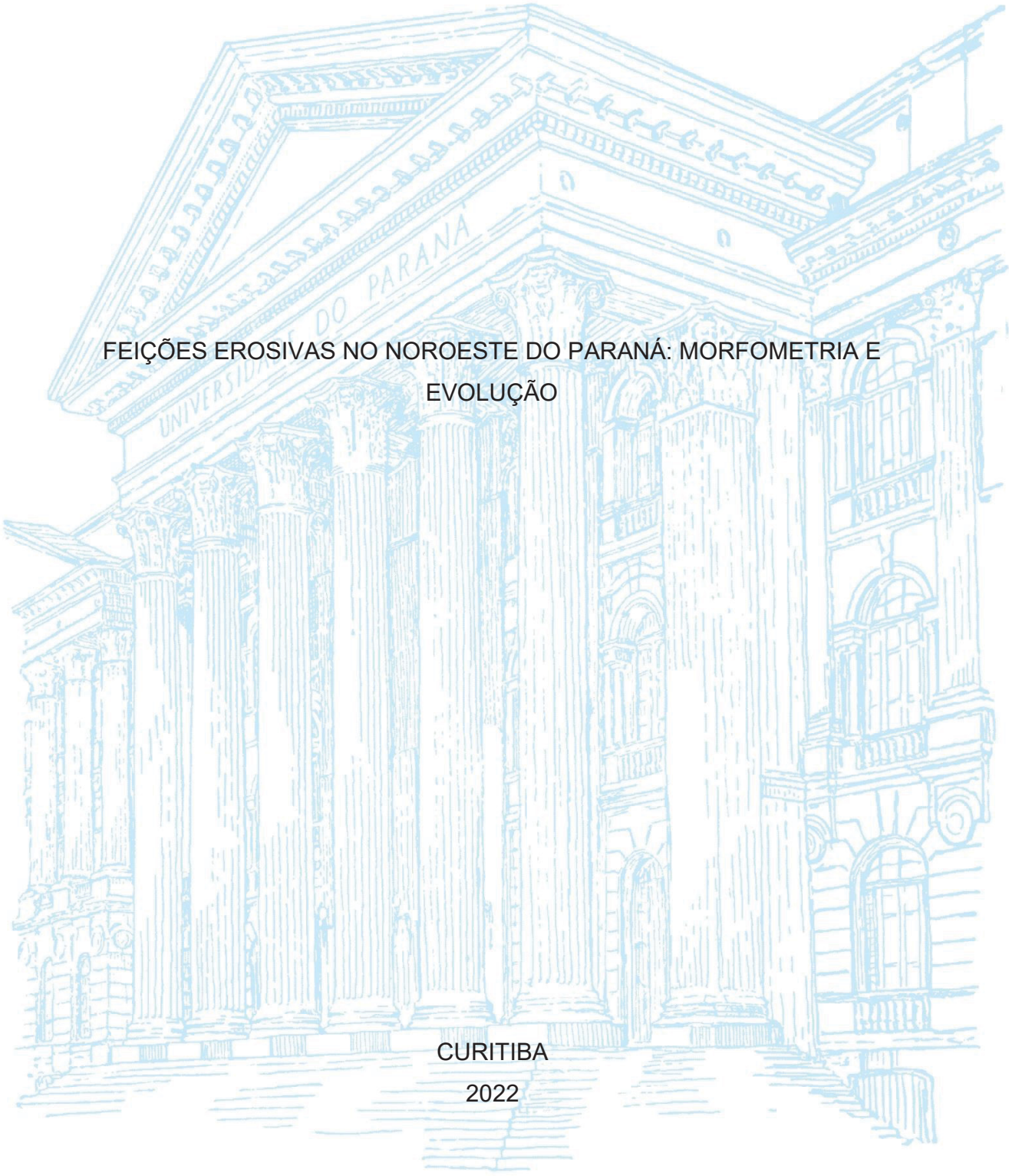
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

MARIANNE OLIVEIRA



FEIÇÕES EROSIVAS NO NOROESTE DO PARANÁ: MORFOMETRIA E EVOLUÇÃO

CURITIBA

2022

MARIANNE OLIVEIRA

FEIÇÕES EROSIVAS NO NOROESTE DO PARANÁ: MORFOMETRIA E EVOLUÇÃO

Dissertação apresentada ao curso de Programa de Pós-Graduação em Geografia, curso de Mestrado, Setor de Ciências da Terra da Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Geografia.

Orientação: Leonardo José Cordeiro Santos

CURITIBA

2022

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Oliveira, Marianne
Feições erosivas no noroeste do Paraná: morfometria e evolução. / Marianne Oliveira. – Curitiba, 2022.
1 recurso on-line : PDF.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra, Programa de Pós-graduação em Geografia.

Orientação: Leonardo José Cordeiro Santos.

1. Morfometria. 2. Erosão. 3. Paisagem. I. Santos, Leonardo José Cordeiro. II. Universidade Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Geografia. III. Título.

Bibliotecária: Roseny Rivelini Morciani CRB-9/1585

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE CIENCIAS DA TERRA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO GEOGRAFIA - 40001016035P1

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em GEOGRAFIA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **MARIANNE OLIVEIRA** intitulada: **Feições erosivas no noroeste do Paraná: morfometria e evolução.**, sob orientação do Prof. Dr. LEONARDO JOSÉ CORDEIRO SANTOS, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 11 de Março de 2021.

Assinatura Eletrônica
15/03/2021 18:16:58.0
LEONARDO JOSÉ CORDEIRO SANTOS
Presidente da Banca Examinadora (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica
16/03/2021 15:17:34.0
ANDREA TEDESCO
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA)

Assinatura Eletrônica
15/03/2021 16:02:24.0
RICARDO MICHAEL PINHEIRO SILVEIRA
Avaliador Externo (INSTITUTO FEDERAL DO PARANÁ)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, que me fez ver que tudo são escolhas, e abençoou as minhas, que está acima de nós e nos revela sua sabedoria.

A minha família, meus pais, minha irmã e irmãos, ao meu companheiro Paulo C. Hilgemberg Vieira, por todo apoio nas minhas escolhas e suporte em todos os momentos, meu muito obrigada.

Agradeço ao meu orientador Profº Dr. Leonardo José Cordeiro Santos pela oportunidade e pelos ensinamentos nestes dois últimos anos. Obrigada por me fazer ver os caminhos, as possibilidades, e me proporcionar crescimento pessoal e científico.

Ao Programa de Pós-Graduação em Geografia da UFPR, e a Sra. Alexandra Aparecida Gama pela ajuda quando necessário.

À Universidade Federal do Paraná (UFPR) pela estrutura, equipamentos e recursos, proporcionando as condições necessárias para desenvolvimento da pesquisa, mesmo em meio a pandemia.

Aos amigos do Laboratório de Biogeografia e Solos – LABS, Adriano Ávila Goulart, Maira Oneda Dal Pai, Otacílio Lopes de Souza Paz, Luciane Marcolin, Raquel Rodrigues, Nathalia Lyra e José Guilherme Oliveira a vocês meu muito obrigada, todas as trocas, aprendizagens e o tempo juntos foi essencial e gerou boas recordações.

Agradeço em especial aos que fizeram muito mais do que necessário para meu crescimento profissional e estiveram disponíveis sempre que precisei, Maira Oneda Dal Pai, Otacílio Lopes de Souza Paz e Adriano Ávila Goulart.

Aos amigos que estiveram comigo e me ajudaram de outras formas Jessica Liziane Gadotti, Victor Hugo Colino, Bruno Meyer e aos amigos que compartilham um lar comigo e alegram meus dias, Schirley, Leticia, Giovani, Emanoel, Thassia e Pércia obrigada pela amizade.

Ainda agradeço aos professores do passado por me tornarem o que sou com seus ensinamentos. Em especial, Profª Andrea Tedesco, Profª Ligia Maria Cassol Pinto, Profº João Alfredo Madalozo e Profª Selma Regina Aranha Ribeiro que levarei para vida como exemplos a seguir e como amigos, muito obrigada.

RESUMO

A colonização do Noroeste do Paraná se deu após a retirada da vegetação nativa, desencadeando o surgimento de erosões urbanas e rurais principalmente nas cabeceiras de drenagem. A utilização de imagens de sensoriamento remoto permitiu a constatação de que existiam erosões com características distintas daquelas relacionadas à influência antrópica. Estas contrastam com as características morfológicas regionais. Assim, com o apoio de índices morfométricos e evidências de campo buscou-se desenvolver um modelo de evolução espacial dessas feições erosivas localizadas sobre um divisor hidrográfico, situado entre as bacias do Ivaí e Paranapanema. Também foram definidos os seguintes objetivos específicos: comparar modelos digitais de elevação para métricas do relevo; extrair a morfometria das feições; avaliar a estabilidade dos divisores por algoritmos aplicados a modelos digitais de elevação e caracterizar a rede de drenagem. Para responder aos objetivos utilizou-se os seguintes métodos e técnicas: aquisição de imagens de campo com RPA; comparação e escolha do modelo digital de elevação; índices morfométricos; caracterização da rede de drenagem por algoritmos matemáticos e desenvolvimento de um modelo evolutivo. A partir das métricas e de dados de campo foi possível definir quatro estágios de evolução para as feições; o primeiro estágio representa a sua configuração atual, o segundo a evolução do relevo a partir do ajuste de uma captura de drenagem; o terceiro a união das três feições por pequenos segmentos e por fim no quarto, a coalescência de todas as feições.

Palavras-chave: índices morfométricos; feições erosivas; MDE; evolução da paisagem.

ABSTRACT

The colonization of Northwest Paraná occurred after the removal of it's native vegetation this triggered the emergence of urban and rural erosions mainly at the headwaters of drainage, but it was also noted that there were erosions with different characteristics distinct from those related by anthropic influence. The use of remote sensing images allowed the verification that erosions existed characteristics distinct from those related to anthropic influence. These contrast with the regional morphological characteristics. Therefore, with the support of morphometric indexes and field evidence, sought develop a model of spatial evolution of these erosive features located on a hydrographic divider, between the Ivaí and Paranapanema hydrographic basins. Also, the following specific objectives were defined: to compare digital elevation models for relief metrics; extract the morphometry of the features; evaluate the stability of the dividers by algorithms applied to digital elevation models and characterize the drainage network. To achieve to the objectives, the following methods and techniques: acquisition of field images with RPA; comparison and choice of the digital elevation model; morphometric indexes; characterization of the drainage network by mathematical algorithms and development of an evolutionary model. From the measurements and field data, it is possible four stages of evolution have been defined for the features. The first stage: represents your current configuration; the second, the evolution of the relief from the adjustment of a drainage capture; the third, the union of the three features by small segments, and finally in the fourth, the coalescence of all the features.

Keywords: morphometric indices; erosive features; MDE; landscape evolution.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1– Ocorrência das formas visíveis. 10
FIGURA 2- Localização das feições 11
FIGURA 3 - Localização das feições erosivas existentes nas bacias hidrográficas ao norte do rio Ivaí. 13
FIGURA 4- Localização da área de estudo e sede municipal de Loanda. 14
FIGURA 5 – Ocorrência das formações do Grupo Caiuá. 15
FIGURA 6 – Sub unidades morfoestruturais. 17
FIGURA 7 – Distribuição dos solos no Noroeste do Paraná. 18
FIGURA 8 – Diagrama de blocos. 19
FIGURA 9 – Plano de voo e área de recobrimento do voo. 20
FIGURA 10 - Informações resultantes no raster de saída da direção das encostas. Fonte: ArcGIS Pro, 2020. 25
FIGURA 11 - Formas do terreno. 25
FIGURA 12 - Representação da diferença entre bacias em equilíbrio e desequilíbrio: (A) uma bacia em desequilíbrio e que evolui para (B) uma bacia em equilíbrio. (C) a bacia agressiva está mais baixa e conduz o divisor a bacia vítima que perde sua área para o agressor. (D) representação em perfil da cabeceira do agressor e da vítima em desequilíbrio (pontos verde e vermelho) e sua transferência para um divisor estável (cinza claro). 28
FIGURA 13- Imagens das feições obtidas por RPA. (A) imagem de referência, em (B) e (E) indícios de erosão na cabeceira; Em (C) e (D) processos erosivos na feição 3; (F) divisor entre as feições 2 e 3. 31
FIGURA 14- Vegetação remanescente preenchendo as feições anômalas. (A) e (B) vegetação densa em toda a extensão da feição; (C) vegetação fragmentada, com indícios de processos erosivos ativos. 32
FIGURA 15- Aerolevantamento por RPA sobre as áreas com certa instabilidade verificadas em campo 34
FIGURA 16- Modelo Digital de Elevação gerado a partir do aerolevantamento. 35
FIGURA 17- Dimensões do *swath* nas duas feições, com extensão de 12 km. 37
FIGURA 18- Perfil *swath* dos modelos. 39
FIGURA 19- Perfil longitudinal dos rios. 42

FIGURA 20 - Declividade regional e no interior das feições..... 43
FIGURA 21- Relevo irregular no interior das feições comprovando a existência de altas declividades. Ponto de observação da figura, ponto 1 na figura 20.... 43
FIGURA 22 - Orientação das vertentes..... 44
FIGURA 23 - Formas das vertentes. 45
FIGURA 24– Representação dos valores chi, que variam de azul (baixo) para vermelho (alto) para as bacias de estudo..... 47
FIGURA 25- Representação dos valores do fator chi para o divisor, onde os valores mais baixos representam o lado do divisor agressor e valores altos o lado do divisor vítima. As setas indicam as áreas mapeadas em detalhe e na figura são os trechos com maior contraste nas cores da bacia agressiva. 48
FIGURA 26- Perfil dos rios. 49
FIGURA 27 - Índice chi e as métricas de Gilbert (elevação, relevo e gradiente). 51
FIGURA 28- Histograma dos valores de desvio padrão para os canais próximos ao divisor. 52
FIGURA 29– Gráfico com os valores de desvio padrão e erro médio padrão e bootstrap do divisor. 53
FIGURA 30- Gráfico com desvio padrão e erro médio padrão dos segmentos do divisor. 54
FIGURA 31- Localização dos canais e seções dos divisores..... 55
FIGURA 32- Gráfico do desvio padrão, erro padrão e bootstrap do divisor, dividido em dois segmentos T1 e T2 respectivamente no gráfico. 56
FIGURA 33- Ocorrência de *knickpoints* (pontos brancos) próximo às feições e nos canais próximos ao divisor e identificação dos canais para perfis longitudinais. 57
FIGURA 34- Perfis dos rios. (B) canais 1A e 1B; (C) canais 1A e 4A; (D) canais 1B e 4A; (E) canais 4A e 2A; (F) 4A e 3A..... 58
FIGURA 35- Estimador de densidade Kernel da rede de drenagem que compõe as bacias das feições erosivas. 59
FIGURA 36- Densidade Kernel da rede de drenagem sobre o arenito Caiuá.. 60
FIGURA 37 – Modelo evolutivo das feições erosivas. 62

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ALOS-PALSAR	Advanced Land Observing Satellite
ICR	Índice de Concentração de Rugosidade
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
ITCG	Instituto de Terras, Cartografia e Geologia do Paraná
JAROS	Japan Resources Observation System Organization
JAX	Japan Aerospace Exploration Agency
MA	Milhões de anos
MDE	Modelo Digital de Elevação
MDT	Modelo Digital do Terreno
NGA	National Geospatial-Intelligence Agency
REM	Radiação Eletromagnética
RADAR	Radio Detection And Ranging
RPA	Aeronave Remotamente Pilotada
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 9

2. ÁREA DE ESTUDO 13

3. MATERIAIS E MÉTODOS 19

3.1. DADOS DE IMAGEAMENTO TERRESTRE POR RPA 19

3.2. DADOS ALTIMÉTRICOS 21

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES 30

4.1. DADOS DE IMAGEAMENTO TERRESTRE POR RPA 30

4.2. DADOS ALTIMÉTRICOS 36

4.2.1. Análise comparativa de modelos digitais do terreno 36

4.3. ÍNDICES MORFOMÉTRICOS 42

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES 63

6. REFERÊNCIAS 65

1. INTRODUÇÃO

A colonização da região Noroeste do Estado do Paraná teve como principal finalidade ocupar os “espaços vazios” do interior do Estado, a partir de incentivos do governo. Na região esse impulso teve como motor a expansão da cultura cafeeira que ocorreu “do Ivaí ao Piquiri no Norte Novíssimo e deste até o Rio Iguaçu no Extremo Oeste Paranaense, entre as décadas de 1940 e 1960, quando encerrou o expansionismo da cafeicultura paranaense” (CANCIAN, 1981, p. 50).

Para o desenvolvimento dessa atividade foi suprimida a floresta nativa que recobria a região, transformando-a em áreas para o plantio e para ocupação humana, e assim surgiram grandes áreas de culturas, pastos artificiais, e solo exposto sujeito à ação de processos erosivos, como consequência pequenas áreas relictuais de florestas (MAACK, 2012).

Esse processo de ocupação sobre o arenito Caiuá gerou erosões de grande porte nas áreas urbanas e rurais da região, ligadas, principalmente, às cabeceiras de drenagem. Maack (1953) advertiu desde o início do processo de ocupação sobre a necessidade de um planejamento que considerasse os aspectos físicos e ecológicos da região.

Um grande número dessas erosões em áreas urbanas foi controlado por ações do poder público ao longo das últimas décadas, enquanto as erosões em áreas rurais, parte foi abandonada e as erosões se estabilizaram naturalmente, e protegem os solos dos efeitos de agentes externos, enquanto outras ainda continuam em processo de evolução.

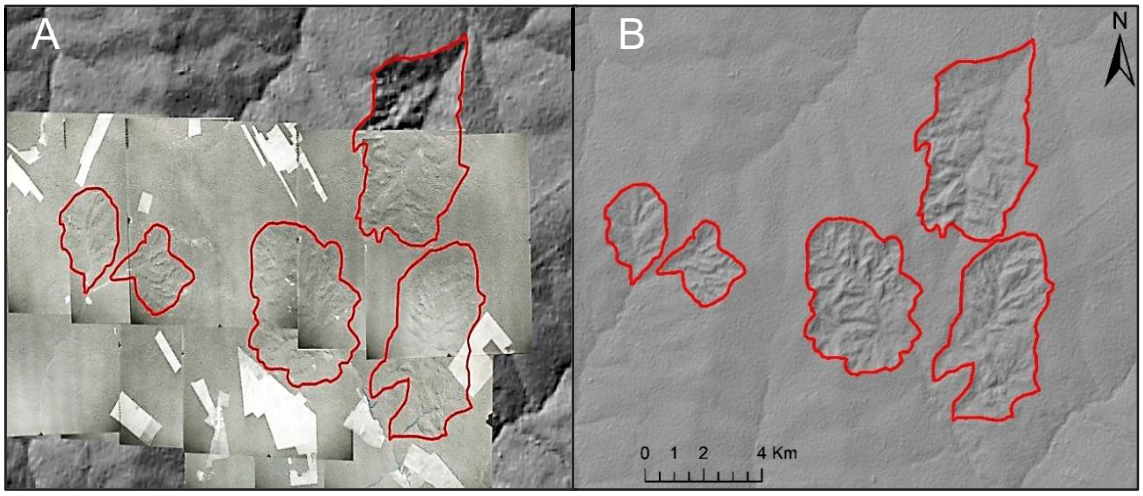
Bigarella e Mazuchowski (1985) relataram a existência de feições erosivas, identificadas pontualmente na região, com características e gênese que contrastam com aquelas relacionadas ao uso e ocupação do solo. Foram interpretadas pelos autores como feições com gênese associada a condições climáticas distintas das atuais e com formação ocorrida durante o Quaternário.

Essa hipótese levantada pelos autores supracitados pode ser reforçada ao se analisar as fotos obtidas a partir do primeiro levantamento aerofotogramétrico realizado para o Estado do Paraná na década de 1950 (figura 1A). Nessas fotos é possível identificar várias formas erosivas aparentemente

estabilizadas e ainda recobertas com a vegetação natural característica da região e o início do desmatamento no entorno das feições.

Com o desenvolvimento de novos produtos de fotogrametria e de sensoriamento remoto (SR), como os modelos digitais de elevação (MDEs), utilizados para representar o relevo, a identificação dessas formas erosivas ficou mais fácil (figura 1B).

FIGURA 1– Ocorrência das formas visíveis.



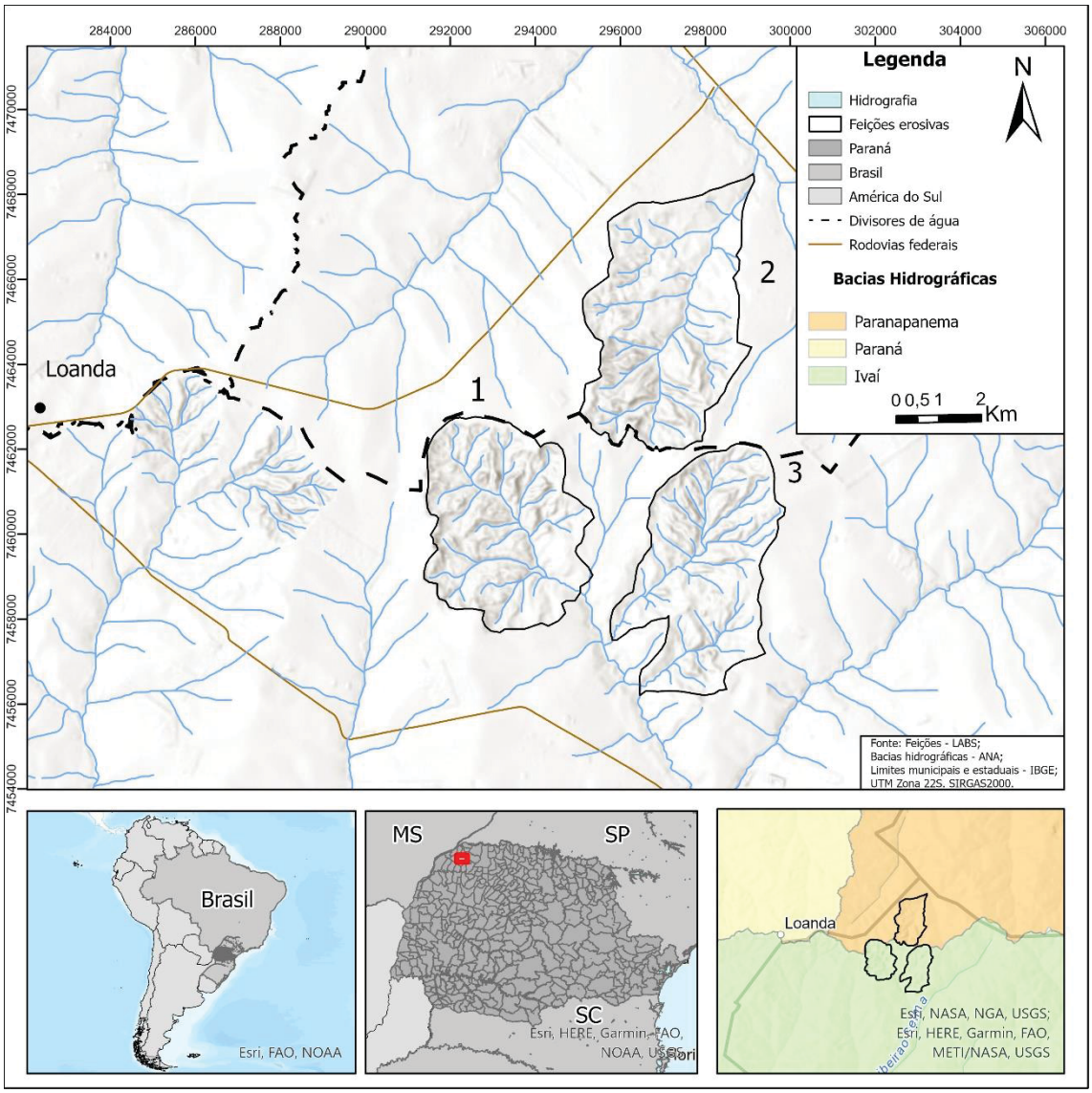
Em (A) mapeamento aerofotogramétrico de 1953 e relevo sombreado ao fundo para as áreas sem imagens, (B) modelo digital de elevação SRTM. Fonte: A autora, 2020.

Várias décadas após a publicação do artigo que identificou e sugeriu as primeiras hipóteses relativas à gênese dessas feições erosivas (BIGARELLA; MAZUCHOWSKI, 1985), essas feições voltaram a ser objeto de análise, entretanto, esses estudos se limitaram a identificá-las e caracterizá-las, sem, portanto, avançar na compreensão da sua gênese. Dentre esses trabalhos pode-se destacar Nakashima (1999), Couto (2015), Fumiya et al. (2016) e Fumiya (2017).

Goulart et al. (2018), a partir da aplicação do Índice de Rugosidade de Concentração (ICR), observaram que essas feições contrastam com as características morfológicas regionais. Segundo os autores, essas feições poderiam ser classificadas como anômalas ao relevo circundante, principalmente no que se refere a sua gênese.

Na região Noroeste do Paraná, essas feições erosivas se concentram entre as bacias hidrográficas do rio Ivaí e do rio Paranapanema. No que se refere a sua distribuição espacial, algumas encontram-se dispersas enquanto outras estão agrupadas como as existentes na área de estudo (figura 2).

FIGURA 2- Localização das feições.



Fonte: A autora, 2021.

