. Isto porque esse direcionamento é verificado em áreas andinas (p.e., Jacques *et al.*, 2014ab; Jacques *et al.*, 2015), sendo também presente no Cenozoico superior, inclusive Holoceno (Peyerl *et al.*, 2018) na Bacia do Paraná (Santos *et al.*, 2019) e em outras bacias do sul do Brasil (Salamuni *et al.*, 2003, 2004; Chavez-Cuz & Salamuni, 2008).

Por outro lado, a ocorrência subordinada de lineamentos NW–SE na área de estudo sugere que estruturas como o Sinclinal de Torres e o Arco de Rio Grande, alinhadas nessa direção (Zalán *et al.*, 1990; Milani, 2004; Hasui, 2010), tiveram pouco ou nenhum controle no relevo.

Assim, as morfoestruturas registradas na área de estudo resultam mais provavelmente da reativação de estruturas pré-existentes desde o Cretáceo, inclusive durante o Cenozoico. Morfoestruturas E–W e N–S tem sido cada vez mais registradas em estudos que destacam a importância de

deformações neotectônicas no sul do Brasil. A reativação tectônica sugerida para a área de estudo poderia melhor explicar a geração de espaço para acomodação dos sedimentos da Formação Tupanciretã nas altas elevações do Planalto Meridional. Esta hipótese difere da proposição anterior que os depósitos vulcanoclástico-epiclásticos sobre a Formação Serra Geral estariam ainda relacionados com a abertura continental do início do Cretáceo (Ricomini *et al.*, 2016). Essas hipóteses podem ser melhor avaliadas com a continuidade das investigações visando o melhor detalhamento das morfoestruturas na área de estudo e em áreas adjacentes.

6 Conclusões

A utilização combinada de dados geomorfométricos de orientação de vertentes e relevo sombreado derivados do MDE-ALOS W3D30 teve sucesso no mapeamento de lineamentos morfoestruturais e identificação de anomalias de drenagem. As imagens do satélite Sentinel – 2 foram importantes para a definição de anomalias e padrões de drenagem, sendo eficientes na interpretação dos dados em escala regional. Imagens VARP *Phantom 4* foram importantes na visualização e medição de fraturas morfoestruturais em campo, contribuindo no processo de validação em análise multiescala.

Os padrões de drenagem predominantemente treliçados, e suas variações, associados à ocorrência de anomalias de drenagem, foram atribuídos a cursos d'água com controle estrutural, tanto sobre a Formação Serra Geral, quanto sobre a Formação Tupanciretã. Assim, o mais provável a se considerar é que a origem dos lineamentos morfoestruturais refletem reativações de estruturas tectônicas pré-existentes, principalmente ao longo do Cenozóico. Foram estabelecidas duas fases deformacionais principais no Cenozoico. No Cenozoico inferior, as reativações de estruturas do arcabouço pré-cambriano da Bacia do Paraná foram responsáveis pela conformação do arranjo morfoestrutural NE–SW. É possível que este arranjo esteja associado aos processos deformacionais vinculados à geração do espaço de

acomodação dos sedimentos da Formação Tupanciretã sobre a Formação Serra Geral. No Cenozoico superior, a reativação de estruturas formadas durante a dinâmica transcorrente vinculada à abertura do Atlântico Sul pode explicar a predominância das morfoestruturas E–W, dominantes na área de estudo. As duas unidades estudadas foram afetadas por esse evento de grande magnitude na conformação da margem leste da América do Sul, dada pela divergência das placas sul-americana e africana. Ainda no Cenozoico superior, morfoestruturas menos proeminentes, de orientação N–S, podem sugerir reativações mais recente, na placa sul-americana, marcado pelo campo de compressão E–W causado pela subducção da placa tectônica de Nazca sob a placa sul-americana.

Agradecimentos. Os autores agradecem a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul – FAPERGS pelo financiamento do projeto intitulado Evolução tectono-sedimentar Cretáceo-Quaternária na porção meridional da Bacia do Paraná, sul do Brasil: o papel da tectônica sobre a paisagem atual (FAPERGS: 17/2551-0000809-0) ao qual a presente pesquisa está vinculada. Os autores também agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), instituição responsável pelo Sistema Nacional de Pós-Graduação (SNPG) do Brasil e que abarca o Programa de Pós-graduação em Ambiente e Sustentabilidade (PPGAS), no qual o projeto de pesquisa foi executado.

Referências

- ALOS. Advanced Land Observing Satellite. *Modelo Digital de Elevação. Disponível em:* <<https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/aw3d30>>. Acesso em: 15 nov. 2018.
- Almeida, F.F.M. 1967. *Origem e evolução da plataforma brasileira. Rio de Janeiro. DNPM*, 36 p.
- Almeida Filho, R., Rossetti, D.F., Miranda, F.P., Ferreira, F.J., Silva, C. & Beisl, C. 2009. Quaternary reactivation of a basement structure in the Barreirinhas Basin, Brazilian Equatorial Margin. *Quaternary Research*, 72(1): 103-110.

- Alves, F.C. 2015. *Análise morfoestrutural das bacias dos rios Paraíba e Mamanguape (PB), com base em MDE-SRTM e imagem PALSAR/ALOS-1*. São José dos Campos, 151 p. Dissertação de Mestrado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.
- Alves, F.C., Rossetti, D.F. & Valeriano, M.M. 2020. Detecting neotectonics in the lowlands of Amazonia through the analysis of river long profiles. *Journal of South American Earth Sciences*, 100: 1-11.
- Andrades Filho, C.O. & Rossetti, D.F. 2012a. Effectiveness of SRTM and ALOSPALSAR data for identifying morphostructural lineaments in northeastern Brazil. *International Journal of Remote Sensing*, 33(4): 1058-1077.
- Andrades Filho, C.O. & Rossetti, D.F. 2012b. Caracterização morfoestrutural da parte central emersa da Bacia Paraíba (PB). *Geociências (UNESP)*, 31(1): 13-29.
- Andreas, M.A.A. & Allan, A. 2007. Incorporating geology and geomorphology in land management decisions in developing countries: a case study in Southern Costa Rica. *Geomorphology*, 87(1-2): 68-89.
- Bezerra, F.H.R., Rossetti, D.F., Oliveira, R.G., Medeiros, W.E., Brito Neves, B.B., Balsamo, F., Nogueira, F.C.C., Dantas, E.L., Andrades Filho, C. & Goes, A.M. 2014. Neotectonic reactivation of shear zones and implications for faulting style and geometry in the continental margin of NE Brazil. *Tectonophysics*, 614: 78-90.
- Bezerra, F.H.R. & Vita-Finzi, C. 2000. How active is a passive margin? Paleoseismicity in northeastern Brazil. *Geology*, 28(7): 591-594.
- Bricalli, L.L. & Mello, C.L. 2013. Padrões de lineamentos relacionados à litoestrutura e ao fraturamento neotectônico (Estado do Espírito Santo, SE do Brasil). *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 14: 301-311.
- Câmara, G., Souza, R.C.M., Freitas, U.M. & Garrido, J. 1996. SPRING: Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modelling. *Computers & Graphics*, 20(3): 395-403.
- Chavez-Kus, L. & Salamuni, E. 2008. Evidência de tensão N-S intraplaca no neógeno, Complexo Atuba - Região de Curitiba (PR). *Revista Brasileira de Geociências*, 38(3): 439-454.
- Cogné, N., Cobbold, P.R., Riccomini, C. & Gallagher, K. 2013. Tectonic setting of the Taubaté Basin (Southeastern Brazil): Insights from regional seismic profiles and outcrop data. *Journal of South American Earth Sciences*, 42: 194-204.
- CPRM. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. 2006. *Mapa Geológico do Estado do Rio Grande do Sul: Escala 1:750.000*. Disponível em: <www.cprm.gov.br/publique/media/geologia_basica/.../mapa_rio_grande_sul.pdf>. Acesso em: 02 nov. 2018.
- Deffontaines, B. & Chorowicz, J. 1991. Principles of drainage basin analysis from multisource data: application to the structural analysis of the Zaire Basin. *Tectonophysics*, 194(3): 237-263.
- Gamermann, N., Carraro, C.C., Erick, N.C. & Bortoluzzi, C.A. 1973. Geotransversal brasileira norte-sul (parcial). Projeto Internacional do Manto Superior. Rio Grande do Sul. *Pesquisas em Geociências*, 1: 49-60.
- Grohmann, C.H. 2018. Evaluation of TanDEM-X DEMs on selected Brazilian sites: Comparison with SRTM, ASTER GDEM and ALOS AW3D30. *Remote Sensing of Environment*, 212: 121-133.
- Hasui, Y. 2010. A grande colisão Pré-Cambriana do Sudeste Brasileiro e a estruturação regional. *Geociências*, 29(2): 141-169.
- Horton, R.E. 1945. Erosional development of streams and their drainage basin: hydrographical approach to quantitative morphology. *Geological Society of American Bulletin*, 56(3): 275-370.
- Howard, A.D. 1967. Drainage analysis in geologic interpretation: A summation. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 51(11): 2246-2259.
- Jacques, P.D., Machado, R. & Nummer, A.R. 2015. Análise Estrutural da Formação Serra Geral na porção Centro-Sul do Estado de Santa Catarina, Brasil. *Geociências*, 34(3): 390-401.
- Jacques, P.D., Machado, R., Oliveira, R.G. de., Ferreira, F.J.F., Castro, L.G. de. & Nummer, A.R. 2014a. Correlation of