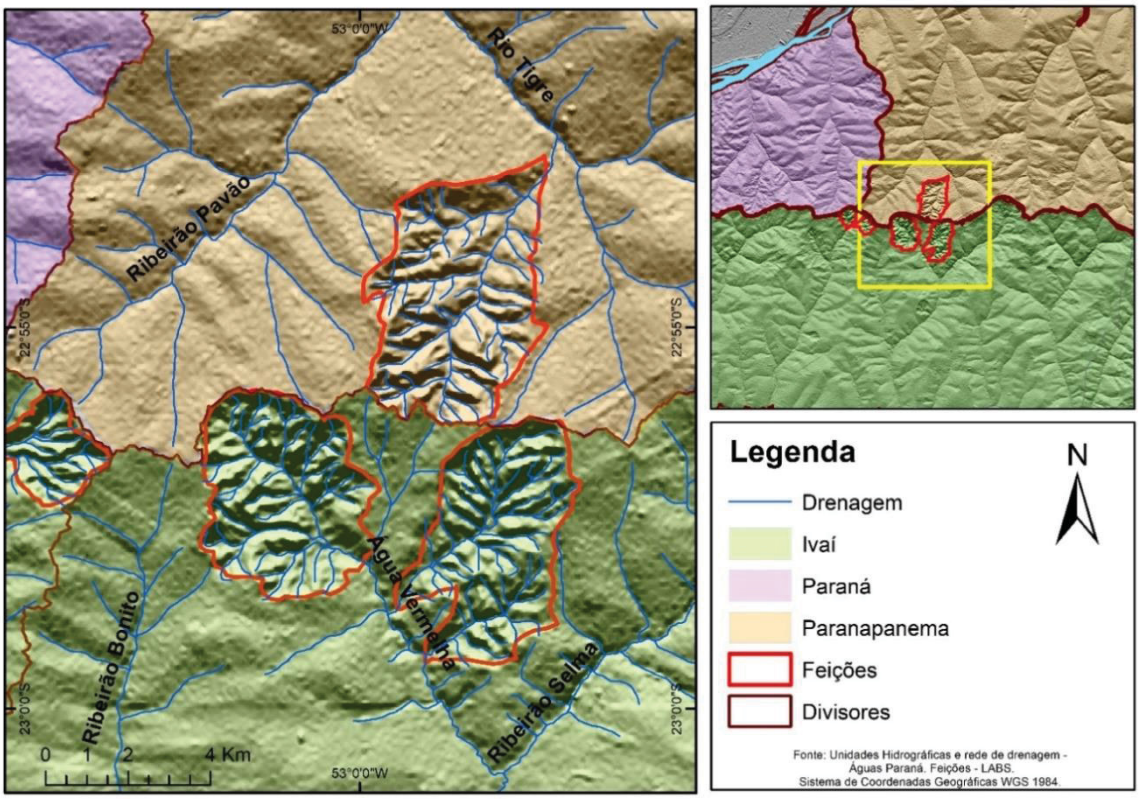
As feições agrupadas têm as suas cabeceiras situadas sobre um divisor de águas. Essa configuração espacial permite levantar a ideia de que uma retomada dos processos erosivos nessas feições promoverá um aumento na sua área e o fato delas se situarem próximas umas das outras poderá gerar um processo de coalescência.

A expansão das feições pela erosão remontante ocorreria associada à incisão da rede de drenagem e ao colapso das bordas ou erosão em subsuperfície (*piping*), que podem estar intimamente ligados à expansão ou evolução da rede de drenagem (MAGALHÃES JUNIOR; BARROS, 2020). Esse processo promoveria uma mudança na configuração das feições erosivas e alteração das drenagens do seu interior.

A hipótese de coalescência dessas feições teve como suporte os resultados da aplicação do ICR para a região (GOULART; OLIVEIRA E SANTOS, 2018). Segundo esses autores, as feições anômalas encontradas pontualmente na porção norte do rio Ivaí já ocorreram também na porção sul, porém devido à taxa de denudação mais elevada (COUTO, 2015), houve uma coalescência dessas feições erosivas e a dissecação do relevo encontra-se em estágio mais avançado se comparada à porção norte.

Assim, com apoio de índices morfométricos e evidências de campo, o objetivo da pesquisa foi desenvolver um modelo preditivo da evolução espacial dessas feições erosivas localizadas sobre um divisor hidrográfico, situado entre as bacias do Ivaí e Paranapanema (Figura 3). Para atingir esse objetivo, foram definidos os seguintes objetivos específicos: selecionar um modelo digital de elevação adequado para métricas do relevo; extrair a morfometria das feições; avaliar a estabilidade dos divisores por algoritmos aplicados a modelos digitais de elevação e caracterizar a rede de drenagem.

FIGURA 3 - Localização das feições erosivas existentes nas bacias hidrográficas ao norte do rio Ivaí.



Fonte: A autora, 2020.

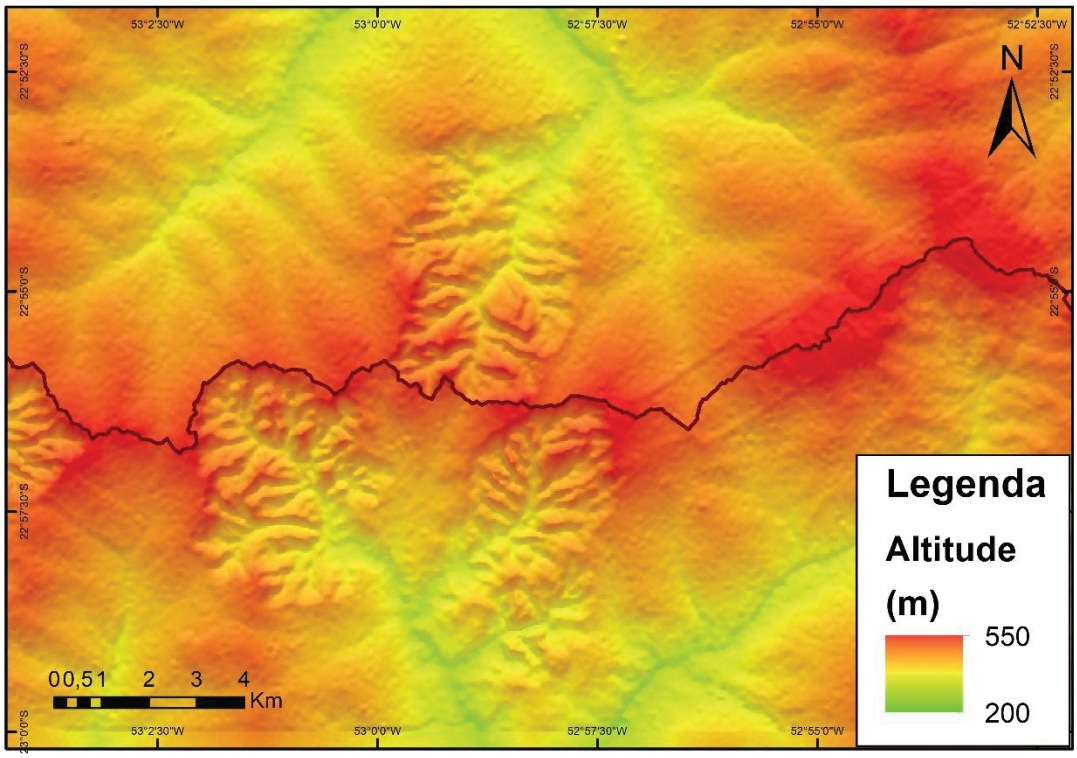
2. ÁREA DE ESTUDO

As feições localizam-se entre as bacias hidrográficas dos rios Ivaí e do Paranapanema. As três feições estão próximas à bacia do Paraná e do perímetro urbano do município de Loanda, que se encontra no contato entre as três bacias sobre o divisor (Figura 4). O quadro 1 apresenta as dimensões das feições, o número de seus canais de 1º e 2º e suas respectivas bacias.

Feições erosivas	Dimensão	Nº de canais de 1º	Nº de canais de 2º	Bacia hidrográfica
1	15,2 km²	22	6	Ivaí
2	18,6 km²	32	9	Paranapanema
3	15,6 km²	33	8	Ivaí

Quadro 1 – Caracterização das feições erosivas. Fonte: A autora, 2021.

FIGURA 4- Localização da área de estudo sobre o divisor hidrográfico.



Fonte: A autora, 2021.

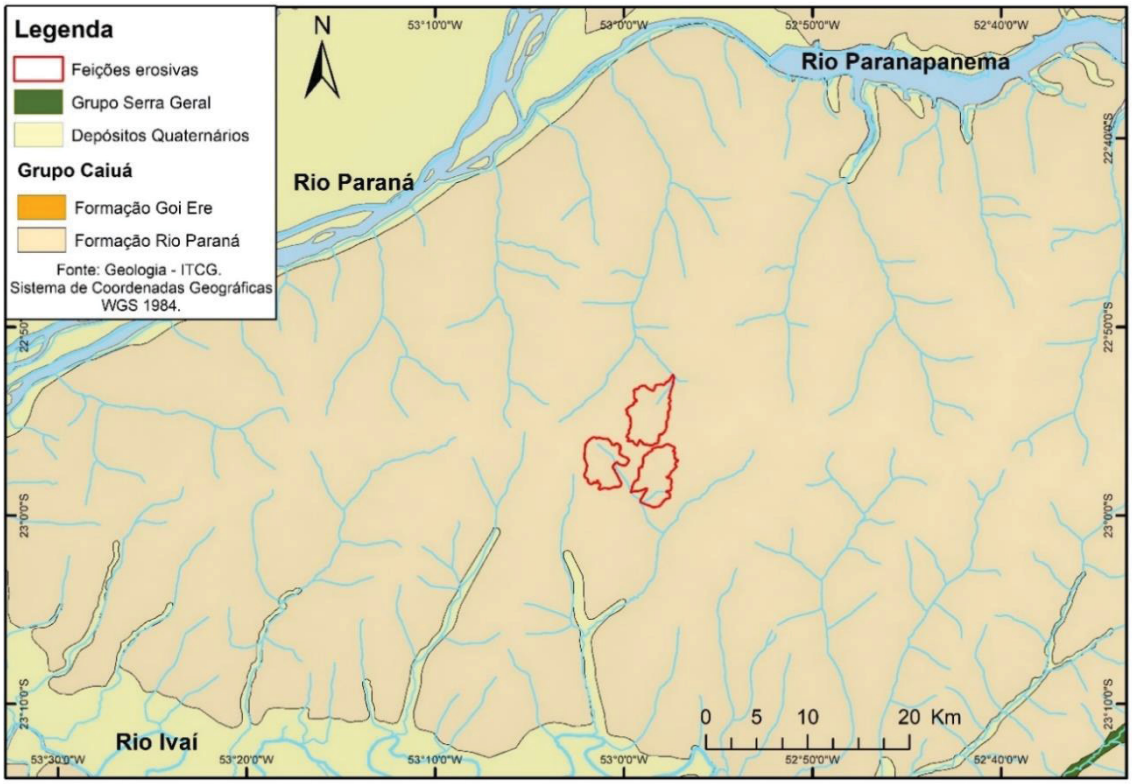
Esta região apresenta formações sedimentares que integram a bacia Bauru (Cretáceo Superior). Além do estado do Paraná, a bacia Bauru está presente nos estados do Mato Grosso do Sul, Minas Gerais e Goiás, (MILANI *et. al.* 2007).

A bacia Bauru divide-se entre o grupo Bauru e o grupo Caiuá. O grupo Bauru apresenta as formações Uberaba, Vale do Rio do Peixe, Araçatuba, São José do Rio Preto, Presidente Prudente, Marília e Taiúva. O grupo Caiuá está presente a sudoeste da bacia Bauru nos estados do Paraná, São Paulo e Mato Grosso do Sul e divide-se pelas formações: Santo Anastácio, Goioerê e Rio Paraná (FERNANDES, 1992).

O processo de formação da Bacia Bauru ocorreu pelo soterramento do substrato basáltico por depósito de areias, marcado por condições desérticas e baixa atividade de água. Os sistemas fluviais, associados a um clima mais úmido, surgiram após a reativação de atividades tectônicas (FERNANDES, 1998).

A figura 5 ilustra o grupo Caiuá e suas formações sedimentares. Em virtude da escala dos mapeamentos realizados para a região Noroeste, as figuras que caracterizam a área de estudo representaram o contexto regional, pois o recorte da área de estudo em si não seria significativo para possibilitar a distinção de características locais.

FIGURA 5 – Ocorrência das formações do Grupo Caiuá.



Fonte: A autora, 2020.

Fernandes (2004) aponta que o grupo Caiuá, com espessura máxima em torno de 300 metros, se originou pela deposição do Deserto Caiuá (*sand sea*) e suas formações representam compartimentos distintos: as planícies e extradunas caracterizam a formação Santo Anastácio, a área desértica central na formação Rio Paraná e a zona periférica na formação Goioerê.

A região é marcada pelo predomínio dos climas Cfa e Cwa considerados como Subtropical Úmido. O Cfa se estende por toda a região Noroeste, com temperatura do mês mais quente superiores à 22º C com chuvas bem distribuídas, temperatura moderada e a falta de uma estação seca definida. As

médias do inverno ficam inferiores à 16º C e ocorrem geadas nos meses de inverno (ITCG, 2008).

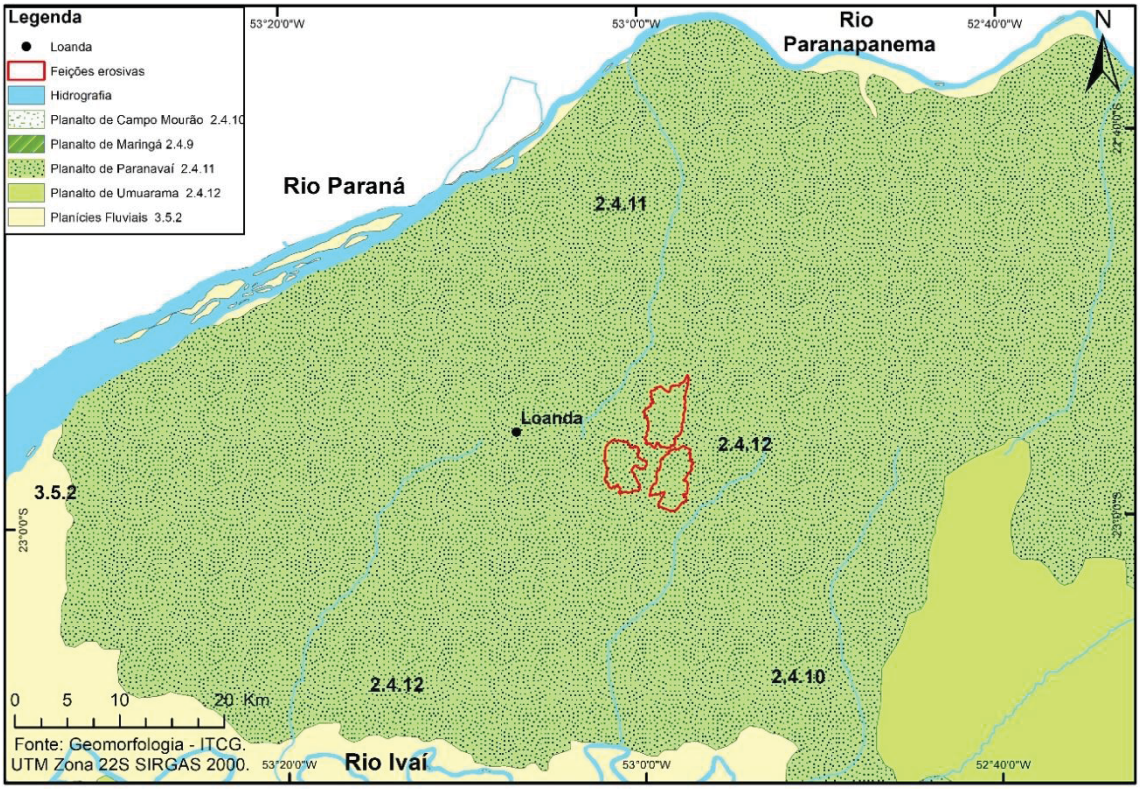
O Cwa ocorre em áreas pontuais do Noroeste, com temperatura do mês mais quente superiores à 22° C, inverno seco e verão quente e chuvoso. A intensidade e distribuição das chuvas influenciam nas condições para ocorrência de feições erosivas ou aceleração dos processos existentes, combinados às características do relevo e dos solos (MANGUEIRA; GOUDARD; SANTOS, 2018). O Cfb ocorre em segmentos próximos ao rio Ivaí e ao rio Paranapanema, caracterizado por verões com temperatura mais amena e ocorrência de severas geadas no inverno.

O paleodeserto Caiuá originou uma paisagem com características geomorfológicas específicas, retratada na literatura científica como uma paisagem de relevos amenos, monótonos, uniformes e com pequenas amplitudes altimétricas.

A geomorfologia da região caracteriza-se, segundo Maack (2012), como pertencente ao terceiro planalto paranaense. As subunidades morfoestruturais (figura 6) que compõem o terceiro planalto no recorte do estudo são: Planalto de Paranavaí; Planalto de Umuarama, e as planícies fluviais (SANTOS et al., 2006).

O planalto de Paranavaí caracteriza-se por apresentar declividades menores que 6%, com baixa dissecação e topos aplainados, e compreende a maior parte da região. O planalto de Umuarama apresenta média dissecação, declividades menores que 6%, topos aplainados e alongados. A unidade de planícies fluviais inclui os trechos dos rios Ivaí, Paraná e Paranapanema, com a presença de sedimentos quaternários em terraços (SANTOS et al., 2006).

FIGURA 6 – Subunidades morfoestruturais.



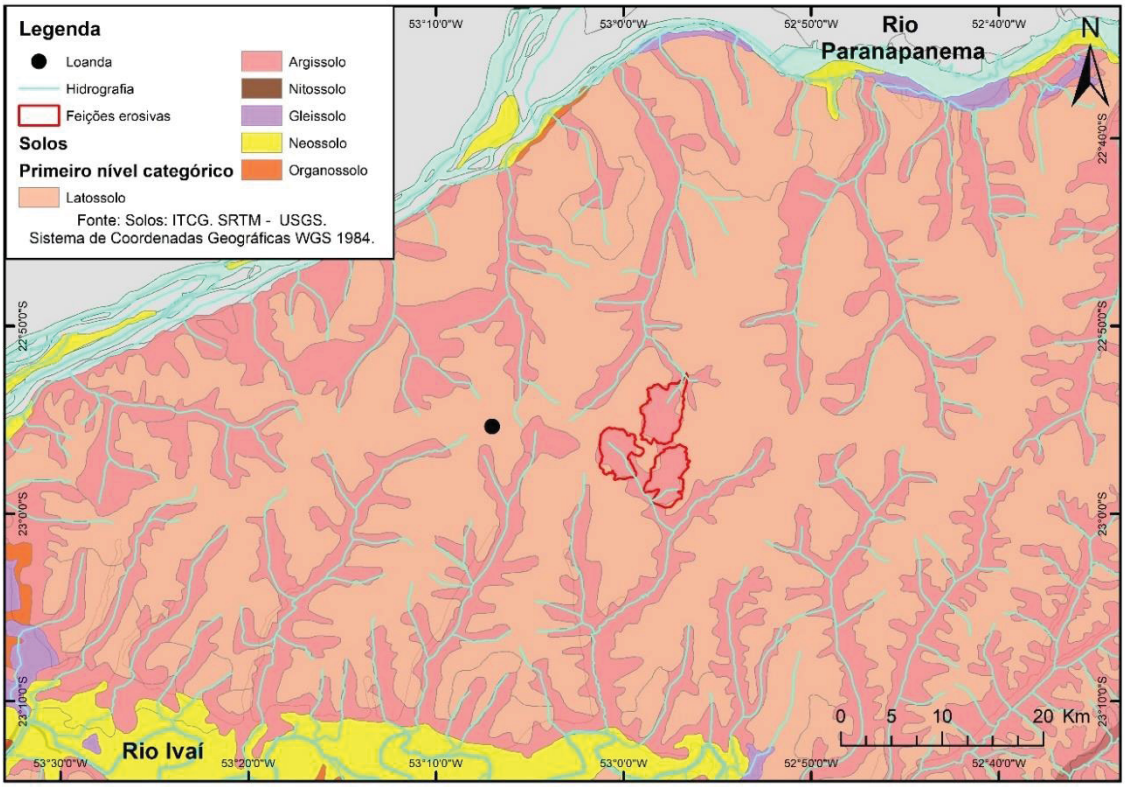
Fonte: A autora, 2020.

Esta região é constituída pelas bacias hidrográficas do Ivaí, Paranapanema e Paraná. A bacia do rio Ivaí é a segunda maior do estado e é um afluente da margem esquerda do rio Paraná (FUJITA, 2009).

A bacia do rio Paranapanema também é um afluente do rio Paraná, e encontra-se sobre um contato basáltico arenítico (NAKASHIMA,1999). E a bacia do rio Paraná é um pequeno segmento se comparada às anteriores, mas o rio Paraná é considerado o oitavo maior do mundo com extensão de 4.880 km.

Os solos predominantes na região são Latossolos e Argissolos (CALEGARI, 2000; GASPARETTO et al., 2001; COUTO et al., 2018; FUMIYA, 2017; NOWATZKI, 2018). O primeiro situa-se nos topos das colinas amplas e divisores e o segundo no terço médio/inferior das vertentes, a partir do momento que a rede de drenagem se torna mais entalhada (figura 7).

FIGURA 7 – Distribuição dos solos no Noroeste do Paraná.



Fonte: A autora, 2020.

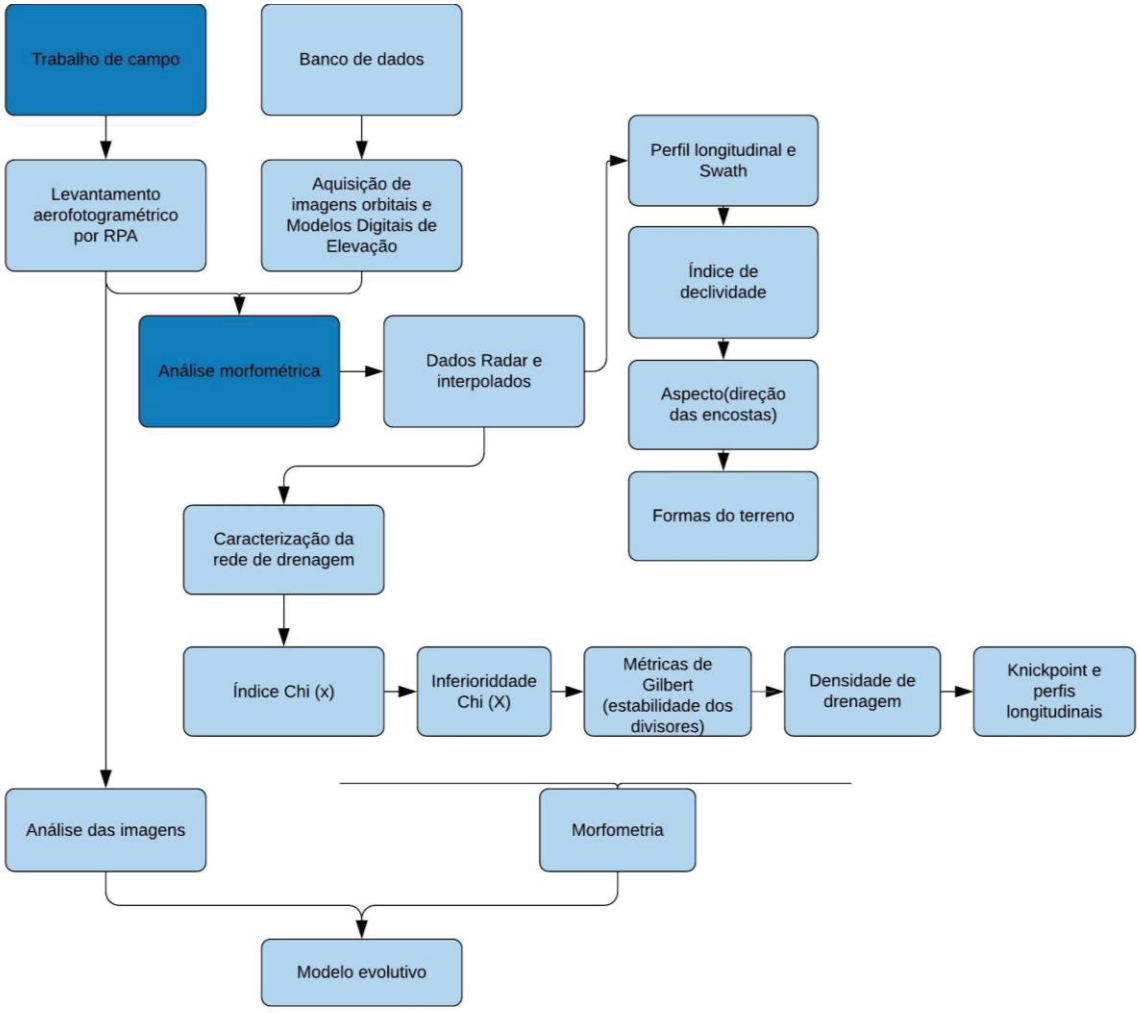
A vegetação mais expressiva que compunha a região Noroeste do estado sobre o grupo Caiuá era a floresta estacional semidecidual, nos trechos próximos ao rio Ivaí e em seus afluentes a formação de florestas com influência fluvial.

A floresta estacional semidecidual é caracterizada pela presença de um clima com duas estações definidas: uma seca e outra chuvosa, com presença de um extrato arbóreo de até 40 metros, com espécies bem adaptadas a mudança como a deficiência hídrica e quedas de temperatura. A peroba-rosa é a mais evidente tanto na floresta do arenito Caiuá quanto do basalto (VELOSO; GÓES-FILHO, 1982).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A seguir é apresentado na figura 8 o diagrama de blocos com as fases seguidas para o desenvolvimento da pesquisa.

FIGURA 8 – Diagrama de blocos.



Fonte: A autora, 2021.

3.1. DADOS DE IMAGEAMENTO TERRESTRE POR RPA

A aquisição de dados e a observação in situ das feições erosivas foi realizada no período de dezesseis a vinte de fevereiro de 2020. Foram

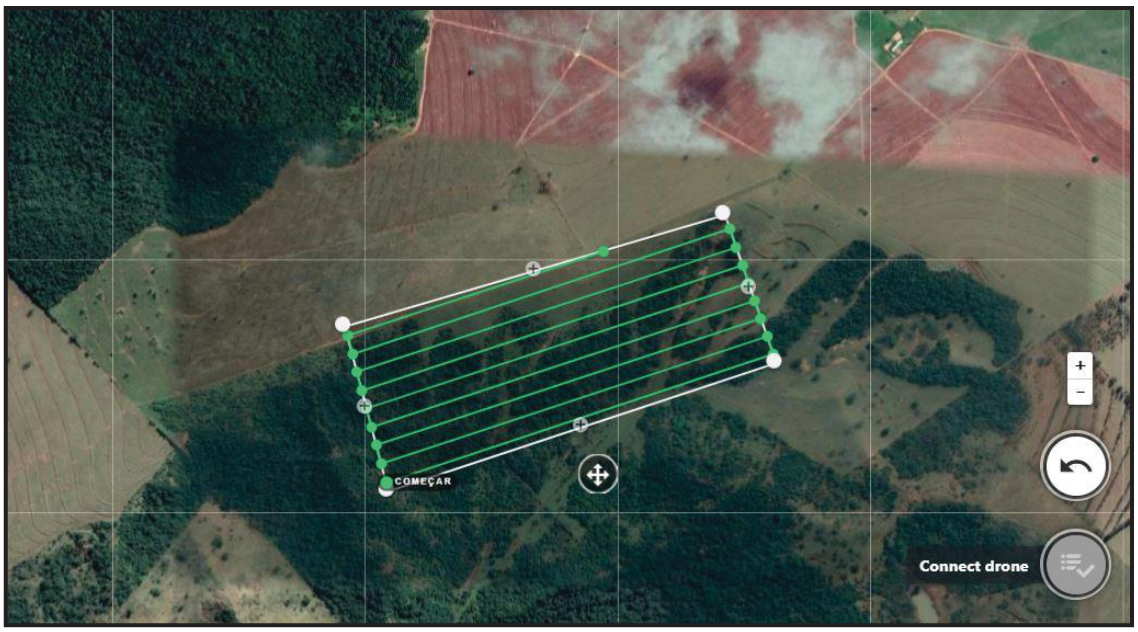
mapeados, em detalhe, alguns segmentos das bordas das feições, com o uso de uma Aeronave Remotamente Pilotada (RPA).

Foi necessário fazer um levantamento detalhado das bordas porque são esses os locais que apresentam os primeiros sinais de reativação dos processos erosivos, considerando a grande extensão da área e o tempo de autonomia da aeronave não seria viável o mapeamento de toda a extensão das feições.

Para a realização do levantamento aerofotogramétrico utilizou-se o equipamento Phantom 4 da empresa DJI e câmera RGB (Red-Green-Blue). Não foi utilizado pontos de controle em campo para o levantamento pois a análise das imagens seria visual e não obrigatório alta precisão.

O voo foi preparado no software DroneDeploy, delimitando a área projetada, com recobrimento lateral de 65% e longitudinal de 75% entre imagens (figura 9) com GSD de 10 cm/px e foram levantadas dentro da janela de voo.

FIGURA 9 – Plano de voo e área de recobrimento do voo.



Fonte: A autora, 2020.

Após o voo, foi gerado o acervo de imagens e processamento dos dados no software Agisoft Metashape. O que resultou em mosaicos de alta resolução e um modelo digital de elevação (MDE).

3.2. DADOS ALTIMÉTRICOS

3.2.1. Pré-processamento para seleção do MDT adequado

A geomorfometria é a ciência que tem como objetivo principal a análise quantitativa da superfície terrestre, e relacionar as formas e processos atuantes a partir de teorias matemáticas (PIKE, 2000; SOFIA, 2020). As formas atuais do relevo e o estudo dos seus processos de formação possibilitam entender as formas do passado e prever formas futuras do relevo (SMITH; PAIN, 2009).

Para realizar correlações dos elementos que compõem a paisagem existem ferramentas de geoprocessamento (CÂMARA; MEDEIROS, 1998) que possibilitam a extração de informações quanto à morfometria e morfologia do relevo (CREPANI; MEDEIROS, 2004; GROHMANN; RICCOMINI; STEINER, ,2008; ZANI et. al., 2009; CASTRO; CARVALHO, 2009; FELIPPE; RODRIGUES, MAGALHÃES JUNIOR, 2009; ZANI; ASSINE, 2011; SILVEIRA; LUPINACCI, 2017; ARAUJO; MARUSCHI, 2020).

O dado mais utilizado para análises das formas do relevo é o modelo digital de elevação (BOULTON; STOKES, 2018). Este pode ser um modelo global com resolução por exemplo de 30 e 90 metros (KHAN; FRYIRS, 2020) e local com o uso das aeronaves remotamente pilotadas (RPAs) para resolução centimétrica (BENITO-CALVO et al., 2020; JORAYEV et al., 2016; HUGENHOLTZ et al., 2013; HACKNEY; CLAYTON, 2015; JAMES; ROBSON; SMITH, 2017; LAGUE, BRODU; LEROUX, 2013).

Os modelos digitais de elevação (MDE) são definidos segundo Paparoditis e Polidori (2002) como a representação do relevo e de qualquer objeto com elevação acima da superfície terrestre. É uma representação estatística, com conhecimento das coordenadas x,y e z dos pontos.

Para extrair métricas da superfície do terreno é preciso utilizar um modelo que represente adequadamente a área dependendo do interesse do trabalho. Neste caso o modelo adequado representaria as formas das feições erosivas e a rede de drenagem de acordo com a realidade de campo.

Pela dimensão da área pretendia-se utilizar modelos de menor resolução espacial, considerando a quantidade de informação que se pretendia processar.

Assim optou-se pela comparação de diferentes modelos que representassem as formas do relevo, mesmo que houvesse dados de campo (ponto cotado, curvas de nível e hidrografia) do mapeamento que completa quase duas décadas.

Com o avanço das novas tecnologias e sensores remotos a disponibilidade de dados é imensa, e com a facilidade de acesso a esses produtos se popularizou o seu uso como é o caso dos modelos de radar, um dado mais atualizado e que auxilia na análise da paisagem.

Foram testados quatro modelos disponibilizados gratuitamente, a saber: ALOS, SRTM, TanDEM-X e um MDT gerado. Em seguida, os quatro foram comparados quanto à sua precisão, utilizando um modelo de referência gerado pelas curvas de nível e pontos cotados do mapeamento sistemático do paraná, para a geração de atributos topográficos básicos como: perfis longitudinal e transversal das feições, declividade e direção das encostas.

Antes de testar os modelos foi necessário realizar a correção e remoção de depressões espúrias, erros derivados da base de dados ou da interpolação, sem isto os resultados apresentariam valores de pixels extrapolados ou nulos. Para esta correção dos valores utilizou-se o comando *fill sinks* (preencher) do Spatial Analyst/Hidrology no software ArcGIS. A técnica consistiu em analisar as altitudes dos pixels vizinhos para preencher o pixel e apresentar semelhança com os pixels do entorno.

O ALOS faz parte de um projeto desenvolvido pela J*apan Aerospace Exploration Agency* (JAXA) e pela *Japan Resources Observation System Organization* (JAROS), composto por 2 instrumentos óticos e um radar polarimétrico de abertura sintética de banda larga PALSAR (*Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar*) os dados podem ser acessados no site da NASA, onde é disponibilizado um MDE com resolução espacial de 12,5 metros para o EUA e reamostrado para o resto do mundo.

Os dados da missão SRTM realizada em conjunto com a *National Aeronautics and Space and Administration* (NASA) e a *National Geospatial Intelligence Agency* (NGA), estão disponíveis com resolução espacial de 90 metros e 30 metros a partir de 2015, além de produtos gerados pelo material de 90m reamostrado por krigagem para 30 metros como o Topodata (VALERIANO, 2008).

O TanDEM-X é um satélite muito parecido com o TerraSAR já em orbita, ambos circulam juntos para a aquisição de dados. Disponibilizam gratuitamente os dados com resolução de 90m (em https://download.geoservice.dlr.de/TDM90) e comercializam o de 30 metros.

O MDT, gerado com resolução de 20 metros, foi gerado pelo interpolador *Topo to raster* a partir da base vetorial planialtimétrica do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e a Diretoria de Serviço Geográfico do Exército (DSG) para o mapeamento do Paraná 1:50.000, contendo os pontos cotados curvas de nível e hidrografia disponibilizado pelo mapeamento.

Além da disponibilização dos dados abertos como diferentes modelos digitais de elevação e o uso de aeronaves remotamente pilotadas (RPAS) pela facilidade de monitoramento e resolução dos dados, já está difundido entre os cientistas o desenvolvimento, uso e divulgação de softwares livres e scripts que auxiliam a geração das ferramentas morfométricas (SOFIA, 2020).

Os modelos supracitados foram comparados em um perfil transversal e em uma janela (*swath*), a fim de observar a variação altimétrica entre eles, distribuição das altitudes e seu comportamento nas bordas das feições, canal de drenagem e pontos onde a vegetação é mais densa, pois mesmo os novos sensores de radar apresentam bandas que não penetram totalmente o dossel, medindo o sinal refletido das camadas superficiais da vegetação.

Para observação e comparação pontual da topografia ou de dados morfométricos foram produzidos perfis topográficos transversais. Os perfis transversais são principalmente utilizados para compreender a dinâmica das vertentes e a comparação entre elas e entre as bacias.

Para a geração do perfil transversal foi utilizada a ferramenta *Profile Tools* do software QGIS 2.18.0. O perfil permite observar a variação altimétrica e as formas de um objeto sob o traçado de uma linha, neste caso o interesse foi representar as nuances do terreno e as formas das drenagens encaixadas.

Ao contrário do perfil transversal, o perfil longitudinal segue a direção do canal e acompanha toda a sua extensão, e resulta em uma representação gráfica de uma curva logarítmica entre esta relação de altitude (m) e extensão (km) desde a nascente a foz. Para obtenção do perfil aplicou-se a função *flowpathapp*

da ferramenta *TopoToolbox* (SCHWANGHART; SCHERLER, 2014) no software MatLab 2019.

Foi utilizado o *swath* para a comparação visual dos modelos, que ao contrário de uma linha única como no perfil convencional, é uma janela retangular móvel que inclui maior quantidade de informações referente aos valores de altitudes locais de toda a janela (WOBUS et al., 2005; TELBISZ et al., 2013). A ideia central do uso do *swath* também é a observação da variação vertical do objeto, as formas e a esculturação dos rios, comumente utilizados para superfícies modeladas por condições paleoclimáticas (TELBISZ et al., 2013) e representação da superfície atual, paleosuperfícies, fundos de vale e o relevo geofísico (CHAMPAGNAC; VALLA; HERMAN, 2014).

Para geração do s*wath* aplicou-se o plugin *SwathProfile* no QGIS versão 2.18, e em seguida o Microsoft Excel do pacote Office 2020 para manipulação e análise dos resultados, a janela apresenta comprimento de 12 km totais, e 2 km de largura da janela de amostragem.

3.3. INDICES MORFOMÉTRICOS

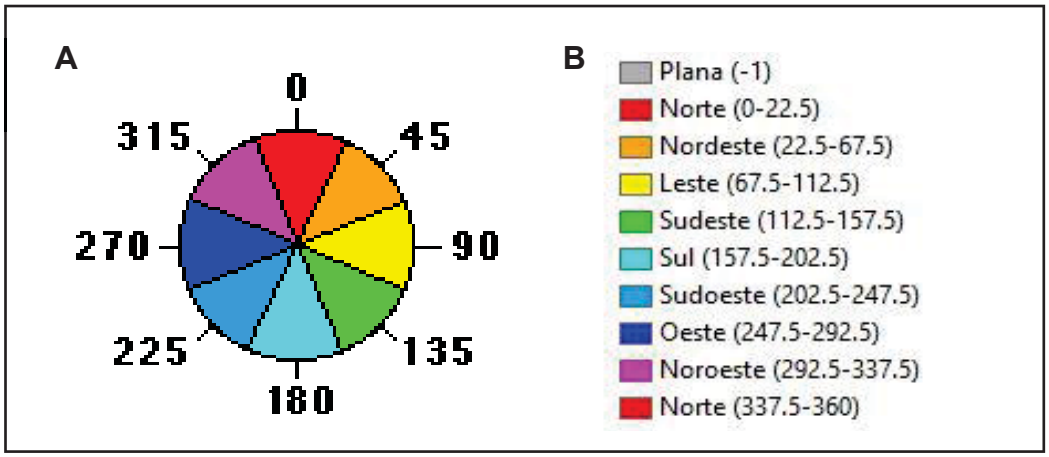
A partir da escolha do modelo ALOSPALSAR como um modelo representativo para a área de estudo, pois mesmo considerando a interferência da vegetação no modelo, este representa as formas do terreno adequadamente, se comparado a outros modelos disponíveis, assim as métricas seguintes foram extraídas deste.

A declividade é um plano tangente a superfície, e calcula-se pela inclinação da superfície em relação a horizontal, resultando em um plano representado por valores em graus ou porcentagem (BORROUGH, 1986). É uma variável diretamente relacionada a ocorrência de processos erosivos nas vertentes, por sua influência no escoamento da água e na velocidade do transporte de materiais. Esta informação é extraída a partir da ferramenta *slope* no software *ArcGIS* 10.5.

O aspecto ou direção das encostas é a variável que expressa a posição das faces do terreno expostas a radiação solar, variando de 0º a 360º em sentido horário onde 0º é a inclinação da vertente para norte, 90º a leste e assim

sucessivamente. A inclinação dos graus demonstrará a sua direção conforme ilustra a figura 10 (A) e resulta na classificação e cores na figura 10 (B). Essa variável foi obtida pela ferramenta *aspect* no software *ArcGIS* 10.5, e este resultado angular depende da inclinação do pixel para seus 8 pixels vizinhos em uma janela 3x3 (CHANG; TSAI, 1991).

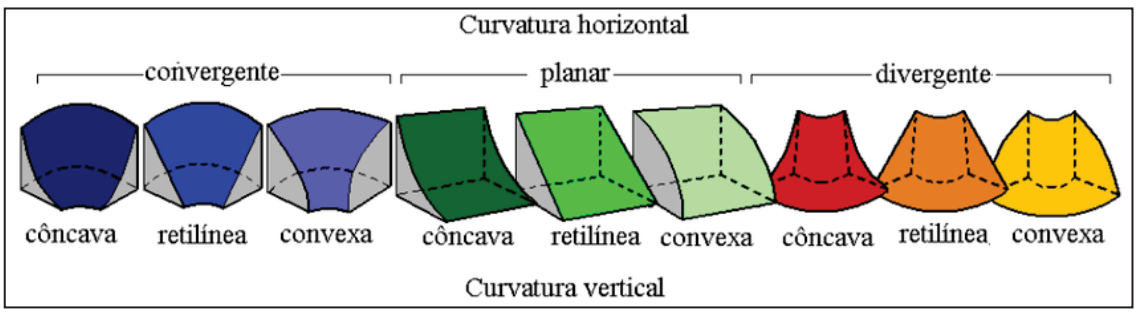
FIGURA 10 - Informações resultantes no raster de saída da direção das encostas.



Fonte: ArcGIS Pro, 2020.

Quanto às formas das vertentes, esta foi obtida pelo projeto Topodata do INPE. Este representa a curvatura horizontal e vertical do terreno distribuindo-as em 9 classes de acordo com as curvaturas definidas por Valeriano (2008) indicadas na figura 11. Pois considerando o plano de curvatura quanto mais convergente for a forma do terreno maior será a acumulação de fluxo superficial, ocorrendo maior dispersão do fluxo em vertentes divergentes.

FIGURA 11 - Formas do terreno.



Fonte: Valeriano, 2008.

Alguns processos que condicionam as mudanças no relevo ocorrem nos sistemas fluviais, como os rearranjos de drenagem (MAGALHÃES JUNIOR; BARROS, 2020).

De acordo com Bishop (1995), rearranjo fluvial corresponde à mudança do fluxo de um rio para outro, podendo ocasionar a fusão dos sistemas fluviais em diferentes escalas. Thornbury (1954) define a captura ou rearranjo como a erosão de um rio sobre outro a fim de desviar seu fluxo.

As capturas apresentam evidências morfológicas na paisagem, as quais podem não ser nítidas e claras. As formas associadas são os cotovelos de captura, vales secos ou abandonados, rupturas de declive, canais residuais entre outros. Estas formas podem descritas brevemente: os cotovelos de captura *(elbows of capture)* apresentam-se como uma mudança abrupta no curso do rio formando um ângulo de 90º sob influência geológica; os vales secos *(cols or wind-gaps)* significam que o rio não ocupa mais o vale e nota-se um recuo da nascente de dois rios (MILLER, 1915); a ruptura de declive é identificada na análise do perfil longitudinal do rio, pelo rebaixamento para capturar outro rio (SMALL, 1977); e os canais residuais pela diminuição da carga de um rio.

Para conhecimento do equilibro da bacia e a ocorrência de processos de reorganização fluvial em campo são vistos indicativos pelas capturas fluviais, que geralmente ocorrem quando o rio capturador precisa manter um nível mais baixo que o seu vizinho e apresentar maior energia. As formas de evolução do relevo por consequência de capturas fluviais são apontadas em Cherem et al., (2013), Lavarini et al. (2016), Santos (2017), Salgado; Cherem e Sordi (2018), Magalhães; Geoffroy e Salgado (2017), Fan et al. (2018), Sordi et al., (2018), Stokes; Goldberg e Perron (2018), Patucci (2019), Mendes et al. (2019), Nascimento et al. (2019), Cordeiro (2019).

Os fatores que podem identificar uma captura fluvial segundo Bishop (1995) são o grau de inclinação, a alta energia e a vantagem erosiva, que de modo geral correspondem a fatores climáticos, estruturais e ambientais. Para identificar estes fatores pode-se utilizar os dados de sensores remotos para fotointerpretação, e análises computacionais para compreender a agressividade dos rios, inclinação, tipo (como baixo divisor) e comprimento do divisor, *knickpoints* e o nível de base dos rios a partir de perfis transversais e

longitudinais dos rios por exemplo, tudo para reconstituir a evolução do relevo onde ocorre a captura ou pode ocorrer.

As ferramentas apresentadas a seguir tiveram como finalidade extrair informações quanto as características da rede de drenagem: índice Chi (x), estabilidade dos divisores, existência de *knickpoints* e perfis dos rios, forma e densidade dos canais.

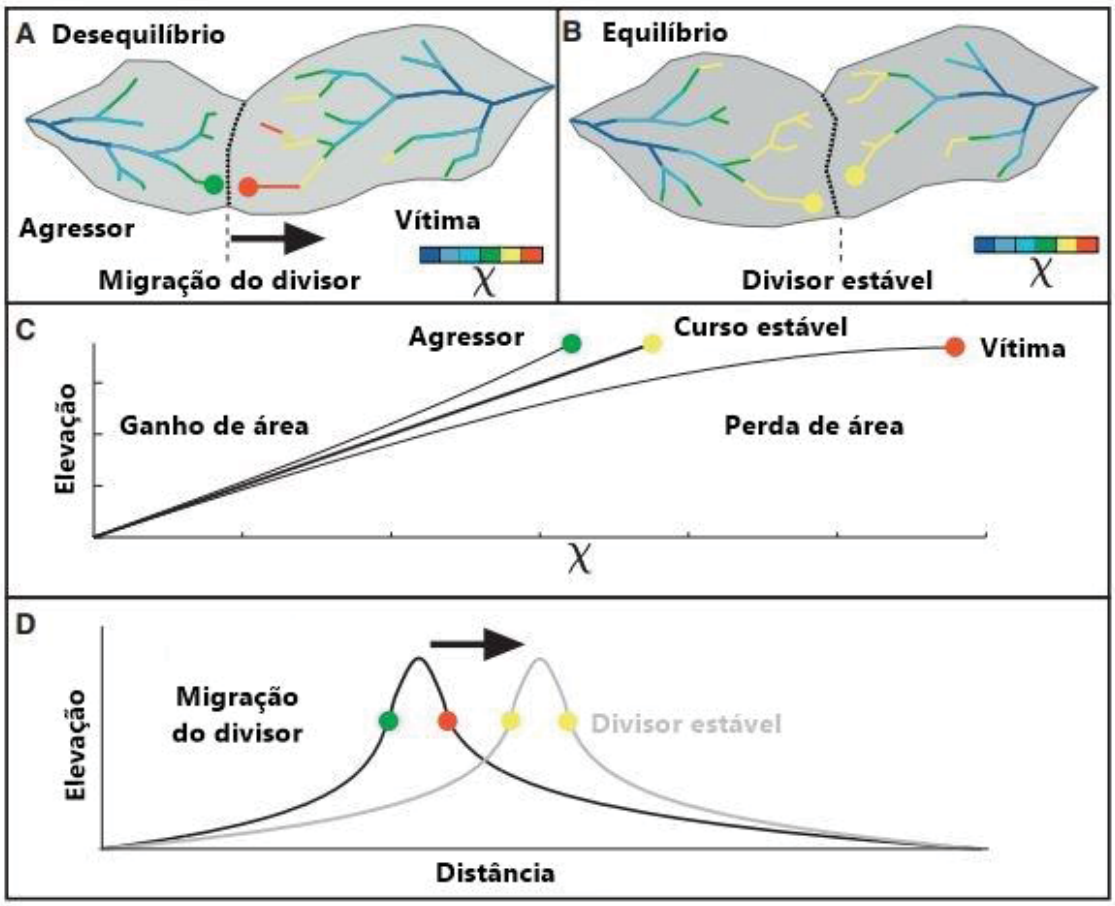
Para a compreensão do comportamento dos rios utilizou-se o índice Chi (χ) (PERRON; ROYDEN, 2013; WILLET et al., 2014) a partir da ferramenta topotooolbox no Matlab (SCHWANGHART; SCHERLER, 2014). Este parâmetro consiste em calcular a condição do perfil de equilíbrio do rio em diferentes bacias hidrográficas a partir dos valores de anomalias Chi. Como compara-se diferentes bacias hidrográficas, pelo comportamento dos dois lados do divisor de águas, os resultados vão indicar se elas estão em equilíbrio ou desequilíbrio.

O índice desenvolvido por Willet et al., (2014) propõe avaliar a estabilidade das cabeceiras de drenagem por meio de indicativos da morfologia da drenagem. A altitude das cabeceiras, por exemplo, pode indicar o processo do recuo da cabeceira, pois quando dois rios estão em altitudes diferentes o rio mais baixo provoca a erosão regressiva até capturar o rio em maiores altitudes. Quando os canais estão em desequilíbrio os processos atuantes podem avançar até as bacias vizinhas. Alguns indicativos podem ser vistos nos canais e nas vertentes próximo aos divisores.

Como resultado da aplicação deste índice, é possível indicar quais bacias estão ganhando ou perdendo área, pois quanto maior os valores do Chi para os canais a bacia é a agressora, a qual ganha área, e quanto menor os valores a bacia é a vítima e poderá perder área para outra, indicando um desequilibro e ocorrência de rearranjo e mudança de direção de fluxo da bacia.

A figura 12 ilustra a explicação, quando as bacias apresentam valores de Chi semelhantes ou iguais em ambos os lados do divisor estes encontram-se em equilíbrio (figura 12b). Quando os valores do índice são contrastantes e as bacias apresentam características distintas como tamanho da bacia, gradiente e declividade dos canais as bacias estão em desequilíbrio e isto ocasionaria mudanças em sua área (figura 12c), e proporcionaria a evolução da paisagem na busca de equilíbrio como o bloco D da figura 12 (WILLET et. al., 2014).

FIGURA 12 - Representação da diferença entre bacias em equilíbrio e desequilíbrio: (A) uma bacia em desequilíbrio e que evolui para (B) uma bacia em equilíbrio. (C) a bacia agressiva está mais baixa e conduz o divisor a bacia vítima que perde sua área para o agressor. (D) representação em perfil da cabeceira do agressor e da vítima em desequilíbrio (pontos verde e vermelho) e sua transferência para um divisor estável (cinza claro).



Fonte: Willet et al. (2014).

Além da análise de perfis dos canais existe uma função de Chi para avaliar os divisores de drenagem, que é o fator Chi (*X*). A função consiste em calcular os valores dos pixels de contribuição da rede de fluxo, obtendo uma média espacial, os valores de Chi serão divididos pela média espacial resultando em um mapa indicando a parte do divisor vítima ou agressora.