- lineaments (magnetic and topographic) and Phanerozoic brittle structures with Precambrian shear zones from the basement of the Paraná Basin, Santa Catarina State, Brazil. *Brazilian Journal of Geology*, 44(1): 39-64.
- Jacques, P.D., Salvador, E.D., Machado, R., Grohmann, C.H. & Nummer, A.R. 2014b. Application of morphometry in neotectonic studies at the eastern edge of the Paraná Basin, Santa Catarina State, Brazil. *Geomorphology*, 213: 13-23.
- JAXA. Japan Aerospace Exploration Agency. 2015. *ALOS Global Digital Surface Model "ALOS World 3D - 30m (AW3D30)"*. Disponível em: <<https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/aw3d30/>>. Acesso em: 10 jun. 2018
- Machado, L.G. 2010. *Evolução morfotectônica do Alto de Florianópolis que segmenta as bacias de Santos e Pelotas, margem sudeste da costa brasileira*. Niterói, 125 p. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal Fluminense.
- Marques, A., Zanotto, O.A., França, A.B., Astolfi, M.A.M. & Paula, O.B. 1993. *Compartimentação tectônica da bacia do Paraná*. PETROBRAS/NEXPAR, p.87, (relatório interno).
- Masoud, A. & Koike, K. 2006. Tectonic architecture through Landsat-7 ETM+/SRTM DEM-derived lineaments and relationship to the hydrogeologic setting in Siwa region, NW Egypt. *Journal of African Earth Sciences*, 45(4-5): 467-477.
- Menegotto, E., Sartori, P.L.P. & Maciel Filho, C.L. 1968. Nova sequência sedimentar sobre a Serra Geral no Rio Grande do Sul. *Instituto de Solos e Culturas*, 1: 1-19.
- Milani, E.J. 2004. Comentários sobre a origem e a evolução tectônica da Bacia do Paraná. In: Montesso-Neto, V., Bartorelli A., Carneiro C.D.R., Brito-Neves B.B. (eds.). *Geologia do Continente Sul-Americano – evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. São Paulo, Becca, p. 265-279.
- Milani, E.J., Melo, J.H.G., Souza, P.A., Fernandes, L.A. & França, A.B. 2007. Bacia do Paraná. *Boletim de Geociências da Petrobras*, 15(2): 265-287.
- Milani, E.J. & Ramos, V.A. 1998. Orogenias paleozóicas no domínio sulocidental do Gondwana e os ciclos de subsidência da Bacia do Paraná. *Revista Brasileira de Geociências*, 28(4): 527-544.
- Nascimento, E.R., Salamuni, E., Queiroz, G.L., Hauck, P.A. & Fiori, A.P. 2013. Evidências de determinação morfotectônica e neotectônica no relevo da serra do mar no estado do Paraná. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 14: 287-299.
- Nascimento, E.R., Salamuni, E. & Cordeiro Santos, L.J.C. 2016. Morphostructure of the Serra Do Mar, Paraná State, Brazil. *Journal of Maps*, 12: 1-8.
- Nummer, A.R., Machado, R. & Jaques, P.D. 2014. Tectônica transcendente mesozoica/cenozoica na porção leste do Planalto do Rio Grande do Sul, Brasil. *Pesquisas em Geociências*, 41(2): 121-130.
- Peyerl, W.R.L., Salamuni, E., Farias, T.F.S. & Gimenez, V. 2018. Reactivation of Taxaquara Fault and its morphotectonic influence on the evolution of Jordão River catchment, Paraná, Brasil. *Brazilian Journal of Geology*, 48(3): 553-573.
- Pinto, M.L. & Vidotti, R.M. 2019. Tectonic framework of the Paraná basin unveiled from gravity and magnetic data. *Journal of South American Earth Sciences*, 90: 1-46.
- O'leary, D.W., Friedman, J.D. & Pohn, H.A. 1976. Lineament, linear, lineation: some proposed new standards for old terms. *GSA Bulletin*, 87: 1463-1469.
- Ramli, M.F., Yusof, N., Yusof, M.K., Juahir, H. & Shafri, H.Z.M. 2010. Lineament mapping and its application in landslide hazard assessment: a review. *Bulletin of engineering Geology and the Environment*, 69(2): 215-233.
- RSBR. Rede Sismográfica Brasileira. *Boletim Sísmico Brasileiro*. Disponível em: <<http://www.rsbr.gov.br/>>. Acesso em: 01 jun. 2020.
- Riccomini, C., Santanna, L.G. & Fambrini, G.L. 2016. The Early Cretaceous Jacuí Group, a newly discovered volcanoclastic-epiclastic accumulation at the top of the Paraná Basin, southern Brazil. *Cretaceous Research (Print)*, 59: 111-128.