Quando o nível de base das bacias difere-se ou há ocorrência de tectonismo os valores de Chi podem apresentar diferentes repostas, por isso é necessário combinar com outras métricas, assim Forte e Whipple (2018) apresentam outras métricas para verificar a estabilidade dos divisores de drenagem, utilizadas para complementar a métrica Chi.

No que se refere à evolução no tempo, a mudança dos divisores é lenta se comparada à mudança e ajustes que ocorrem na rede de drenagem (WHIPPLE et. al., 2017), mas a topografia pode apresentar indícios da mudança futura.

Conhecidas como ‘Métricas de Gilbert’ (GILBERT, 1877) os três proxies (gradiente, relevo médio local e elevação) são utilizados para avaliar o divisor, por exemplo quando um lado do divisor apresenta gradiente de encosta mais íngreme ele consequentemente vai apresentar um relevo médio maior e a elevação do canal menor (FORTE; WHIPPLE, 2018).

A métrica de elevação permite a observação da altitude da cabeceira dos canais próximos ao divisor. Quando a elevação apresentar maior valor do que os canais da bacia oposta isto significa que as cabeceiras deste lado estão em maiores altitudes.

As métricas de gradiente e relevo médio local apresentam os valores médios a montante das cabeceiras de drenagem, para o cálculo a métrica utiliza 500 pixels no entorno da cabeceira (FORTE; WHIPPLE, 2018). O gradiente refere-se à declividade, enquanto o relevo é a diferença entre as máximas e mínimas de altitude acima da cabeceira.

Os *Knickpoints* (Kp) ou rupturas de declive nos canais, podem ser identificados nos perfis longitudinais dos rios na forma de um degrau topográfico, indicam um desequilíbrio do rio e proporcionam a remodelagem do rio por erosão fluvial que originam paisagens mais dissecadas (PHILLIPS et al., 2010). A sua posição pode interferir na energia do transporte de materiais e erosão e são de grande importância na configuração dos padrões fluviais (MAGALHÃES JUNIOR; BARROS, 2020).

Willet et al. (2014) apontam que a ocorrência e migração de *knickpoints* ocasiona a mudança da morfologia do canal e do relevo no entorno e poderá influenciar na alteração da posição do divisor.

É possível extrair automaticamente tanto os *knickpoints* quanto o perfil do rio por meio de funções disponíveis na caixa de ferramentas *TopoToolbox* (SCHWANGHART; SCHERLER, 2014) do software MatLab.

A densidade de drenagem (Dd) é outra variável morfométrica para estudo de bacias hidrográficas, que foi obtida através de um algoritmo que estima

densidade de dados a partir da rede de drenagem (SILVERMAN, 1986). O dado utilizado foi adquirido no banco de dados da ANA, que disponibilizou o acesso as informações referentes ao estado do Paraná. O algoritmo pode ser utilizado no software *ArcGIS* 10.5. Como raio de influência foi utilizado o valor de 1km, e 10m de resolução final.

A partir da união de todos os resultados anteriores foi desenvolvido um modelo evolutivo com o objetivo de predizer a expansão das feições erosivas da área de estudo e consequentemente a evolução da paisagem. Para obtenção deste modelo considerou-se todas as métricas anteriores, e os resultados expressos neles de como ocorreria a evolução.

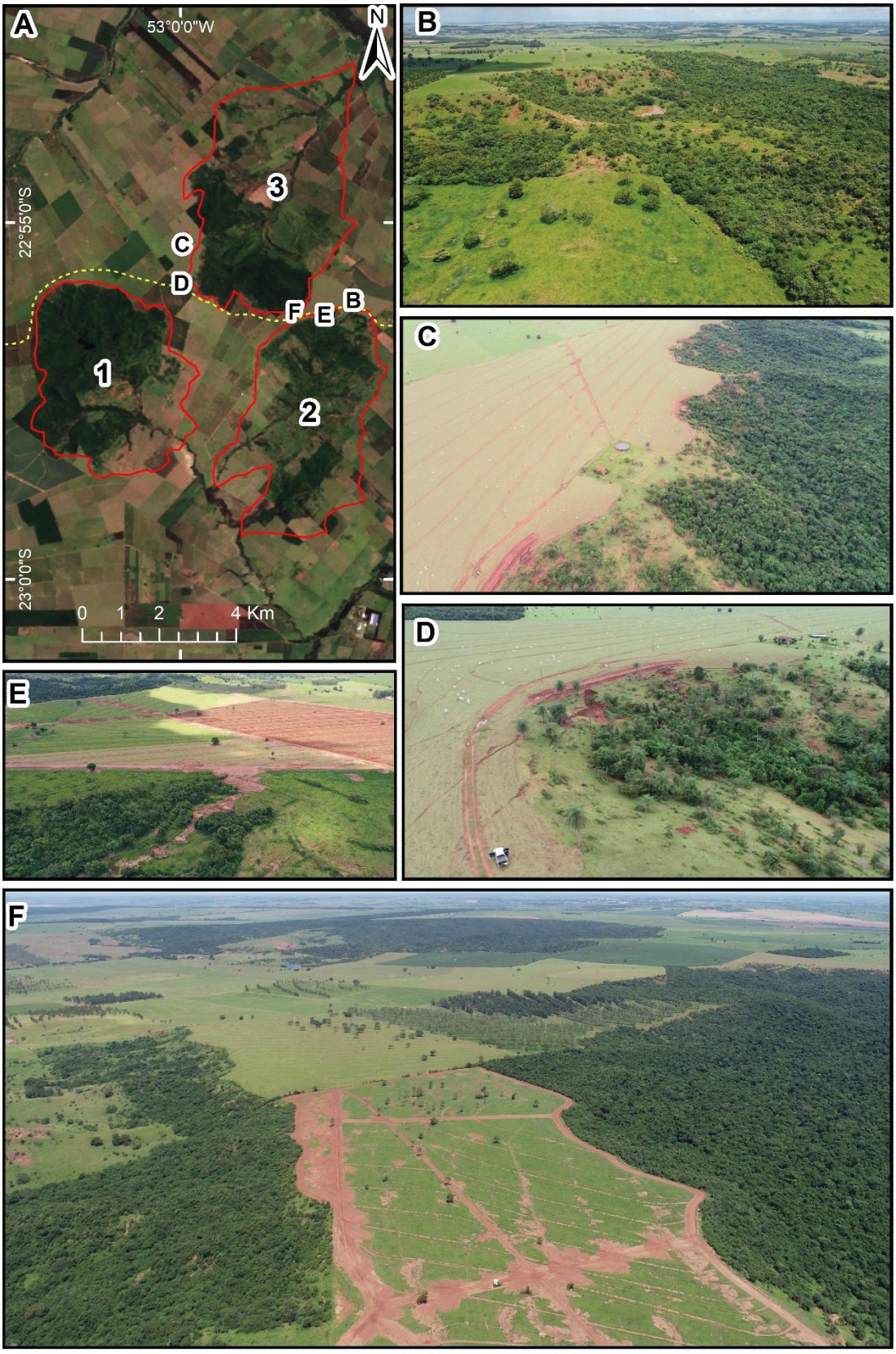
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. DADOS DE IMAGEAMENTO TERRESTRE POR RPA

Como resultado do trabalho de campo, foram obtidas imagens do divisor hidrográfico e das feições erosivas contíguas a ele. A figura 13 (A) ilustra o conjunto de imagens que caracteriza a área de estudo.

Na figura 13 (B) e (E), são observadas áreas fragmentadas na cabeceira da feição 2. Em (C) e (D), são visíveis nas bordas da feição 3 sinais de processos erosivos recentes, sendo estes mais avançados na porção da borda mais próxima ao divisor de águas. A foto (F) ilustra o divisor de águas situado entre as feições 2 e 3. Pode-se perceber pela foto que as duas feições se encontram muito próximas e que o divisor que as separa está bastante degradado.

FIGURA 13- Imagens das feições obtidas por RPA. (A) imagem de referência, em (B) e (E) indícios de erosão na cabeceira; Em (C) e (D) processos erosivos na feição 3; (F) divisor entre as feições 2 e 3.

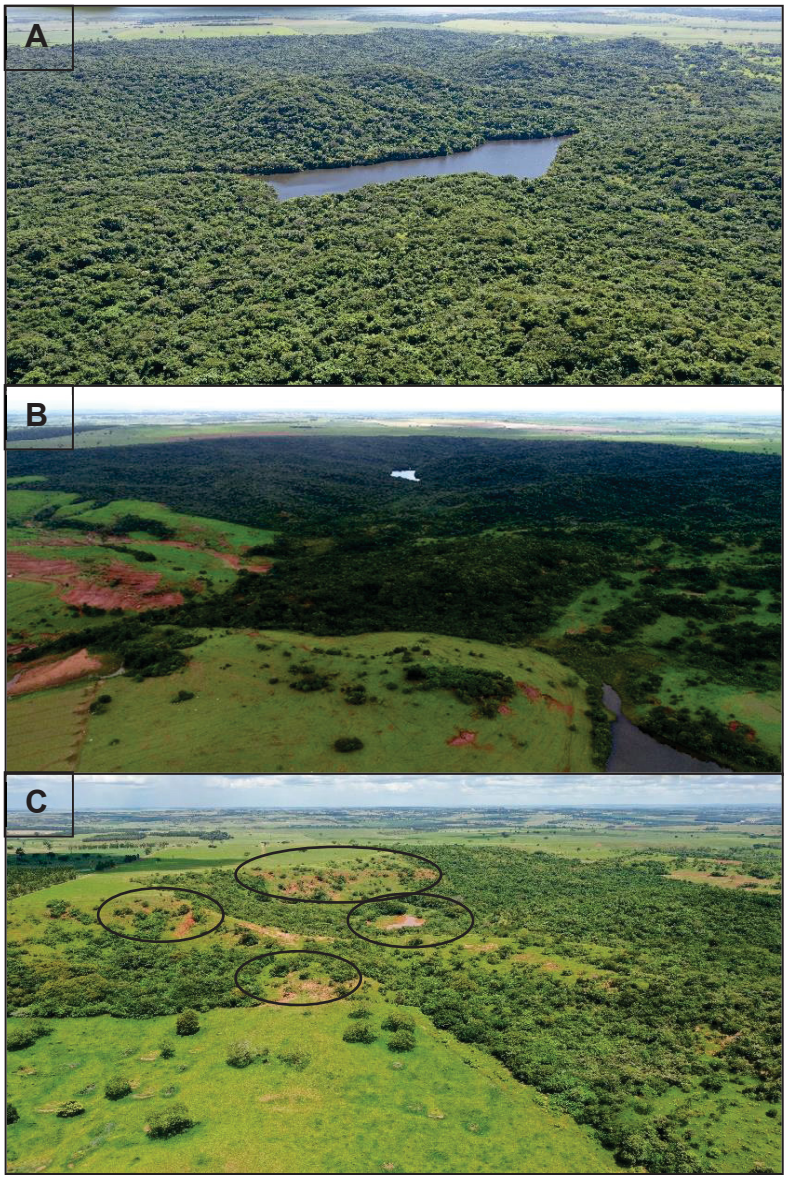


Fonte: A autora, 2020.

A manutenção da estabilização das feições se dá pela presença de vegetação em seu interior. Conforme relato do proprietário da Fazenda Erechim, remanescentes da vegetação nativa são utilizadas como áreas de preservação em algumas propriedades (figura 14a).

As áreas preservadas podem ser vistas em detalhe na feição 1, figura 14 (A) e (B). Em alguns pontos da feição 3, figura 14 (C), observa-se início do desenvolvimento de processos erosivos em áreas desprovidas de vegetação.

FIGURA 14**-** Vegetação remanescente preenchendo as feições anômalas. (A) e (B) vegetação densa em toda a extensão da feição; (C) vegetação fragmentada, com indícios de processos erosivos ativos.



Fonte: A autora, 2020.

Os voos realizados em segmentos específicos das bordas das feições permitiram avaliar em detalhe o que as imagens de satélite como RapidEye e CBERS4A não propiciaram, estas imagens foram utilizadas para análise prévia das feições e que não apresentaram os resultados, por conta de suas resoluções espaciais, como os dados dos voos que apontaram, por exemplo, a instabilidade nas bordas das feições (figura 15 B e C).

A figura 15 (A) apresenta os segmentos onde foram realizados levantamentos aerofotogramétricos. A instabilidade da feição 3 é vista nas figuras (B) e (C), os indícios de erosão estão nas bordas da feição próximo ao divisor, e são compostas por áreas de vegetação bem fragmentadas, ao contrário do que ocorre em outras feições como a feição 1 (D) que está estabilizada e com vegetação densa no seu interior e nas bordas.

Um segmento da feição 1 é apresentado em (D) suas bordas estão estabilizadas, sem indícios de processos erosivos, neste segmento em especial verifica-se a ocorrência da estrada que segue ao interior da feição.

Na figura 15 em (E) é apresentado o segmento entre as feições 2 e 3 já descrito anteriormente, nota-se que sobre o divisor o solo foi preparado para plantio e passou por terraplanagem, além de apresentar indícios de erosão na feição 2.

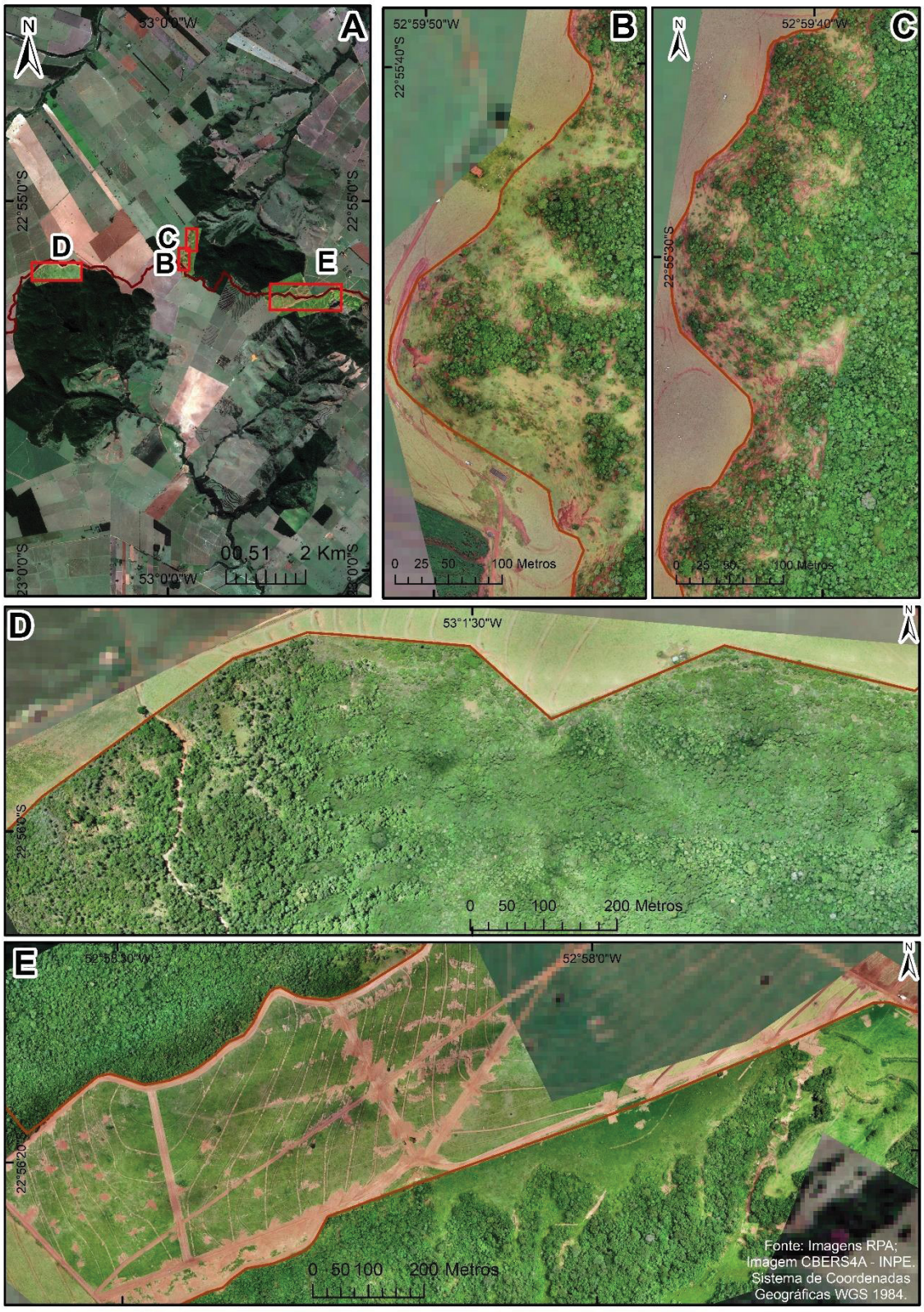
Na figura 16 são apresentados os mesmos recortes da figura 15, com o MDE gerado a partir do aerolevantamento.

Na feição 3 (B) e (C) observa-se que as bordas das mesmas estão próximas ao divisor, e como visto na figura anterior as bordas apresentam indícios de processos erosivos, como a presença de ravinas e de solapamentos (manchas amareladas próximo à borda das feições). A figura 16 em (D) mostra as maiores altitudes nas bordas e em algumas áreas do seu interior.

Em (E) está o segmento do divisor entre as feições 2 e 3 nesta figura as maiores altitudes estão na feição 3. As cabeceiras de drenagem estão mais próximas ao divisor e em maiores altitudes na feição 3 e menores altitudes na 2 com maior distância do divisor. Esta configuração sugere a evolução das cabeceiras com as menores altitudes, tendo mais área para erodir até o divisor.

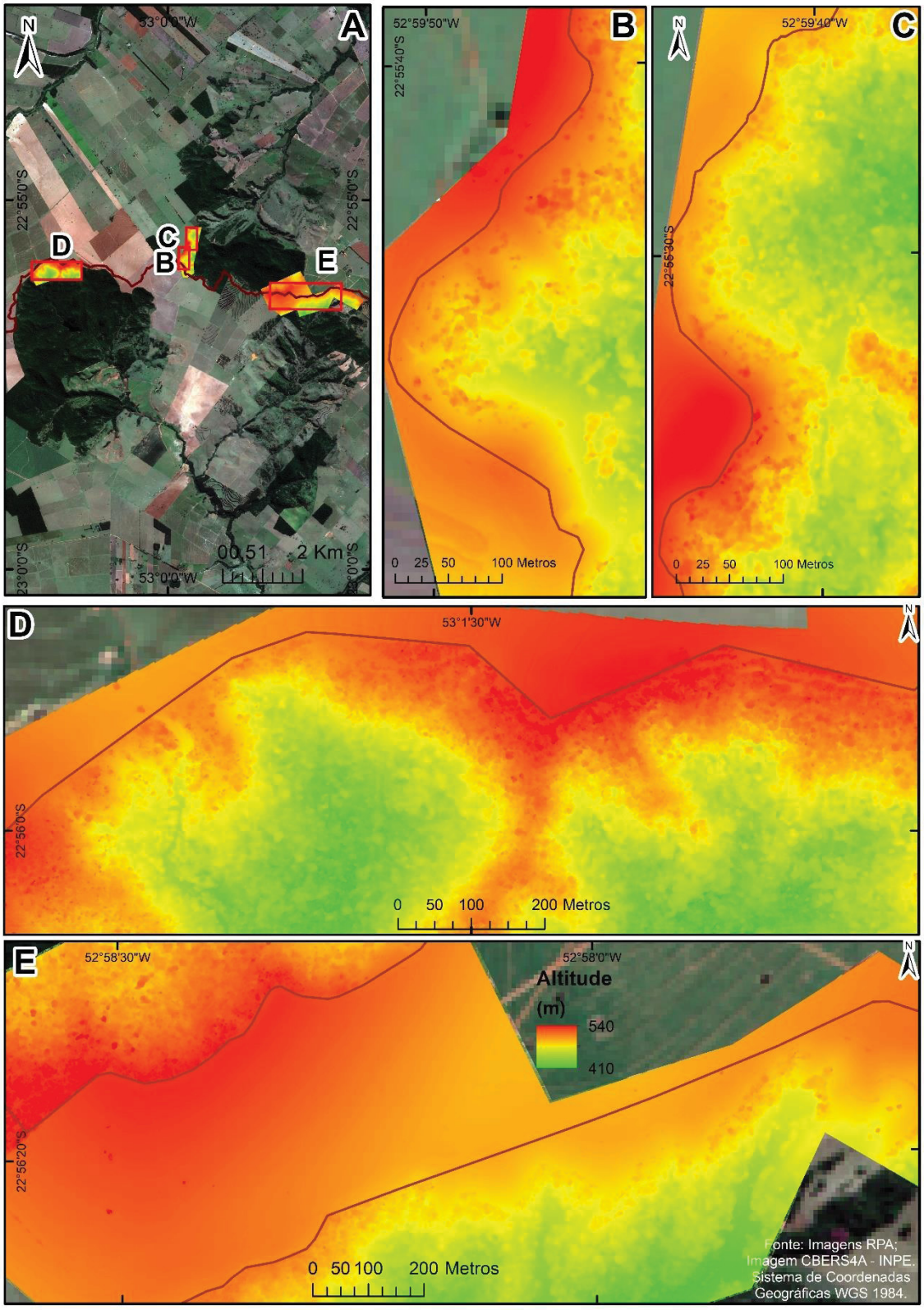
Os indícios de erosão na feição 2 na forma de ravinas são vistos nos trechos retilíneos com as menores altitudes.

FIGURA 15- Aerolevantamento por RPA sobre as áreas com certa instabilidade verificadas em campo.



Fonte: A autora, 2020.

FIGURA 16- Modelo Digital de Elevação gerado a partir do aerolevantamento.



Fonte: A autora, 2020.

Os resultados gerados a partir do trabalho de campo serviram para conferir a distribuição espacial das feições e as características do seu interior, e se existem indícios da retomada dos processos erosivos. Todos os produtos serviram para validar os resultados seguintes quanto a erosões, a estabilidade dos divisores e a presença de drenagens extraídas de forma automatizada além de outras respostas dos índices morfométricos.

4.2. DADOS ALTIMÉTRICOS

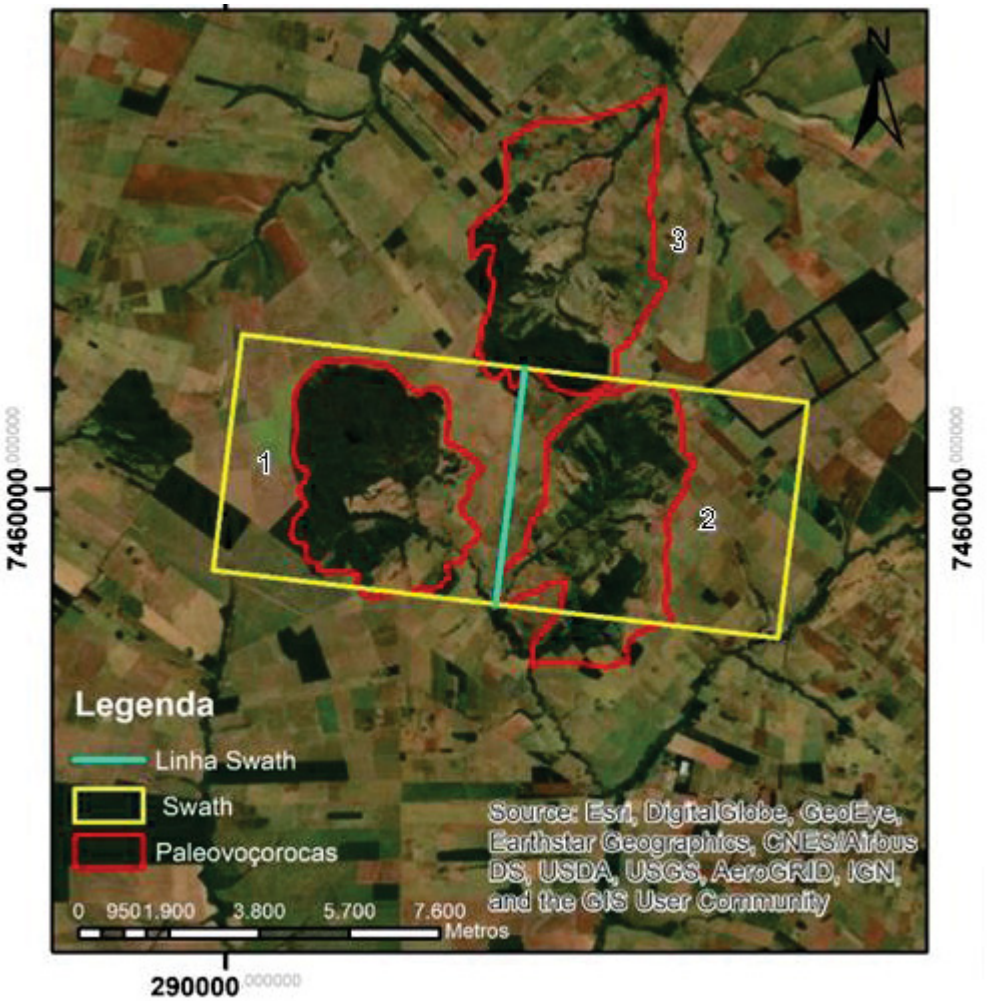
4.2.1. Análise comparativa de modelos digitais do terreno

Para extrair informações morfométricas da superfície é preciso deter de um modelo para representar adequadamente a área de estudo. Para isto analisou-se a diferença das representações das feições em perfil, como seriam representados os contornos das feições, as bordas, e os segmentos com vegetação mais densa.

Comparou-se os perfis transversais previamente e perfis *swath* das feições (figura 17). Este último representa o relevo geofísico, o qual consiste em um proxy para incisão fluvial obtido pela diferença da elevação máxima e elevação do relevo atual (CHAMPAGNAC; VALLA; HERMAN, 2014), visto na figura 20.

A comparação destacada a seguir refere-se às duas feições (1 e 2) das vertentes (figura 17) que escoam para o Ivaí. Foram escolhidas as duas feições para teste pois apresentam formas distintas quanto as bordas e seu interior, e diferentes densidades de vegetação em seu interior, sendo a feição 2 semelhante à feição 3 quanto a estas características da vegetação e forma.

FIGURA 17- Dimensões do *swath* nas duas feições, com extensão de 12 km.



Fonte: A autora, 2020.

O primeiro perfil da figura 18 apresenta o SRTM, representa suavemente a superfície, com certo grau de generalização, sem variações abruptas nas linhas do gráfico.

O *swath* gerado pelo TanDEM-X expôs um perfil semelhante ao SRTM, possivelmente, essa característica se deve ao fato de que ambas as resoluções utilizadas foram de 90m, e representaram nuances do relevo, por exemplo formas no interior das feições. Em perfil nota-se a amplitude da curva do relevo atual, quase sobrepondo valores de máximo (na borda) e de mínimo (no nível de base de uma das feições erosivas).

Os resultados de ALOSPALSAR, por sua resolução de 12,5m foi o mais consistente com as formas das feições e do seu interior, como as bordas das

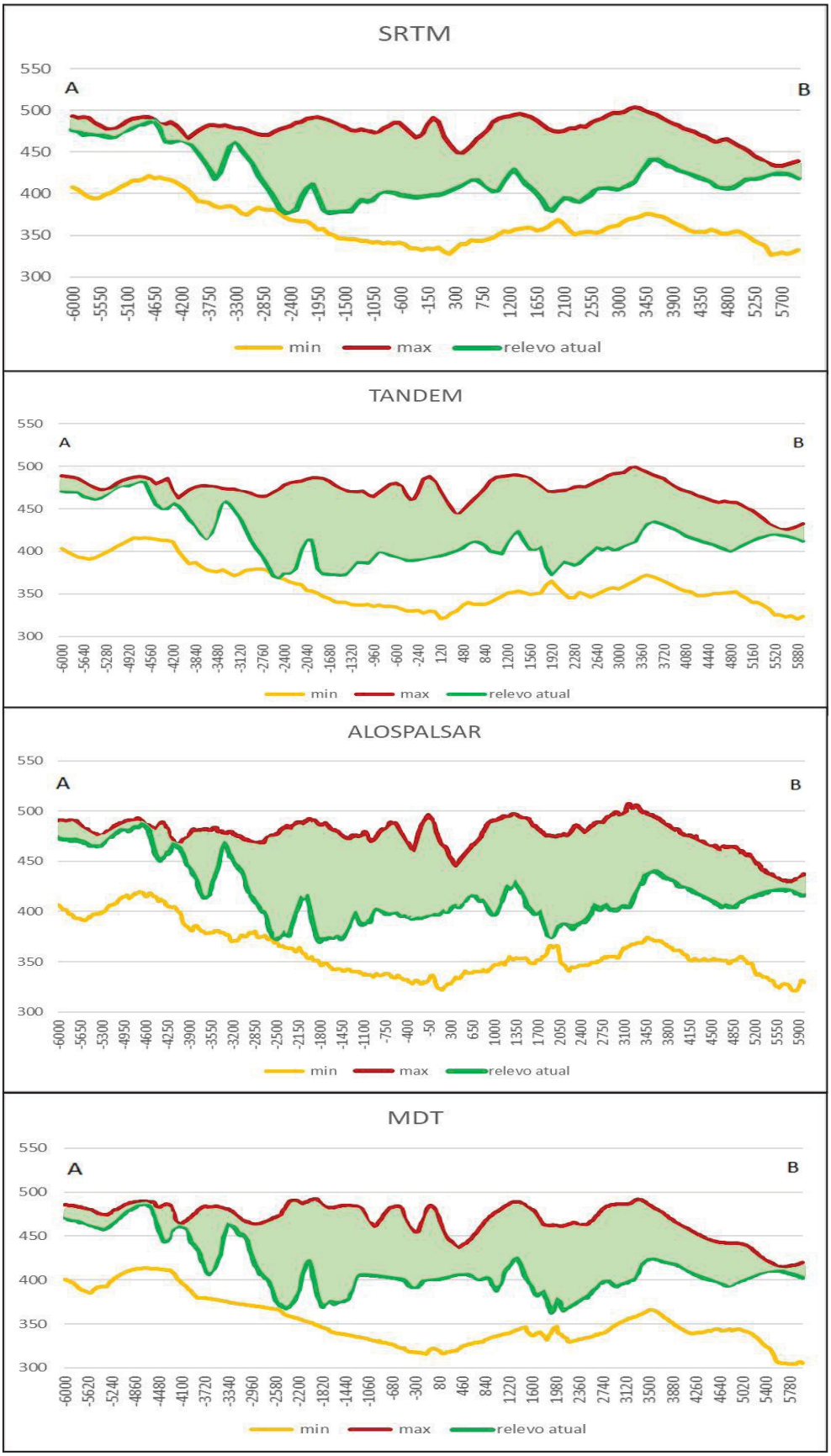
feições, as vertentes por onde escoam as drenagens e as maiores elevações que ocorrem no interior.

O fato de o modelo ter uma resolução de 12,5m, pode superestimar as pequenas alterações do relevo e identificar a variação do dossel da vegetação, um erro comum em todos os modelos liberados gratuitamente. As bandas disponibilizadas gratuitamente não compreendem as faixas que penetram a vegetação, e esta agiria como um ruído na representação da superfície e das formas do terreno.

O modelo gerado com os dados de campo representou no gráfico as linhas mais suaves se comparada a todos os gráficos, e generaliza as informações. É interessante notar que em pontos específicos do gráfico pôde-se verificar uma variação brusca nos valores, indicando rupturas de declives que não são representadas nos demais MDEs.

Isso deveu-se ao fato de que o MDT foi feito através da interpolação de informações do mapeamento do estado, sendo assim os dados de entrada possuem uma grande influência no resultado.

FIGURA 18- Perfil *swath* dos modelos.



Fonte: A autora, 2020.

Em seguida, a partir da análise dos perfis longitudinais dos rios (figura 19) foram ressaltadas as diferenças de cada modelo utilizado. Todos os perfis mostraram evidências de captura fluvial, e diferenças altimétricas entre as drenagens internas (linhas azuis e verdes) e externas (linhas vermelhas) às feições erosivas.

As drenagens na cor vermelha são aquelas que drenam áreas que ainda não foram condicionadas pelos processos erosivos e não pertencem às feições erosivas, e uma delas já foi capturada pela feição 1.

Existem evidências de processos morfodinâmicos na borda da feição 1, com a ocorrência de uma ruptura de declive, um *knickpoint*, onde o canal capturado une-se a área da erosão. Possivelmente nesse ponto o processo erosivo atual é mais intenso e ocorrerá pela regressão desse *knickpoint* até o divisor, estágio em que o processo terá uma influência regional, com capturas fluviais, e não mais local.

A rede de drenagem extraída do SRTM parece homogeneizar a informação da superfície, algumas drenagens que nos outros modelos aparecem com pequena sinuosidade, são quase retilíneos no SRTM, muitas vezes claramente controlado pelos limites dos pixels do arquivo raster. Na observação do perfil longitudinal do SRTM é possível notar que a drenagem representada pela cor verde tem um padrão distinto do padrão da drenagem representada em azul, mesmo ambos sendo extraídos de áreas internas às feições.

O TanDEM-X extraiu uma drenagem com trechos diferentes do SRTM, apesar da mesma resolução, apresenta drenagens mais retilíneas. O ponto exato das cabeceiras também foi subestimado em relação aos outros modelos, visto que neste modelo, as nascentes se iniciam em altitudes menores, e por consequência o comprimento da drenagem e a amplitude até o nível de base local serão menores.

Nota-se no modelo ALOS um maior detalhamento da rede de drenagem, o padrão de drenagem é mais denso que nos demais, o que pode ser explicado pela resolução da imagem. Os valores obtidos das altitudes dos canais e os pontos de rupturas de declive são mais próximas a realidade que outros modelos. A ocorrência das rupturas de declive deve ser validada por outras

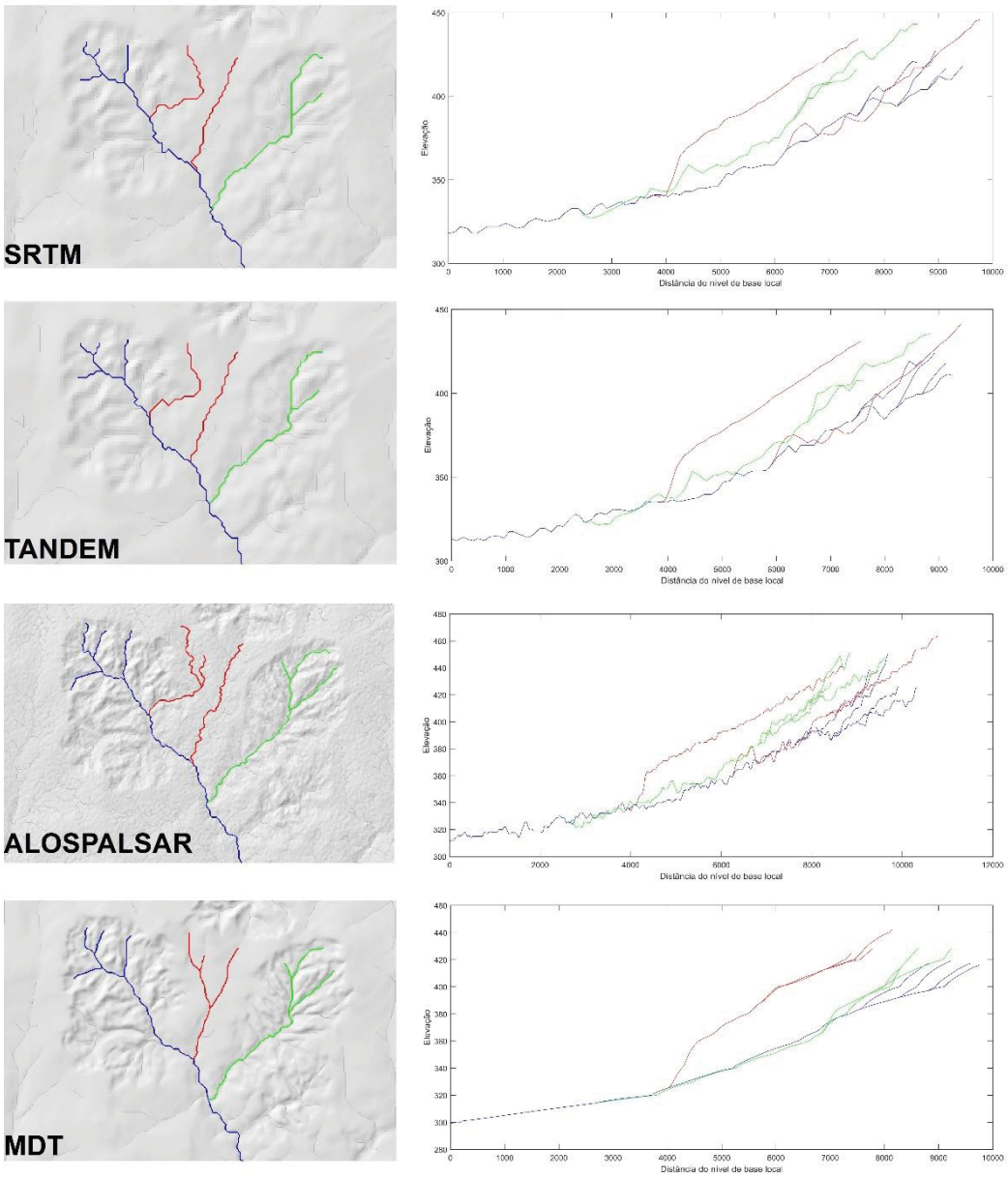
métricas, como as formas de relevo e declive e validar se são ruídos do modelo ou knickpoints.

O fato de os três modelos apontarem a ocorrência de captura de drenagem, leva a ideia de que existem três padrões de evolução da paisagem na região. Baseando-se em outras métricas combinadas as drenagens, uma feição erosiva estaria em um estágio evolutivo mais avançado (linha azul) que a outra (linha verde), e que a drenagem externa representaria ainda um outro padrão de processo erosivo mais lento e ainda em ajuste inicial (linha vermelha) pois uma delas já foi capturada pela feição 1 (linha azul).

A observação em perfil da rede de drenagem extraída a partir do MDT é advinda dos dados levantados no mapeamento sistemático, sendo a mais próxima da realidade encontrada em campo, e este foi um dado utilizado para interpolação do modelo. O MDT foi o único a identificar uma configuração distinta da drenagem exterior às feições, não aponta a captura pela erosão.

Após a comparação em perfil dos dados e seu comportamento para extração de atributos do relevo o modelo escolhido foi o ALOSPALSAR por representar satisfatoriamente as formas de relevo, o seu divisor e a drenagem.

FIGURA 19- Perfil longitudinal dos rios.



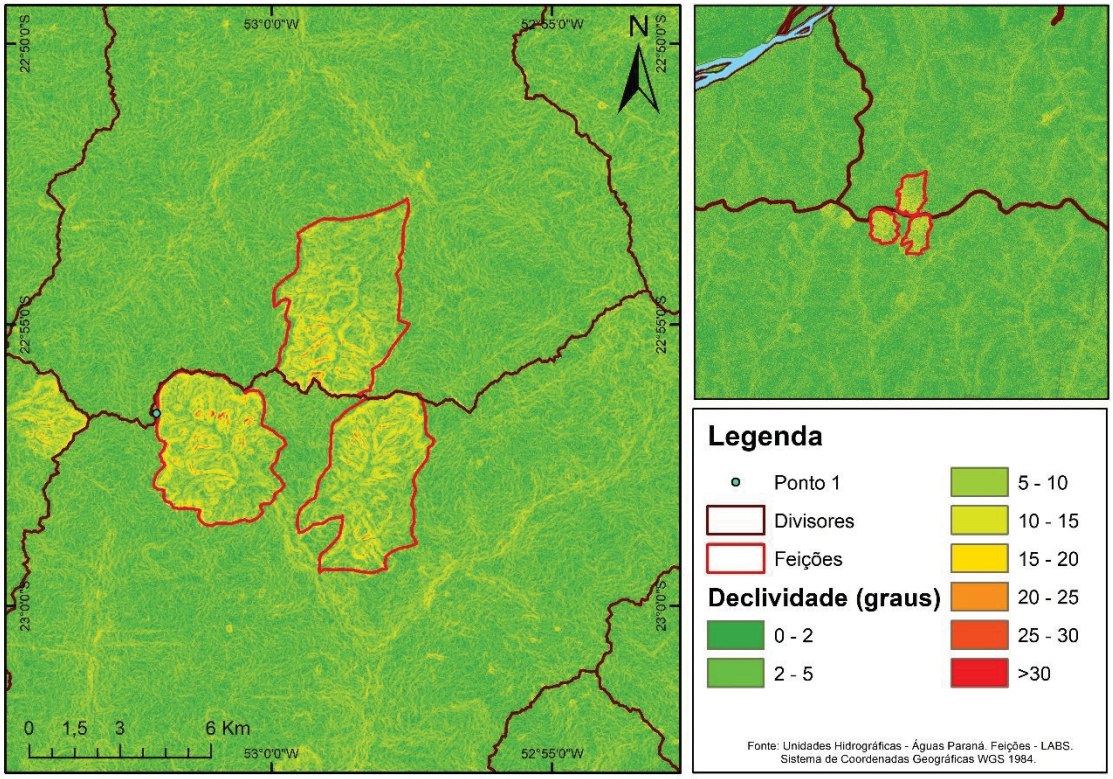
Fonte: A autora, 2020.

4.3. ÍNDICES MORFOMÉTRICOS

Após a escolha do MDE foram extraídas informações quanto às características das feições erosivas e do seu entorno. Como descrito anteriormente as feições localizam-se entre as bacias hidrográficas dos rios Ivaí e do Paranapanema e próximo à bacia do Paraná.

De acordo com as variáveis extraídas, as vertentes localizadas no entorno das feições erosivas são suaves, com predomínio das classes mais baixas de declive até 10º graus (Figura 20). As classes mais declivosas acima de 25º ocorrem no interior das feições, em áreas pontuais que representam 12% do interior das feições, figura 21.

FIGURA 20 - Declividade regional e no interior das feições.



Fonte: A autora, 2020.

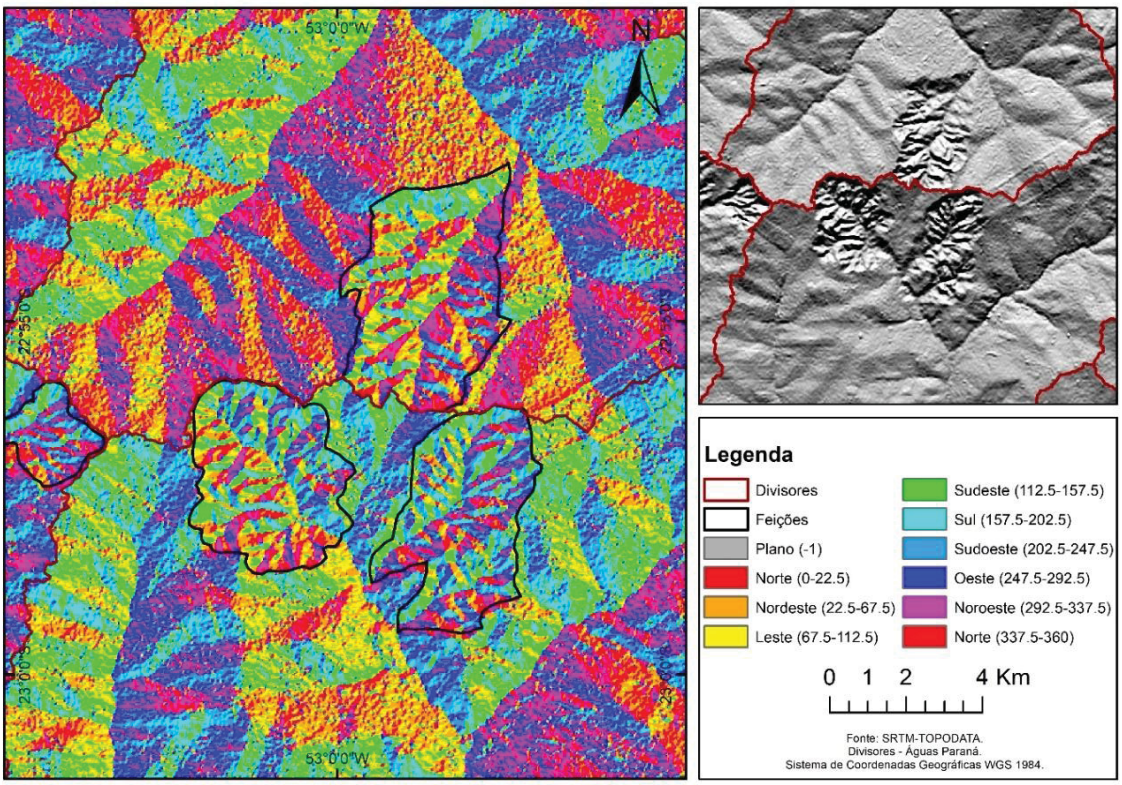
FIGURA 21- Relevo irregular no interior das feições comprovando a existência de altas declividades. Ponto de observação da figura, ponto 1 na figura 20.

Fonte: A autora, 2020.

Quanto a orientação das vertentes (figura 22) sabe-se que o clima influencia na fragilidade dos solos que ocorrem nas encostas, que sofrem os efeitos da incidência solar, chuva, evapotranspiração e vento.

As vertentes voltadas para norte (no hemisfério sul) recebem maior incidência solar (vertentes ensolaradas) tornando os solos menos úmidos, enquanto as vertentes voltadas para sul (vertentes sombreadas) recebem menor incidência solar e, consequentemente, os solos nessa posição retêm maior umidade (GEIGER, 1980; MENDONÇA, 1995; BARBOZA, 2007; ARMANI, 2009; MACHADO et al., 2009). O divisor e a encosta entre as feições concentram maior umidade pois apresentam direções voltadas para o sul assim como as feições na bacia do Ivaí em sua maioria. Já as encostas para o rio Paranapanema voltam-se para a direção norte e, portanto, concentram menos umidade em suas vertentes.

FIGURA 22 - Orientação das vertentes.

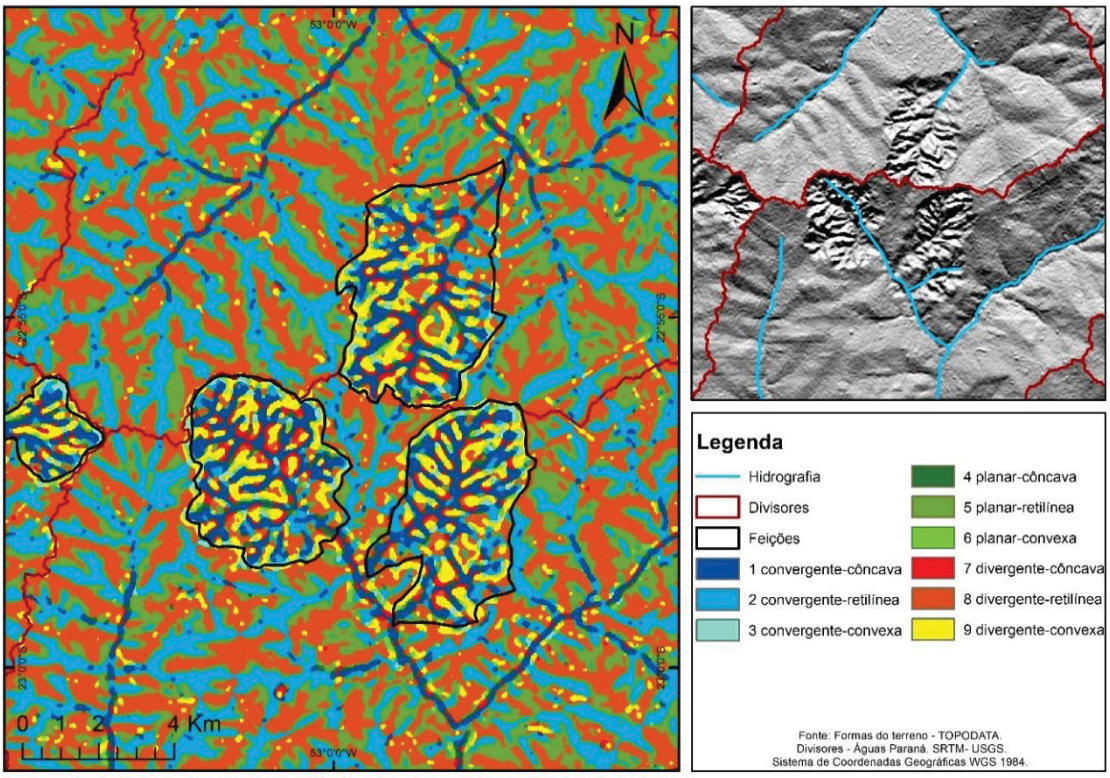


Fonte: A autora, 2020.

Majoritariamente as vertentes da região são caracterizadas pelas formas divergente retilíneas e convergente retilíneas, as drenagens escoam pelos vales que compreendem as classes convergente côncava e em alguns pontos na classe convergente retilínea, tanto no interior das feições como as drenagens do entorno, estas são visíveis e bem-marcadas na representação do terreno.

Enquanto as formas no interior das feições caracterizam-se como divergente convexa, que dispersam água, e que apresentam as maiores declividades encontradas na região e pontualmente vertentes na classe divergente côncava (figura 23). As vertentes côncavas são as que geralmente apresentam erosões lineares como voçorocas pois concentram o fluxo, enquanto as vertentes convexas dispersam água, mas podem proporcionar a erosão laminar.

FIGURA 23 - Formas das vertentes.



Fonte: A autora, 2020.

As informações referentes às características do relevo serviram para caracterizar a região e diferenciar as feições erosivas, suas bordas e as diferenças de declividade, formas do terreno e orientação das vertentes do entorno.