- Rio Grande do Sul. 2018. *Base Cartográfica do Estado do Rio Grande do Sul - Escala 1:25.000. Versão 1.0*. Porto Alegre, Secretaria do Ambiente e Desenvolvimento Sustentável, Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luiz Röessler. Disponível em: <<http://ww2.fepam.rs.gov.br/bcrs25/>>. Acesso em: 9 jan. 2019.
- Rossetti, D.F., Bezerra, F.H., Góes, A.M. & Brito Neves, B.B. 2011. Sediment deformation in Miocene and post-Miocene strata, Northeastern Brazil: evidence for paleoseismicity in a passive margin. *Sedimentary Geology*, 235(3-4): 172-187.
- Salamuni, E., Ebert, H.D., Borges, M.S., Hasui, Y., Costa, J.B.S. & Salamuni, R. 2003. Tectonics and sedimentation of the Curitiba Basin. *Journal of South American Earth Sciences*, 15(8): 901-910.
- Salamuni, E., Ebert, H.D. & Hasui, Y. 2004. Morfotectônica da Bacia Sedimentar de Curitiba. *Revista Brasileira de Geociências*, 34(4):469-478.
- Santos, J.M. dos, Salamuni, E., Silva, C.L. da, Sanches, E., Gimenez, V.B. & Nascimento, E.R. do. 2019. Morphotectonics in the Central-East Region of South Brazil: Implications for Catchments of the Lava-Tudo and Pelotas Rivers, State of Santa Catarina. *Geomorphology*, 328:138-156.
- SEMA. Secretaria do Ambiente e Desenvolvimento Sustentável. 2018. *Base Cartográfica do Estado do Rio Grande do Sul, Escala 1:25.000 – BCRS25*. Porto Alegre, Sema.
- Silverman, B.W. 1988. Density Estimation for Statistics and Data Analysis. *Journal of the American Statistical Association*, 83(401): 269-270.
- Souza, M., Ramos, A.P.M. & Marcato Junior, J. 2019. Análise da Acurácia Altimétrica do Modelo Digital de Superfície ALOS AW3D30 para o Mato Grosso do Sul. *Anuário do Instituto de Geociências UFRJ*, 42(3): 333-338.
- Szatmari, P., Françolin, J.B.L., Zanotto, O. & Wolff, S. 1987. Evolução tectônica da margem equatorial brasileira. *Revista Brasileira de Geociências*, 17(2): 180-188.
- Tadono, T. et al. 2016. Initial Validation of the 30 m-mesh Global Digital Surface Model Generated by ALOS PRISM. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLI-B4: 157-162.
- Takaku, J., Tadono, T. & Tsutsui, K. 2014. Generation of High Resolution Global DSM from ALOS PRISM. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-4: 243-248.
- Takaku, J., Tadono, T., Tsutsui, K. & Ichikawa, M. 2016. Validation of 'AW3D' Global DSM Generated from ALOS PRISM. *Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, III-4: 25-31.
- Tomasi, L.C. & Roisenberg, A. 2019. Hydrogeological Context and its Relationship with the Tectonic of the Serra Geral Aquifer System in the Ijuí River Basin, Rio Grande do Sul State. *Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ*, 42(2): 40-49.
- Vargas, K.B., Sordi, M.V., Couto, E.V. & Fortes, E. 2015. Extração de lineamentos para identificação de controles estruturais no município de Mauá da Serra – PR. *Revista Equador, Teresina*, 4(3): 322-328.
- Virdi, S., Philip, G. & Bhattacharya, S. 2006. Neotectonic activity in the Markanda and Bata river basins, Himachal Pradesh, NW Himalaya: a morphotectonic approach. *International Journal of Remote Sensing*, 27(10): 209-2099.
- Zalán, P.V., Wolff, S., Conceição, J.C.J., Marques, A., Astolfi, M.A.M., Vieira, I.S., Appi, V.T. & Zanotto, O. A. 1990. Bacia do Paraná. In: Raja-Gabaglia, G. P. & Milani, E. J. (orgs.). *Origem e evolução de bacias sedimentares*. Rio de Janeiro, Petrobras.