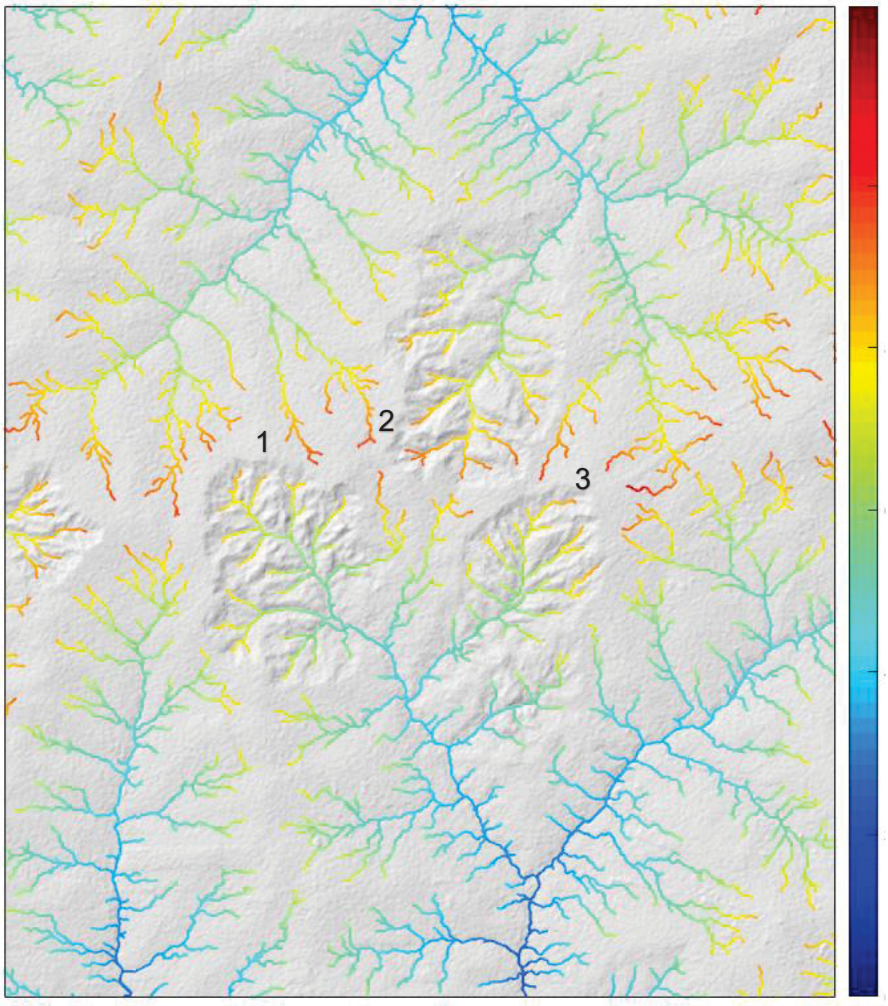
Quanto a rede de drenagem, foram utilizados índices que as caracterizam. O índice de reorganização fluvial (*X*, Chi) gera valores de chi dos canais para a métrica. O índice realiza o cálculo de como seria o perfil ideal de equilíbrio do rio, a partir disto os valores resultantes da métricas indicam o quanto os canais não respondem ao perfil ideal. Quando os valores de Chi são semelhantes as bacias apresentam-se em equilíbrio, enquanto valores contrastantes demonstram a instabilidade dos canais.

Para visualização regional o mapa Chi (figura 24) representa os valores obtidos para todos os canais da bacia, entretanto a reorganização fluvial com frequência ocorre próximo aos divisores, então os valores de Chi que devem ser observados são os das cabeceiras de drenagem.

Os resultados na figura 24 demonstram que os canais da bacia norte (Paranapanema) apresentam maiores valores para Chi (vermelho), enquanto a bacia ao sul (Ivaí) os valores são menores. Estes valores indicam o deslocamento do divisor da bacia ou canais com menores valores, para os canais ou bacia com maiores valores.

Todas as cabeceiras de drenagem da bacia ao norte apresentaram maiores valores de Chi, e ao sul algumas cabeceiras apresentam altos valores de Chi. Próximo às feições o canal em que ocorre alto valor de Chi é um canal que sofreu captura, então o canal apresenta anomalia, e após a captura fluvial o relevo no entorno passará por evolução e pertencerá à feição 1, que consequentemente após o ajuste apresentará baixos valores de Chi.

FIGURA 24– Representação dos valores chi, que variam de azul (baixo) para vermelho (alto) para as bacias de estudo.



Fonte: A autora, 2020.

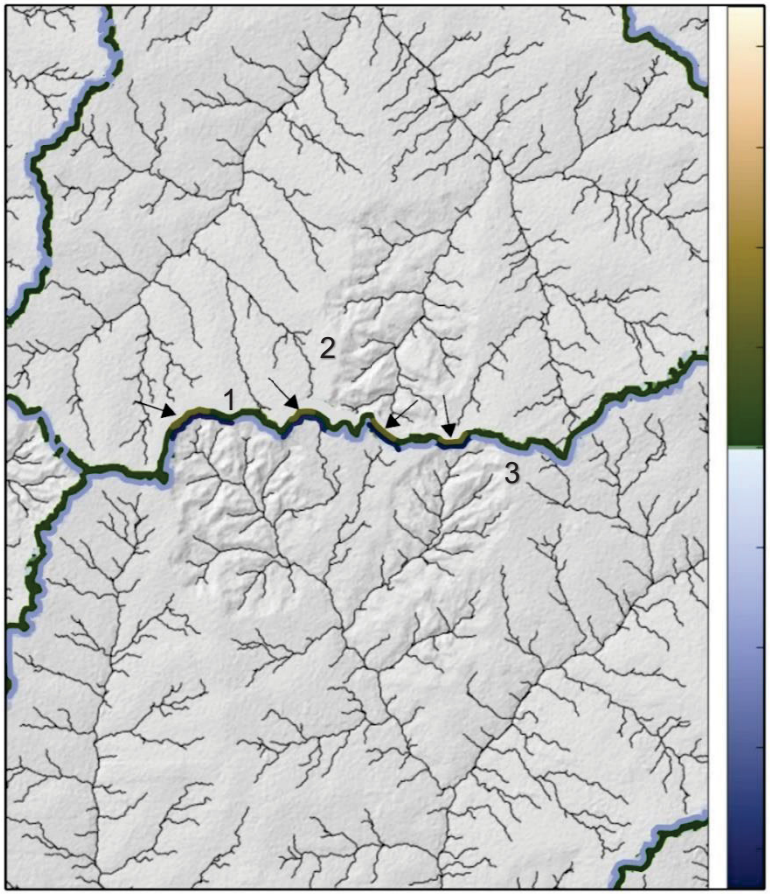
A partir dos cálculos de Chi é possível extrair o fator de Chi. O procedimento é semelhante ao método clássico, onde são calculados os valores para os canais, mas, neste caso, são inferidos valores em torno do divisor de águas a partir de uma média espacial de Chi. Esse procedimento, permite quantificar o grau em que uma “franja” no entorno do divisor é vítima ou agressora a partir das cores, da mesma forma que Chi tradicional.

A representação do fator Chi (figura 25) segue o mesmo padrão que a métrica anterior e na representação os maiores valores de Chi para a bacia indicam a condição de vítima e os menores valores para a bacia agressora.

A métrica indica o mesmo resultado que o método Chi clássico, assim segundo os valores do divisor a bacia ao norte será a bacia vítima, e a do sul a agressora. A métrica realiza o cálculo para os canais de toda a bacia, por isso é possível verificar nos cantos superiores da figura 25 que existe a mesma configuração do fator Chi para o divisor no contorno de toda bacia.

Analisando os menores valores do fator Chi da bacia ao sul, nota-se que os segmentos em que isto ocorre representam os pontos instáveis das feições, indicados pelas setas, e que foram mapeadas com o drone nas figuras 14, 15,16 e 17, tanto a estrada da feição 1 quanto a borda da feição 2.

FIGURA 25**-** Representação dos valores do fator chi para o divisor, onde os valores mais baixos representam o lado do divisor agressor e valores altos o lado do divisor vítima. As setas indicam as áreas mapeadas em detalhe e na figura são os trechos com maior contraste nas cores da bacia agressiva.



Fonte: A autora, 2020.

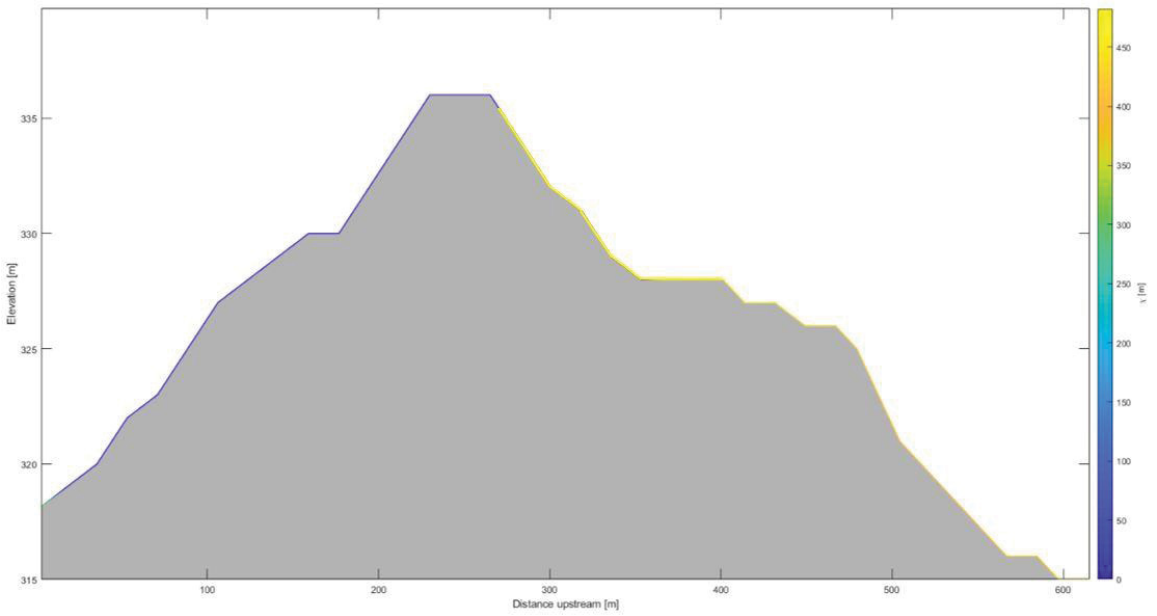
Outra métrica combinada aos valores de Chi é a representação em perfil, neste caso o rio principal da feição 2 da bacia sul e o rio principal da feição 3 na bacia norte. A representação consiste na ligação entre dois rios de bacias distintas em um único perfil, para isto extraiu-se a rede de drenagem escolhendo dois rios principais que são opostos, em seguida calcula-se a distância ponderada dos rios e faz a ligação da menor distância entre eles. O perfil final iniciará na saída do primeiro rio e segue a montante passando pelo divisor e o fim do perfil é na saída do segundo rio. Neste caso os rios escolhidos foram do interior da feição 2 e 3 pela menor distância entre si (Figura 26).

O perfil a esquerda representa o rio que nasce no interior da feição 2, e o outro lado representa o rio que nasce na feição 3. As cores apresentadas sobre o perfil dizem respeito aos valores de Chi encontrados, neste caso os maiores valores correspondem a bacia ao norte (feição 3).

Iniciando o perfil, ao lado esquerdo está a bacia do sul com feição 2, o rio principal da bacia apresenta maior inclinação e mantém um gradiente constante, no terço superior ocorre uma ruptura que representa os limites da feição 2.

E o lado direito do perfil representa a bacia ao norte composta pela feição 3, está aparece próxima ao terço médio onde ocorrem algumas rupturas de declive, e demonstra o quanto a feição é mais escavada do que a oposta.

FIGURA 26- Perfil dos rios.



Fonte: A autora, 2020.

As métricas de Chi expressam a ocorrência de anomalias na rede de drenagem, mas por si não expressam se há ocorrência de desequilibro atualmente na rede fluvial ou se ocorrerão no futuro. Assim buscou-se na literatura outras métricas que poderiam ser combinadas ao Chi para verificar mudanças na bacia e nos divisores hidrográficos. Então Forte e Whipple (2018) combinaram as métricas de Chi com as métricas de Gilbert (1877), que quantificam a diferença no divisor, e indícios de modificação no divisor ou se atuarão no divisor no futuro.

De modo geral os mapas de Chi indicam a condição da rede de drenagem, que podem representar a reorganização futura, enquanto as métricas de Gilbert são mais eficientes para avaliar o estado atual da rede de drenagem e do divisor.

Assim como o Chi as três outras métricas de Gilbert (1877), elevação, gradiente e relevo, são comparadas entre as drenagens próximas ao divisor.

As figuras resultantes da aplicação das quatro métricas (Chi e Gilbert), são comparadas na figura 27. Chi e elevação, geralmente apresentam resposta semelhantes em seus valores, assim como ocorre entre gradiente e relevo local.

Quando o divisor está em estado estacionário (equilíbrio) os valores obtidos na métrica elevação são baixos, os valores de gradiente são iguais em ambos os lados do divisor, e as cabeceiras apresentam equidistância do divisor. Na área os valores das métricas são contrastantes e as cabeceiras não são equidistantes do divisor.

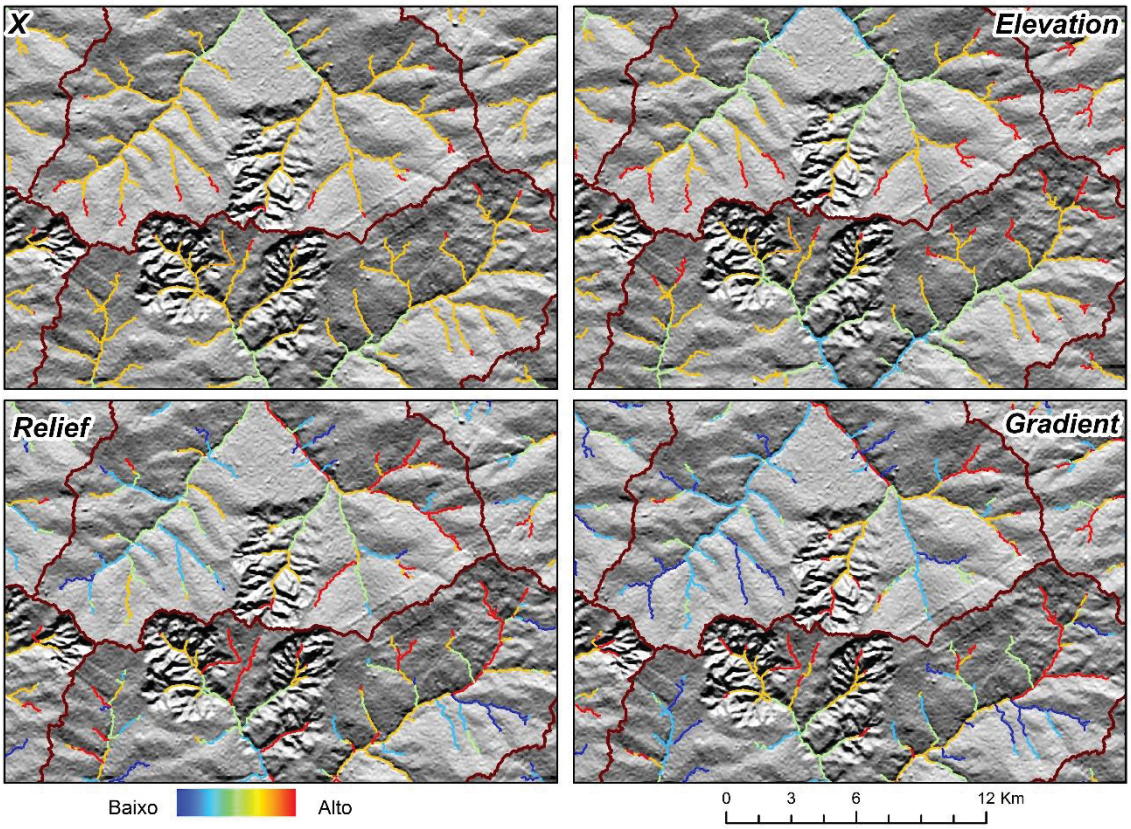
Quando estes valores contrastam entre os canais de bacias opostas, indicam que os canais estão em desequilíbrio, e podem avançar em direção a outra bacia. A modificação de características da bacia produz ganho ou perda de drenagem e o tempo que o relevo responde para um estado de equilíbrio. A migração do divisor hidrográfico é a busca para um novo estado de equilíbrio.

Como já apresentado anteriormente os valores de Chi apontam certo grau de instabilidade nos canais, identificados por seus altos valores em Chi, consequentemente indicam mudanças na rede atual ou no futuro por ganho ou perda de área.

A elevação caracteriza-se por apresentar valores altos nas cabeceiras, com resultado semelhante a Chi, neste caso as vertentes ao sul apresentaram segmentos menores que as vertentes ao norte.

Quando os gradientes e o relevo local são elevados servem como proxy para apontar a ocorrência de erosão ou deslocamento do divisor, que avançaria do sentido dos maiores valores. Conforme os resultados o deslocamento do divisor ocorreria da bacia ao sul (altos valores) em direção ao norte (baixos valores) por meio da evolução das feições erosivas.

FIGURA 27 - Índice chi e as métricas de Gilbert (elevação, relevo e gradiente).



Fonte: A autora, 2020.

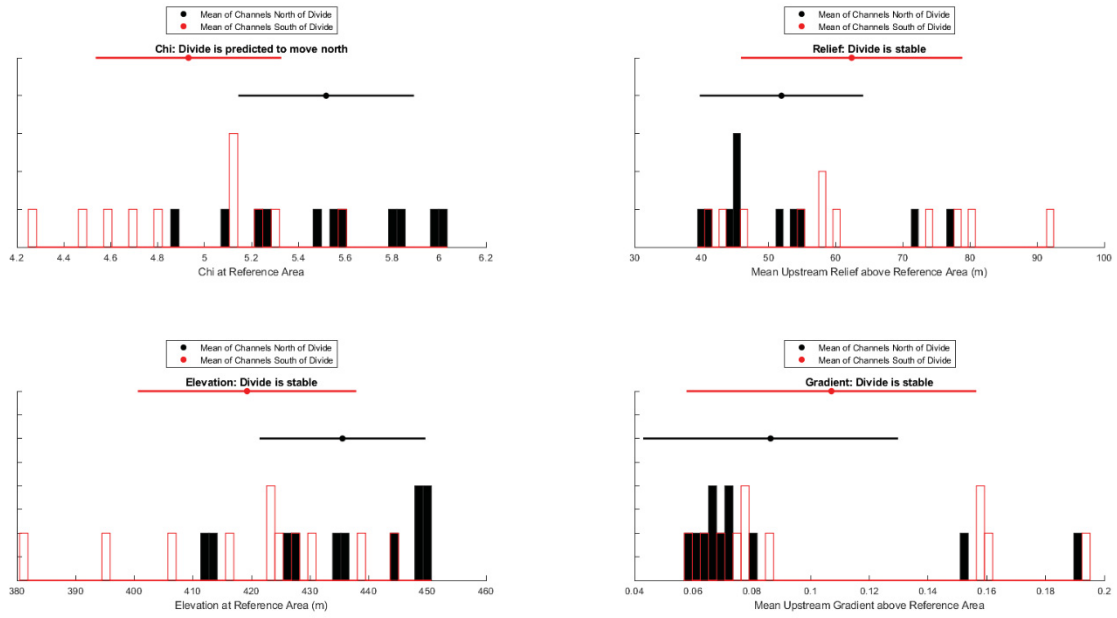
Além da representação por cores comparou-se os valores de desvio padrão das cabeceiras (Figura 28) e seu erro padrão, representados graficamente.

As barras do gráfico representam em vermelho os valores para o sul e preto os valores para o norte. Nota-se que os valores de Chi para os canais ao norte são mais altos, com poucos pontos saindo do desvio padrão enquanto os canais ao sul apresentam valores baixos e somente em um caso o valor está fora do desvio. Está métrica indica que preferencialmente o divisor se moverá para o norte. Os valores de relevo médio local nas cabeceiras dos canais ao

norte se concentram nos menores enquanto o desvio padrão dos canais ao sul é maior e se distribuem em todo o intervalo.

Segundo a distribuição dos canais no gráfico os maiores valores encontram-se ao norte, já os canais ao sul distribuem-se ao longo de diferentes elevações de 380 a 450m (figura 28). No gradiente os canais ao norte e ao sul se concentram nos menores valores, ambos apresentam um grande desvio padrão. Os valores que extrapolam os desvios são os canais no interior das três feições. A representação gráfica das três últimas métricas indicam que o divisor está estável.

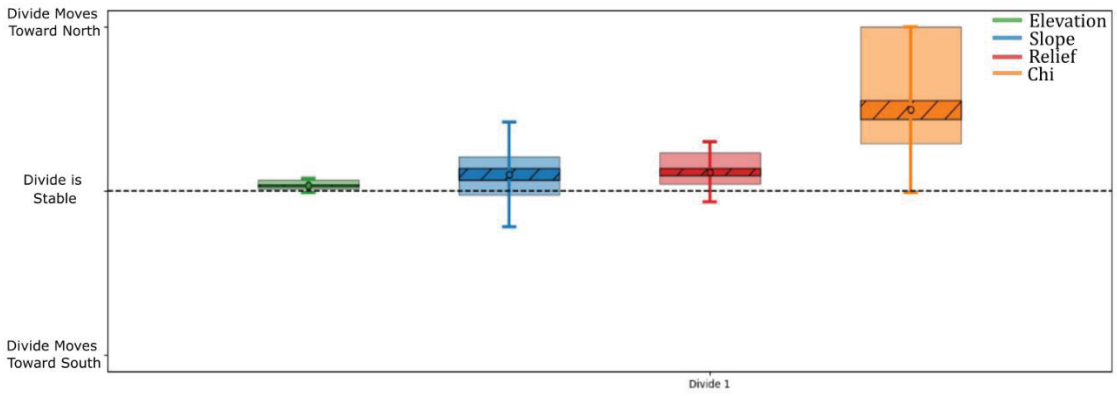
FIGURA 28- Histograma dos valores de desvio padrão para os canais próximos ao divisor.



Fonte: A autora, 2020.

Em seguida são representados os valores deltas para as quatro métricas. O delta representa a diferença entre o valor das amostras de cada lado da divisão. O valor pode ser medido para cada variável (*Elevation, Slope, Relief* e *Chi*). Ao fixar a ordem da subtração para cada variável, é possível identificar o movimento ou estabilidade de cada ponto da divisão. O gráfico possibilita a visualização da sobreposição dos valores das amostras para as diferentes métricas. As barras apresentam o desvio padrão, as caixas coloridas e listradas o erro padrão e as caixas coloridas com certa transparência o bootstrap (Figura 29).

FIGURA 29– Gráfico com os valores de desvio padrão e erro médio padrão e bootstrap do divisor.

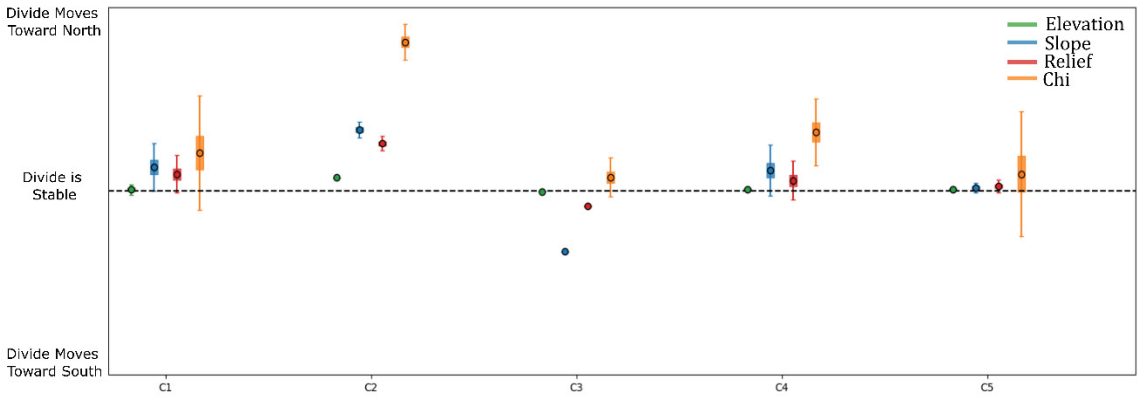


Fonte: A autora, 2020.

A distribuição dos valores no desvio padrão sobrepõe a linha do divisor estável, ao focar neste resultado o divisor atualmente é considerado estável. Para maior confiabilidade dos resultados, Forte e Whipple (2018) indicam a observação de outras análises estatísticas como a observação do erro padrão ou bootstrap (intervalo de confiança). Quanto a observação do erro padrão e bootstrap as amostras apresentam uma tendência a deslocamento para o norte. Os resultados do bootstrap dos deltas indicam o avanço para o norte, considerando 95% de confiança das amostras apresentarem instabilidade do divisor e migração para norte.

Ao longo de um único divisor alguns segmentos podem apresentar instabilidade ou tendência ao deslocamento do divisor. Para demonstrar a diferença dos segmentos do divisor gerou-se um gráfico único do divisor (Figura 29) e outro gráfico onde o dividiu em cinco seções para avaliar a estabilidade individualmente (Figura 30) e seus diferentes comportamentos.

FIGURA 30- Gráfico com desvio padrão e erro médio padrão dos segmentos do divisor.

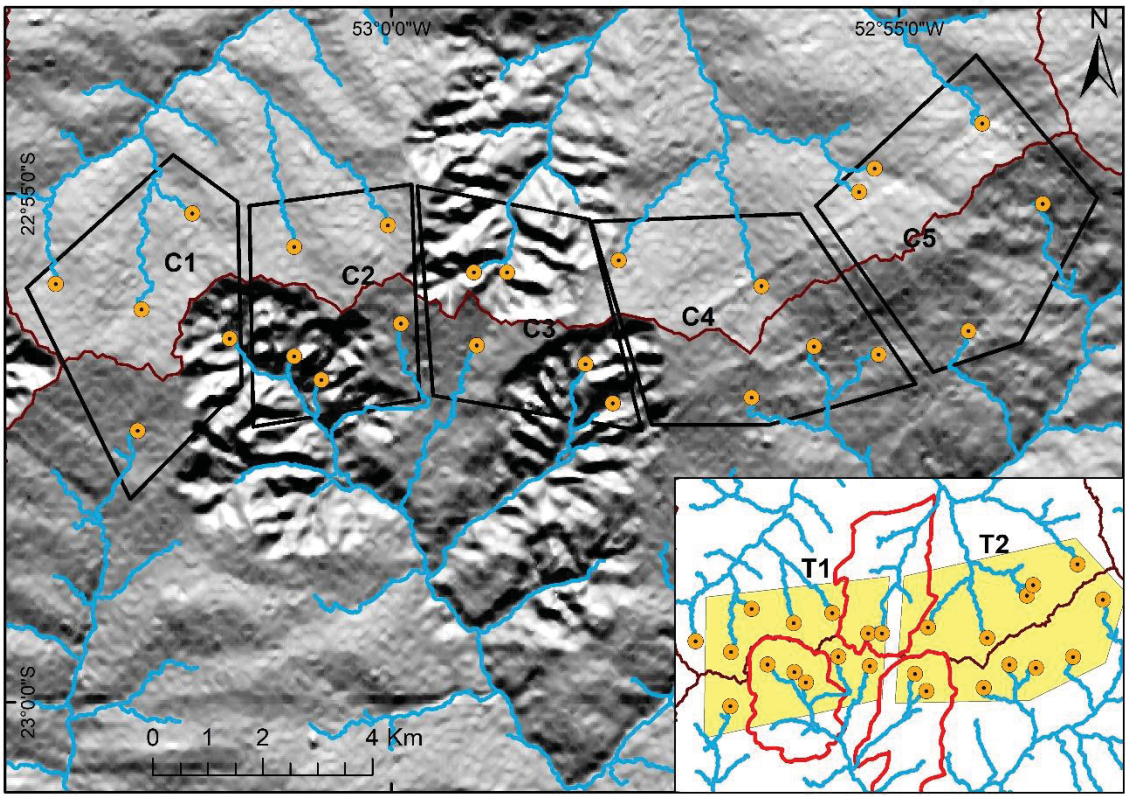


Fonte: A autora, 2020.

As seções que compõem o divisor estão representadas na figura 31. As amostras da seção C1 indicam o deslocamento do divisor para norte, o delta de elevação apresenta pouca variação concentrando-se sobre o divisor estável. C2 apresenta Chi com maior delta, e todas as amostras dos canais indicam movimentação para norte por seu delta e consequentemente seu baixo desvio padrão. A seção C3 apresentou delta semelhante para todas as métricas, com baixo desvio padrão, mas de modo geral seus canais respondem ao divisor estável na seção. Enquanto C4 a distribuição é semelhante a C1 mas o desvio padrão de Chi não sobrepõe o divisor estável, e indica deslocamento para norte. E em C5 o delta condiciona a estabilidade do divisor, com baixa variação de desvio padrão e erro. A métrica Chi apresenta delta que indica deslocamento para o norte.

Quando se observa o erro padrão para as amostras somente o delta do erro padrão da métrica elevação sobrepõe a linha do divisor estável, as demais se concentram acima da linha e demonstram uma tendência de deslocamento do divisor.

FIGURA 31- Localização dos canais e seções dos divisores.



Fonte: A autora, 2020.

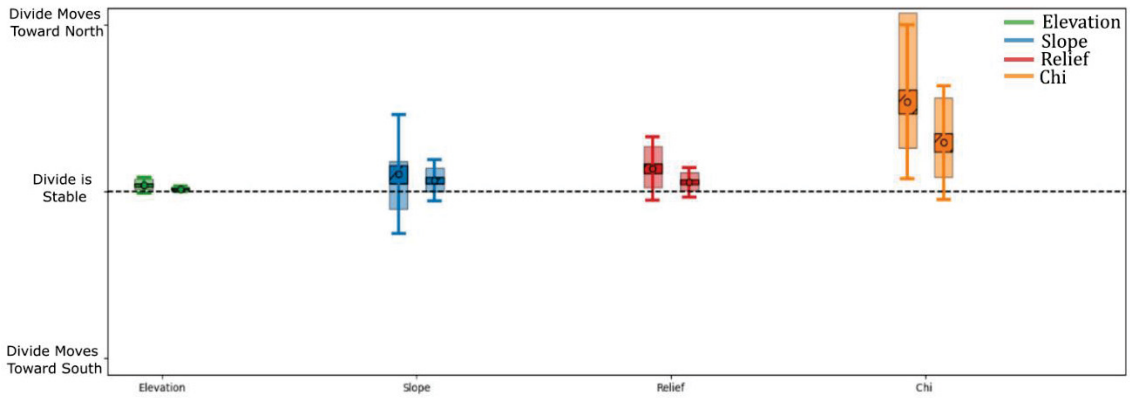
Para cálculo do bootstrap (intervalo de confiança) dos valores não foi possível a verificação estatística das 5 seções pois o método necessita para o cálculo uma maior amostragem para combinação entre si e obtenção dos valores. As amostras foram divididas em dois segmentos para distribuir as cabeceiras ao longo do divisor (T1 e T2) o segmento T1 inclui C1, C2 e metade de C3, enquanto T2 inclui metade de C3, C4 e C5.

Na figura 32 são apresentadas as 4 métricas no eixo X, a distribuição no gráfico segue de T1 e T2 em todas as métricas. Observando a figura somente o T2 de elevação sobrepõe o divisor estável. Segundo o erro padrão e o bootstrap todos os valores estão indicando uma tendência de migração para o norte.

Ao avaliar o delta do desvio padrão para as 5 seções (C1 a C5) do divisor todos ultrapassam a linha do divisor estável. Quando se utiliza o erro padrão e bootstrap (intervalo de confiança) estes indicam uma tendência a migração tanto nos valores totais do divisor quanto as seções (T1 e T2), figuras 29 e 30. O delta de Chi tem maior contraste com as demais métricas. As elevações nestas seções

são mais próximas do divisor estável e com menor valor de delta, enquanto relevo e gradiente se distribuem de forma semelhante.

FIGURA 32- Gráfico do desvio padrão, erro padrão e bootstrap do divisor, dividido em dois segmentos T1 e T2 respectivamente no gráfico.



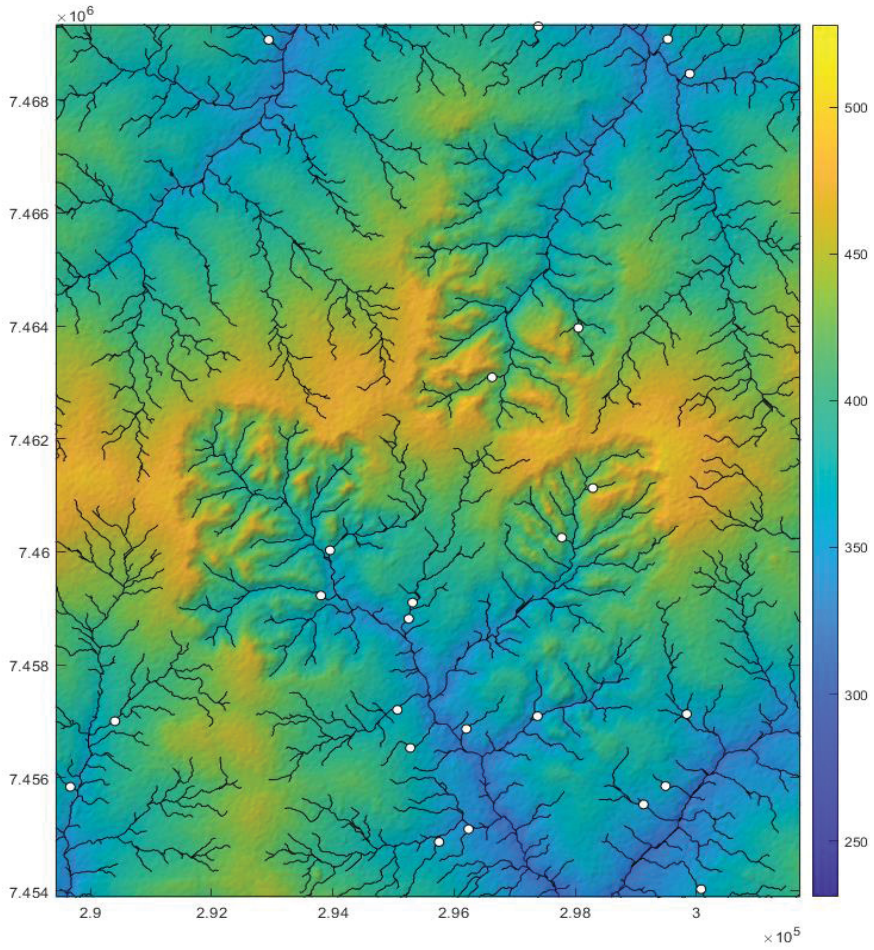
Fonte: A autora, 2020.

Considerando a análise dos perfis longitudinais, os *knickpoints* não representaram grandes declives ao longo dos rios pelas formas suaves de relevo no Noroeste. Mas a ocorrência de *knickpoints* proporciona mudança nos canais e consequentemente a evolução do relevo.

A figura 33 apresenta os *knickpoints* existentes (pontos brancos da imagem), e na figura 34 serão apresentados os perfis longitudinais dos rios principais no interior das feições e as drenagens entre elas onde ocorrem alguns destes *knickpoints*. A comparação dos perfis será na sequência de cores ciano e azul.

A resposta dos perfis dos rios é essencial para a interpretação da migração do divisor, que demonstram o ajuste dos rios, ocorrência de *knickpoints* e gradiente.

FIGURA 33- Ocorrência de *knickpoints* (pontos brancos) próximo às feições e nos canais próximos ao divisor e identificação dos canais para perfis longitudinais.



Fonte: A autora, 2020.

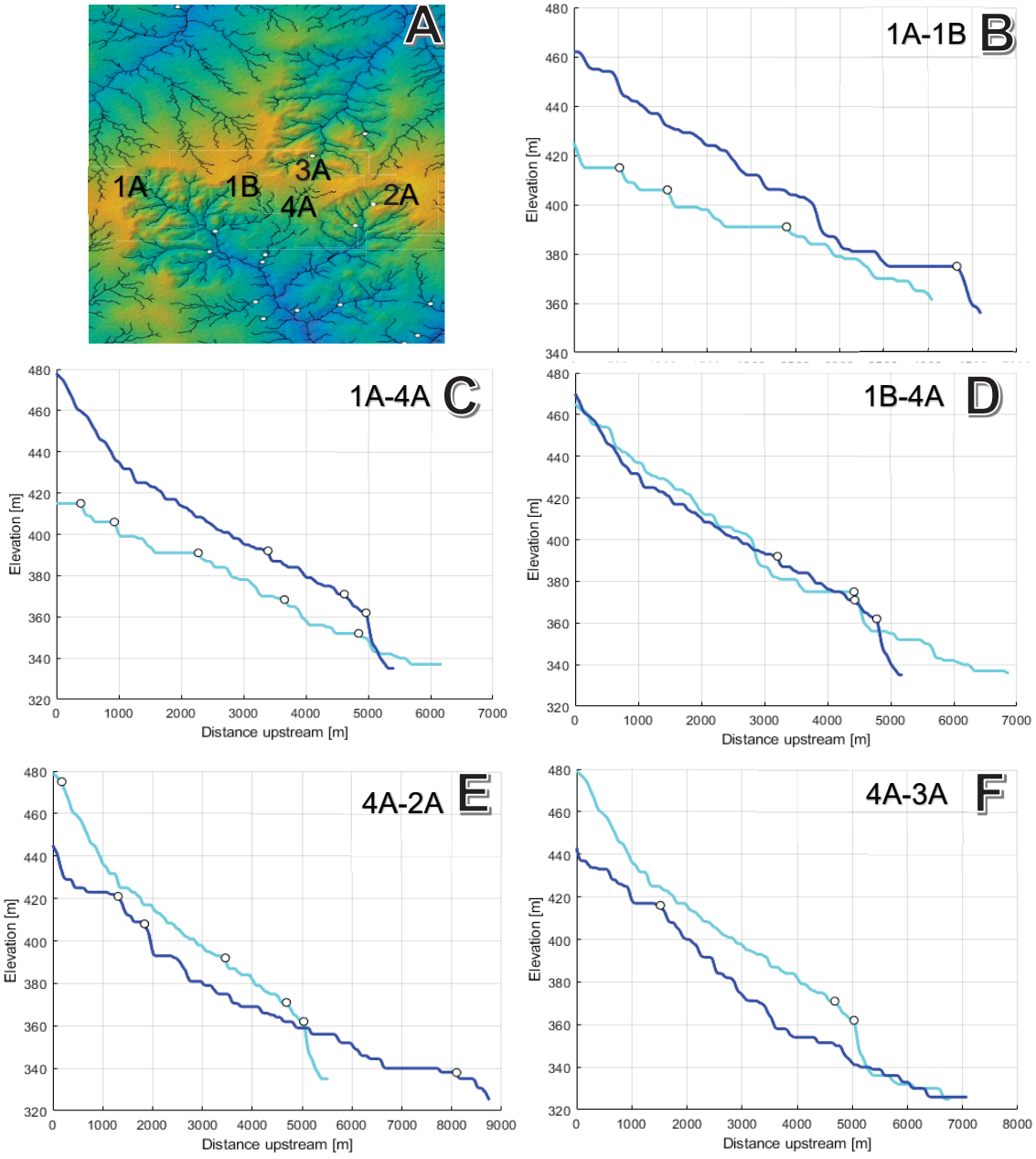
As nomenclaturas usadas para cada drenagem estão na figura 34 (A). No perfil B (Figura 34) é visto o comportamento da drenagem no interior da feição 1 e o canal capturado por esta feição (1A e 1B), este canal capturado apresenta maior inclinação que os demais e se une a feição 1 onde ocorre um *knickpoint*, que consequentemente o relevo evoluirá neste ponto.

Analisando C apresenta o perfil da feição 1 (1A) e o canal entre as feições (4A), nota-se que o último apresenta maior gradiente e maior elevação (480m) que os demais canais. Este foi comparado novamente em D, onde estão o canal capturado pela feição 1 (1B) e o canal entre as feições (4A) ambos com alto gradiente e elevação, mas o canal capturado está menos ajustado. A drenagem 4A mesmo com alto gradiente está se ajustando e o seu relevo no entorno como

nas formas de relevo (figura 23) apresenta ao longo do seu perfil dois *knickpoints*.

Enquanto E se compara o canal entre as feições (4A) e a feição 2 (2A), a elevação da feição 2 é maior que a feição 1 e sua drenagem é menos ajustada que a feição 1. Em F estão a drenagem entre as feições 1 e 2 (4A) e a feição 3 (3A). Em 3 ocorrem rupturas de declive mais definidas do que as outras duas feições.

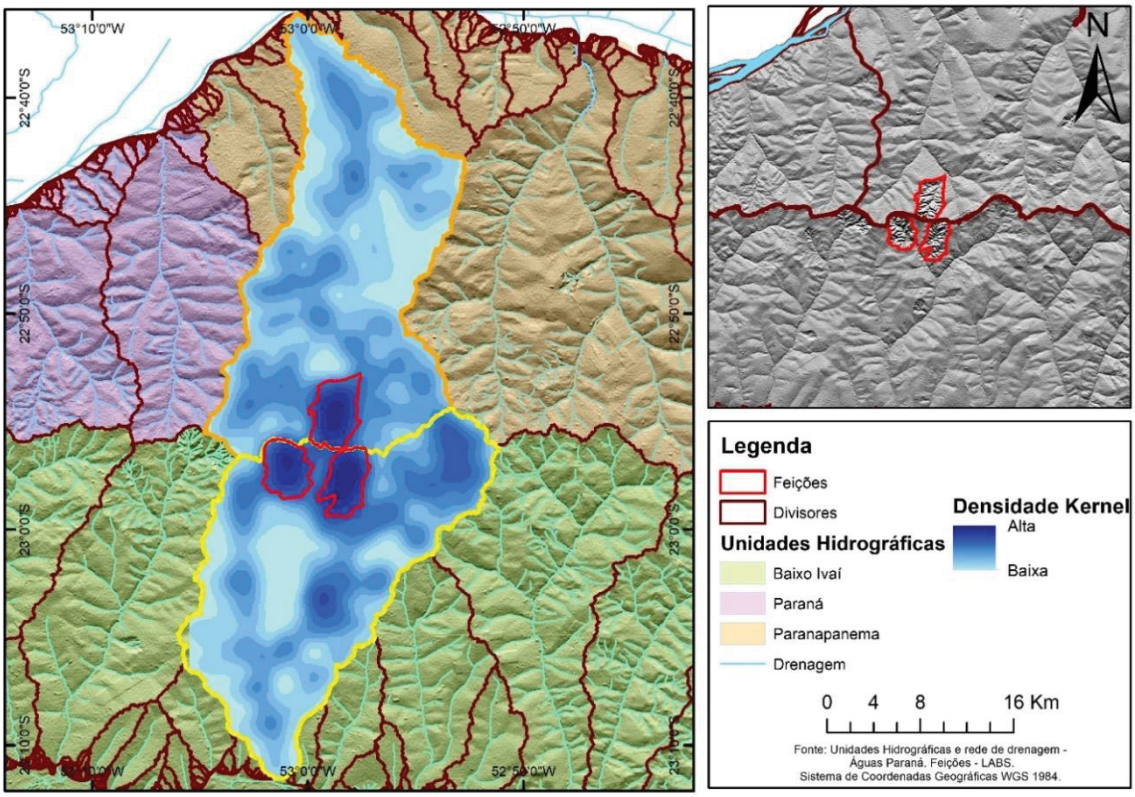
FIGURA 34- Perfis dos rios. (B) canais 1A e 1B; (C) canais 1A e 4A; (D) canais 1B e 4A; (E) canais 4A e 2A; (F) 4A e 3A.



Fonte: A autora, 2020.

Um dos parâmetros morfométricos utilizados para estudar as bacias hidrográficas e a rede de drenagem é a sua densidade. A partir dos resultados gerados foi possível verificar a alta densidade de drenagem no interior das três feições erosivas (Figura 35), enquanto os valores médios se concentram nos canais com maior comprimento ao longo da bacia. Além de ser um fator determinante para evolução da rede de drenagem, a densidade também indica a erodibilidade potencial do terreno (NASCIMENTO e GARCIA, 2005).

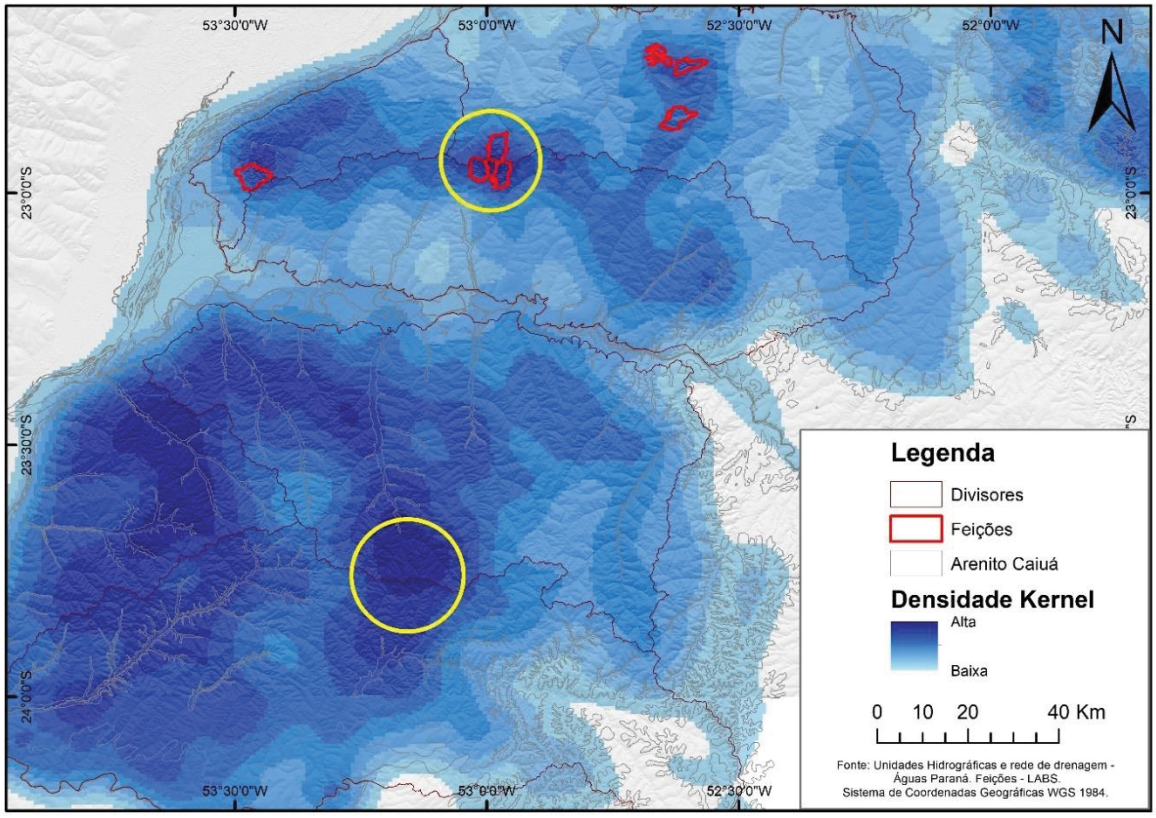
FIGURA 35- Estimador de densidade Kernel da rede de drenagem que compõe as bacias das feições erosivas.



Fonte: A autora, 2020.

A densidade de drenagem também se relaciona com o grau de dissecação do relevo, como o que já ocorre no interior das feições, e de acordo com a hipótese deste trabalho. A configuração atual das feições poderá evoluir para uma coalescência das três feições, as partes circuladas em amarelo, círculo superior, representa a área de estudo, enquanto o inferior representa a área onde já devem ter existido feições individualizadas e que coalesceram (Figura 36).

FIGURA 36- Densidade Kernel da rede de drenagem sobre o arenito Caiuá.



Fonte: A autora, 2020.

Considerando os resultados anteriores foi desenvolvido um modelo evolutivo para as feições. A figura 37 representa os estágios de evolução e ao lado de cada estágio, fotos, figuras, gráfico e tabela que auxiliam a explicar o modelo proposto.

Em (I) foi representado o estágio atual da área de estudo, a partir dos dados adquiridos, como as imagens de drone, rede de drenagem e imagens de satélite para distribuição espacial das feições, além dos dados obtidos a partir das datações por isótopos cosmogênicos com Berílio 10. Os valores da figura apresentam as taxas de erosão em metros por milhão de ano, indicando maiores taxas para a feição 3 e menores taxas para feições 1 e 2 (GOULART, 2020).

No estágio (II) a drenagem ao lado da feição 1 que já foi capturada passará por transformações no relevo ao entorno do canal, na busca de se ajustar a feição 1. Os indícios que comprovam a evolução são a presença de captura, o canal apresenta altos valores de Chi, elevação, gradiente e relevo, e presença de *knickpoints*, e necessariamente buscará o ajuste do canal e do relevo como o existente na feição.

No momento que o canal se ajustar e a forma da feição mudar, os novos limites da feição 1 chegarão próximo ao divisor hidrográfico e poderá se unir a feição 3 pois está apresenta indícios de erosão na sua borda exatamente sobre o divisor, como visto nos dados levantados com o drone.

No estágio (III) as feições 2 e 3 tendem a se unir a partir do avanço da feição 2 em direção a 3. Esta condição se deve pelas características atuais do divisor, ele é a menor distância entre as duas feições, validado nos dados de campo.

O levantamento com o drone permitiu a observação de indícios de processos erosivos na borda da feição 2, além disto o MDE mostra que as bordas da feição 2 se encontra em menores altitudes que 3.

Uma característica importante observada nas métricas, perfis longitudinais e nas imagens é que as cabeceiras de drenagem da feição 3 estão muito próximas ao divisor, enquanto na feição 2 ainda não. As cabeceiras da feição 2 estão distantes e em altitudes mais baixas que o divisor, as drenagens ainda têm área para erodir e maior energia para evoluir, enquanto 3 já chegou ao limite e estabilizou-se. Na análise em perfil nota-se maior gradiente em 2, e em 3 elevados valores de Chi e gradiente constante.

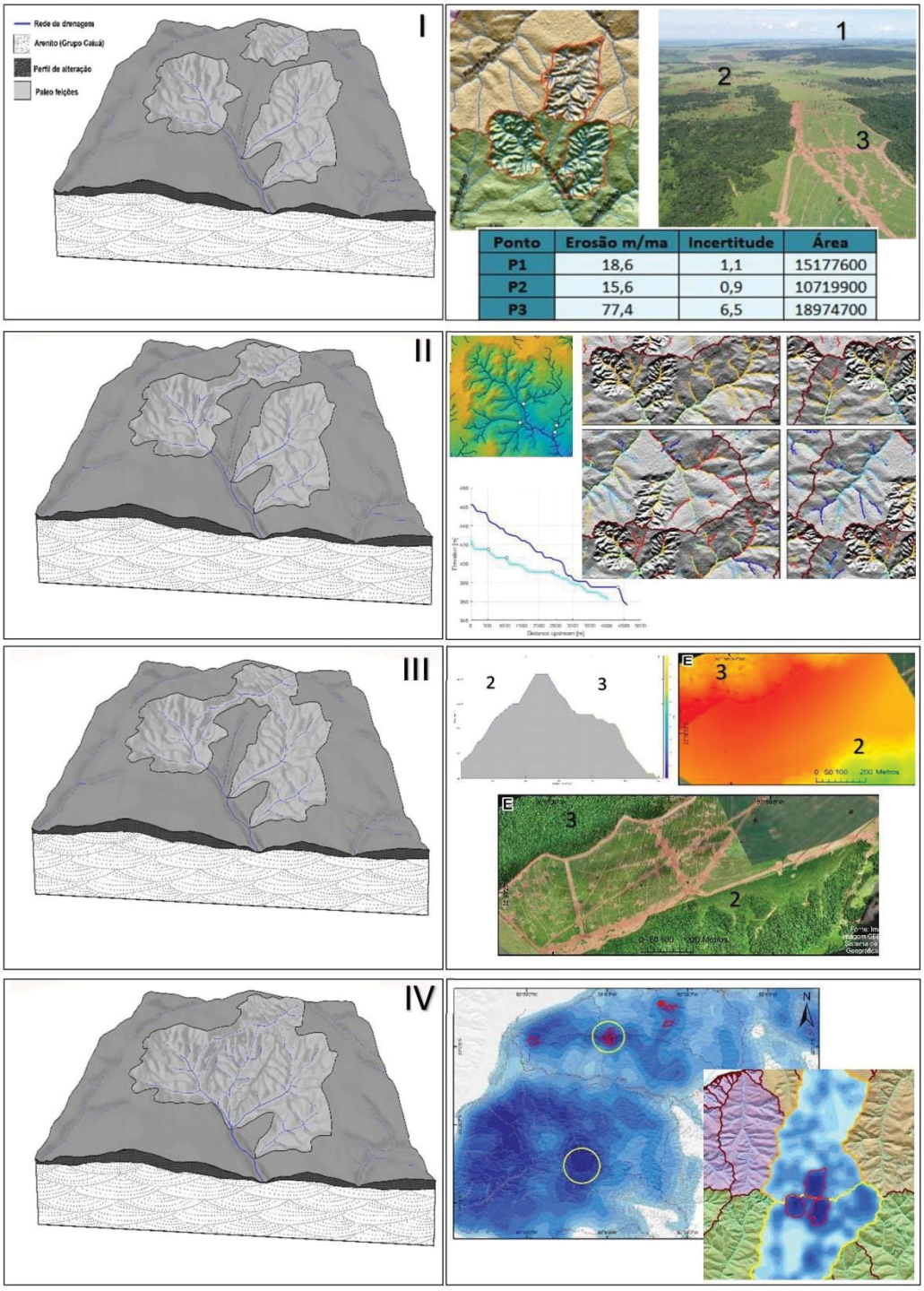
Independe da escala de tempo que levará para acontecer o estágio IV, o canal ao lado das feições poderá unir-se a feição 1 ou 2 antes de avançar para o estágio IV.

O estágio (IV) ilustra a fase final de evolução dessas feições, resultado da coalescência delas, como uma feição única. Essa, por sua vez, deverá apresentar bordas bem definidas e contrastantes com o relevo suave regional. Será um marco inicial da evolução do relevo no entorno que, no decorrer do tempo, passará a apresentar vertentes dissecadas, curtas e declivosas, conforme ocorre ao sul do rio Ivaí, ilustrado na figura 4 pelo Índice de Concentração de Rugosidade.

Para chegar ao estágio IV, de acordo com todos os resultados das métricas de chi, fator chi, métricas de Gilbert e os perfis longitudinais o sul avançará em direção ao norte. Observando a densidade de drenagem das duas bacias nota-se que a maior densidade de drenagem ocorre em feições erosivas, e a densidade de drenagem de todo o noroeste demostra que as feições erosivas

apresentam o mesmo padrão de densidade que as áreas ao sul do rio Ivaí que seriam feições que coalesceram, considerando isto e os estágios anteriores ambas as feições se unirão em uma única feição. As drenagens no interior das feições passarão por uma reorganização fluvial, e o fluxo poderá redirecionar para a bacia do sul.

FIGURA 37 – Modelo evolutivo das feições erosivas.



Ponto	Erosão m/ma	Incertitude	Área
P1	18,6	1,1	15177600
P2	15,6	0,9	10719900
P3	77,4	6,5	18974700

Fonte: A autora, 2021.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES

Tendo conhecimento sobre as características do relevo e das feições que estão próximas ao divisor e próximas entre si, avaliadas combinadamente a informações do relevo ao sul do rio Ivaí como concentração de rugosidade, disposição das áreas e proximidade com o divisor verificou-se um grande indicativo de que poderá ocorrer processos semelhantes ao norte do rio Ivaí onde se encontram as feições.

Os dados obtidos em campo permitiram a identificação das feições erosivas, além de apontar áreas de fragilidade nas suas cabeceiras, permitindo a geração do MDE, fundamental para avaliar as bordas das feições erosivas.

A extração da morfometria do relevo serviu para caracterizar as vertentes localizadas no entorno e no interior das feições no que se refere as suas formas, declividade e direção e assim avaliar em conjunto as informações extraídas a partir de algoritmos matemáticos.

O algoritmo de estabilidade do divisor demonstra diferentes informações e não se deve realizar as análises por apenas uma das métricas, por exemplo somente a comparação da diferença dos valores de Chi. O uso de apenas uma métrica para apontar mudanças no divisor e nos canais não é confiável.

A escala de tempo da evolução da rede de drenagem é diferente da evolução do relevo, por isso as métricas devem ser combinadas e não avaliadas de modo independente.

Com o resultado do trabalho verifica-se a importância de avaliar as métricas em conjunto, e de realizar testes estatísticos para a confiabilidade dos resultados como o uso de teste-t ou neste caso o intervalo de confiança que respondem estatisticamente além do desvio e erro padrão disponibilizado pelo método.

Importante considerar essas métricas combinadas a outras análises da paisagem e índices morfométricos que foram empregados e serviram para apontar locais para futuras investigações.

Pelos índices obtidos através dos algoritmos foi verificado que há uma tendência para que as feições se unam em uma única feição após algumas

fases, como o ajuste dos canais de maiores anomalias e mais elevados pelos canais já ajustados e mais baixos, e com mais área para erodir até o divisor.

Isso resultaria na modificação do relevo da região e influenciando na ocorrência de uma nova configuração do relevo (mais dissecado). Ainda a partir das métricas, foi possível inferir que quando a bacia ao sul das feições 1 e 2 avançar em direção a norte da feição 3, ocorrerá uma reorganização da drenagem no interior das feições para que passem a drenar no sentido sul.

O modelo proposto pode ser reforçado pelos resultados da mensuração das taxas de denudação por isótopos cosmogênicos (^{10}Be), para bacias hidrográficas do Noroeste do Paraná, obtidos por Couto et al, (2018) e Goulart (2020). Os resultados das taxas de denudação indicam maior taxa para a bacia sul do que para a bacia norte e este resultado é justificado pelas características das bacias, no caso a bacia sul (feição 1 e 2) apresenta maior densidade de drenagem, e consequentemente processos erosivos mais acelerados.

Especificamente para as feições erosivas, as taxas de denudação mensuradas por Goulart (2020,) foram maiores na feição 3 e menores para as feições ao sul (feições 1 e 2). A feição 3 apresenta maior taxa de denudação, justificando sua maior área e comprimento, pois já passou por erosão remontante até chegar a borda do divisor e estabilizar-se. Enquanto as feições 1 e 2 apresentam menores taxas de denudação e consequentemente menor área erodida para ambas, de acordo com o modelo proposto estas feições avançarão em direção a feição 3, pois de acordo com as métricas elas apresentam certo grau de instabilidade além da tendência ao deslocamento para norte.

Por fim é possível afirmar que de acordo com as tendências das métricas e das análises do relevo haverá um deslocamento do divisor para o norte. O deslocamento dependerá de outros fatores ao longo do tempo, mas as métricas respondem adequadamente a migração de acordo com as características existentes nas vertentes, no divisor (presença e distância das cabeceiras de drenagem, largura do divisor, processos erosivos, gradiente e relevo local) e na observação da rede de drenagem.

6. REFERÊNCIAS

ARAUJO, M.S.; MARUSCHI, V. de O. **Aspectos metodológicos e operacionais em morfometria fluvial, a partir do Geoprocessamento.** 2020. Caderno de Geografia. v.30. número especial 1. p.19-35. 2020.

ARMANI, G. **Análise topo e microclimática tridimensional em uma microbacia hidrográfica de clima tropical úmido de altitude.** 123 f. Tese (Doutorado) - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas - USP, 2009. Acesso em: 21 ago. 2014. 2009.

BARBOZA, R. S. **Caracterização das bacias aéreas e avaliação da chuva nos contrafortes da Serra do Mar-RJ**. Dissertação, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007. 68p.

BENITO-CALVO, A. B.; HADDOUMI, H.; AOURAGHE, H.; OUJAA, A.; CHACON, M.G.; SALA-RAMOS, R. (2020) Geomorphological analysis using small unmanned aerial vehicles and submeter GNSS (Gara Soultana butte, High Plateaus Basin, Eastern Morocco), **Journal of Maps**, 16, 2, p.459-467. 2020.

BIGARELLA, J. J.; MAZZUCHOWSKI, J. Z**. Visão integrada da problemática da erosão.** Livro Guia do III Simpósio Nacional de Controle da Erosão. Maringá, 1985.

BISHOP, P. Drainage rearrangement by river capture, beheading and diversion. **Progress in Physical Geography** 19, 4, p. 449-473. 1995.

BOULTON, S.J.; STOKES, M., 2018. Which DEM is best for analyzing fluvial landscape development in mountainous terrains? **Geomorphology** 310, p. 168–187. 2018.

BURROUGH, P.A. Principles of geographical information systems for land resouces assessment. Oxford, Clarendon Press, 1986. 193 p.

CALEGARI, M. R. Distribuição da Cobertura Pedológica e o Relevo no Alto Vale do Ribeirão Água do São Francisco -Nova Esperança-PR. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis,2000.

CÂMARA, G.; MEDEIROS, J.S**. Princípios básicos em geoprocessamento.** In: ASSAD, E.D.; SANO, E.E. Sistemas de Informações Geográficas (Aplicações na Agricultura). 2.ed. Brasília: SPI/ EMBRAPA-CPAC,. 434 p. 1998.

CANCIAN, N. A. **Cafeicultura paranaense – 1900/1970.** Curitiba: CRAFIPAR,1981.

CASTRO, S.B.; CARVALHO, T.M. **Análise morfométrica e geomorfologia da bacia hidrográfica do rio Turvo- GO, através de técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento.** 2009. v.5. n.2. Associação Sergipana de Ciências. 2009.

CHAMPAGNAC, J.D.; VALLA, P.G.; HERMAN, F. 2014. Late-Cenozoic relief evolution under evolving climate: A review. **Tectonophysics** 614: 44–65. DOI: 10.1016/j.tecto.2013.11.037. 2014.

CHANG, K.T.; TSAI, B.W. (1991) The Effect of DEM Resolution on Slope and Aspect Mapping, **Cartography and Geographic Information Systems**, 18:1, 69-77. 1991.

CHEREM, L.F.S.; VARAJÃO, C.A.C.; MAGALHÃES JUNIOR, A.P.; VARAJÃO, A.F.D.C.; SALGADO, A.A.R.; OLIVEIRA, L. A.F.; BERTOLINI, W.Z. O papel das capturas fluviais na morfodinâmica das bordas interplanálticas do sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**. v.14. n.4. 2013.

CORDEIRO, C. M. **Evolução da rede de drenagem na Bacia do Alto Rio Paraguaçú:** capturas fluviais, drenagem transversa e pirataria de bacias. 2019. 183f. Tese (Doutorado em Geografia) - Universidade Federal de Minas Gerais. Minas Gerais, 2019.

COUTO, E. V. do. **Evolução denudacional de longo prazo e a relação solo-relevo no noroeste do Paraná**. 2015. 112f. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

COUTO, E. V. do.; SANTOS, L.J.C. dos.; SORDI, M.V. dos.; BOURLÈS, D.; BRAUCHER, R.; SALGADO, A.A.R.; LÉANNI, L.; FERREIRA, J.H.D. Changes of the base levels in the Ivaí and Paraná Rivers confluence zone (Southern Brazil): Denudational reflexes in the evolution of the upstream drainage network**. ZEITSCHRIFT FUR GEOMORPHOLOGIE**, v. 62, p. 23-40, 2018.

CREPANI, E.; MEDEIROS, J. S. de**. Imagens fotográficas derivadas de mnt do projeto srtm para fotointerpretação na geologia, geomorfologia e pedologia.** São José dos Campos: INPE, 2004. 40p.

FAN, N.; CHU, Z.; JIANG, L.; HASSAN, M.A.; LAMB, M.P.; LIU, X. (2018), Abrupt drainage basin reorganization following a Pleistocene river capture: **Nature Communications**, v. 9, no. 1, no. 3756, https://doi.org/10.1038 /s41467-018-06238-6

FELIPPE, M. F.; RODRIGUES, B. H. M.; MAGALHÃES JUNIOR, A.P. Uso de técnicas de sensoriamento remoto na análise da dinâmica morfológica da foz do rio São Francisco no período de 1979 a 2008. SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14, 2009, Natal. **Anais...** Natal: INPE. 2009. p.3737-3744.

FERNANDES, L.A. **A cobertura cretácea suprabasáltica no Paraná e Pontal do Paranapanema (SP):** os grupos Bauru e Caiuá. 1992. 129f. Dissertação (Mestrado em Geologia) IGc/USP. São Paulo, 1992.

FERNANDES, L. A. **Mapa litoestratigráfico da parte oriental da Bacia Bauru (PR, SP, MG), escala 1: 1.000. 000.** Boletim Paranaense de Geociências, 55. 2004.

FERNANDES, L.A. **Estratigrafia e evolução geológica da parte oriental da Bacia Bauru (Ks, Brusil).** 1998. 216f. Tese (Doutorado em Geologia) Inst. de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

FORTE, A.M., WHIPPLE K.X., Criteria and Tools for Determining Drainage Divide Stability, **Earth and Planetary Science Letters**, v. 493, p.102-117. 2018.

FUJITA, R. H**. O perfil longitudinal do rio Ivaí e sua relação com a dinâmica de fluxos**. 2009. 118f. Dissertação (Mestrado em Geografia) Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2009.

FUMIYA, M. H. **Gênese dos Ferricretes e sua Relação com Transformações da Paisagem no Noroeste do Paraná.** Tese (doutorado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra. Curitiba, 2017.

FUMIYA, M. H.; SANTOS, L.J.C dos.; MANGUEIRA, C.G.; COUTO, E.V. do. Emprego do Índice de Concentração da Rugosidade para identificação de feições morfológicas associadas as crostas ferruginosas no Noroeste do Paraná. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.17, n°3, p.465-480, 2016.

GEIGER, R. **Influências das formas do relevo no microclima**. In: _____ Manual de microclimatologia: o clima da camada de ar junto ao solo. Lisboa: Fundação Caloust Gulbenkian, 1980. p. 382-474.

GILBERT, G. K. The geology of the Henry Mountains. Washington, United States Geographical and Geological Survey, 1877.

GOULART, A. Á; **Taxas de denudação e ferramentas morfométricas aplicadas na análise da evolução de longo termo do relevo do sul da bacia sedimentar Bauru.** 125p. (Tese)doutorado. Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra. Curitiba, 2020.

GOULART, A. Á.; de OLIVEIRA, J. G.; SANTOS, L. J. C. Utilização do Índice de Concentração de Rugosidade para Identificação de Feições Erosivas na Região Noroeste do Estado do Paraná. In: **Anais do XII Simpósio Nacional de Geomorfologia (SINAGEO)**, UGB. Crato/CE. 2018.

GROHMANN, C. H.; RICCOMINI, C.; STEINER, S. dos. S. Aplicações dos modelos de elevação SRTM em geomorfologia. Goiás: UFG. **Revista geográfica acadêmica.** v.2. n.2. p.73-83. 2008.

HACKNEY, C. CLAYTON, A. (2015) 2.1.7**. Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) and their application in geomorphic mapping.** In, Clarke, Lucy and Nield, Joanna M. (eds.) *Geomorphological Techniques.* London, GB. British Society for Geomorphology. 2015.

HUGENHOLTZ, C. H. WHITEHEAD, K. BROW, O.W. BARCHYN, T.E. MOORMAN, B.J. LECLAIR, A. HAMILTON, T. (2013). Geomorphological mapping with a small unmanned aircraft system (sUAS): Feature detection and accuracy assessment of a photogrammetrically-derived digital terrain model. **Geomorphology** , 194 , 16–24. 2013.

ITCG. **Mapa de clima**. 2008. http://www.itcg.pr.gov.br/modules/conteudo.php?conteudo=47. Acesso em 22 de junho de 2019.

JAMES, M.R. ROBSON, S. SMITH, M.W. 2017. 3-D uncertainty-based topographic change detection with structure-from-motion photogrammetry: precision maps for ground control and directly georeferenced surveys. **Earth Surface Processes and Landforms** 42: 1769–1788. 2017.

JORAYEV, G. WEHR, K.; BENITO-CALVO, A.; NJAU, J.; TORRE, I. de la. (2016). Imaging and photogrammetry models of Olduvai Gorge (Tanzania) by Unmanned Aerial Vehicles: A high-resolution digital database for research and conservation of Early Stone Age sites. **Journal of Archaeological Science**, 75 (2016), p. 40-56.

KHAN, S. FRYIRS, K. A. (2020) Application of globally available, coarse resolution Digital Elevation Models for delineating valley bottom segments of varying length across a catchment. ***Earth Surf. Process. Landforms*****,** vol. 1. 2020.

LAGUE, D. BRODU, N. LEROUX, J. (2013). Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner: Application to the Rangitikei canyon (N-Z). ISPRS **Journal of Photogrammetry and Remote Sensing** 82: 10–26. 2013.

LAVARINI, C.; MAGALHÃES JUNIOR, A.P.; OLIVEIRA, F.S. de.; CARVALHO, A. de. **Neotectonics, river capture and landscape evolution in the highlands of se brazil.** Mercator - Revista de Geografia Universidade Federal do Ceará Fortaleza, Brasil. v. 15, n. 4. 2016, p. 95 -119.

MAACK, R. **As consequências da devastação das matas no estado do Paraná.** Arq. Biol. Tecnol.,1953. p.437-457.

MAACK, R. **Geografia física do Estado do Paraná**. 4. ed. Ponta Grossa: Imprensa UEPG, 2012.

MACHADO, L. E. G.; NUNES, E.D.; ROMÃO, P. de A. **Análise da influência da topografia na variação sazonal de fitofisionomias na bacia do Rio Veríssimo – GO**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 25-30, abril 2009. Natal. Anais do XIV Simpósio Brasileiro De Sensoriamento Remoto, Natal, INPE, 2009. p. 2817-2822.

MAGALHÃES, C.; GEOFFROY, L.; SALGADO A. A. Identificação de relevantes capturas fluviais nos divisores de grandes bacias hidrográficas no estado de Minas Gerais: estudos preliminares. SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, 17, 2017, Campinas. **Anais...** Campinas, 2017. p. 6424-6428.

MAGALHÃES JÚNIOR, A.P. **O Parâmetro de Turbidez das Águas como Indicador de Impactos Humanos na Dinâmica Fluvial da Bacia do Rio Maracujá – Quadrilátero Ferrífero/MG**. In: Simpósio Brasileiro De Geografia Física Aplicada, 13, Viçosa/MG, 2009. Anais. Viçosa: UFV, p. 94-95.

MAGALHÃES JUNIOR, A.P.; BARROS, L.F. de P. **Hidrogeomorfologia:** formas, processos e registros sedimentares fluviais. 1 ed. Rio de Janeiro, Bertrand Brasil, 2020.

MANGUEIRA, C.G.; GOUDARD, G; SANTOS, L.J.C. Evolução de processos erosivos e a erosividade das chuvas no Noroeste do Paraná. In: Simpósio Nacional de Geomorfologia – SINAGEO, 11, 2016, Maringá. **Anais**. Maringá, 2016.10p.

MENDES, C. GOMES, A.A. SALGADO, A.A.R. CARVALHO, V. **Pirataria fluvial na alta bacia do rio Paraguaçu, chapada diamantina , Bahia, Brasil.** Publicações da associação Portuguesa de Geomorfólogos. v 11. Guimarães, 2019. p.73-76.

MENDONÇA, F. de A. **O clima e o planejamento urbano de cidades de porte médio e pequeno: proposição metodológica para o estudo e sua aplicação à cidade de Londrina/ PR.** 1995. 381 f. Tese (Doutorado em Geografia) - USP-SP, São Paulo. 1995. Acesso em: 22 de junho de 2020.

MILANI, E. J. MELO, J.H.G de. SOUZA, P.A de. FERNANDES, L.A. FRANÇA, A.B. (2007). **Bacia do Paraná.** Boletim de Geociências da Petrobrás, Rio de Janeiro, v. 15, n.2, p. 265-287. 2007.

MILLER, A. M. **Wind Gaps**. Science. Vol. XLII, nº 1.086, p. 571-573. 1915.

NAKASHIMA, P. **Sistema Pedológico da região Noroeste do Estado do Paraná: Distribuição e subsídio para o controle da erosão**. 2000. 162f. Tese (Doutorado em Geografia), Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

NASCIMENTO, P. S. R; GARCIA, G. J. Compartimentação fisiográfica para análise ambiental do potencial erosivo a partir das propriedades da rede de drenagem**. Engenharia Agrícola**, v. 25, n.1, p.231-241, 2005.

NASCIMENTO, F.A.; GOMES, A.A.T.; SALGADO, A.A.R.; TAVARES JUNIOR, S. S. **Evidências de rearranjo de drenagem na bacia do alto rio branco, Amazônia.** Publicações da Associação Portuguesa de Geomorfólogos. v.11. Guimarães, 2019. p.83-86.

NOWATZKI, A. **Mapeamento pedológico preditivo por diferentes métodos de integrações de atributos topográficos: aplicações no baixo curso da bacia hidrográfica do Rio Ivai-noroeste do estado do paraná.** Tese (doutorado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra. Curitiba, 2017.

PAPARODITIS, N.; POLIDORI, L. **DSM quality: internal and external validation.** In: EGELS, Y.; KASSER, M. Digital Photogrammetry. 1. ed. New York: Taylor & Francis, p.351. 2002.

PASSOS, M. M dos. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, 13, 2009, Viçosa. **Anais...** Viçosa: UFV, 2009. p. 1-20 p. Disponível em: http://www.geomorfologia.ufv.br/simposio/simposio/trabalhos/trabalhos_completos/eixo8/048.pdf. Acesso em: 28 abr. 2020.

PATUCCI, N.N.; **Indicadores paleoambientais para avaliação de capturas fluviais em meio tropical úmido.** 2019. Tese (Doutorado em Geografia) - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas na Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

PERRON, J.T. ROYDEN, L. An integral approach to bedrock river profile analysis **Earth Surf. Process. Landforms**, V. 38, pp. 570-576. 2013.

PHILLIPS, J. D., MCCORMACK, S. DUAN, J. RUSSO, R.P. SCHUMACHER, A.M. TRIPATHI, G.N. BROCKMAN, R.B. MAYS, A.B. PULUGURTHA,S. Origin and interpretation of knickpoints in the Big South Fork River Basin, Kentucky-Tennessee, **Geomorphology**, vol. 114, no. 3, pp. 188-198. 2010.

PIKE, R.J., (2000). Geomorphometry — diversity in quantitative surface analysis. Progress in Physical Geography 24 (1), 1–20.

SALGADO, A. R. R.; CHEREM, L. F. S.; SORDI, M. V. Grandes capturas fluviais no Brasil: síntese das novas descobertas. **Estudos do Quaternário**, 19, APEQ, Braga, pp. 23-31, 2018.

SANTOS, A. H. B. dos S. **Rearranjos de drenagem na bacia do rio Capivari e morfogênese da serra do mar em São Paulo (SP):** uma contribuição ao estudo de capturas fluviais em meio tropical úmido. 2017. 376f. Tese (Doutorado em Geografia) - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas na Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

SANTOS, L. J. C. OKA-FIORI, C. CANALI, N.E. FIORI, A.P. SILVEIRA, C.T. SILVA, J.M.F da. ROSS, J.L.S. Mapeamento Geomorfológico do Estado do Paraná. **Revista Brasileira de Geomorfologia.** v. 7, n. 2. p. 03-11. 2006.

SCHWANGHART, W., SCHERLER, D., 2014. TopoToolbox 2 – MATLAB-based software for topographic analysis and modeling in Earth surface sciences. **Earth Surface. Dynamic.** 2, 1–7. 2014.

SILVEIRA, P. B.; LUPINACCI, C.M. Análise da morfometria do relevo da bacia do rio cabeça (SP). 2017. In: Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada, 17, 2017, Campinas. **Anais...** Campinas, 2017, p.6509- 6513.

SILVERMAN, B. W. (1986). **Density Estimation for Statistics and Data Analysis.** Chapman & Hall, London.

SMALL, R.J. **The study of lanforms.** Cambridge: Cambridge University Press, 486p. 1977.

SMITH, M.; PAIN, C. Applications of remote sensing in geomorphology. Progress in Physical Geography, v. 33, n. 4, p. 568-582, 2009.

SOFIA, G. Combining geomorphometry, feature extraction techniques and Earth-surface processes research: The way forward. **Geomorphology**. v355. 2020. p. 1-33.

SORDI, M. V de. SALGADO, A.A.R.; SIAME, L.; BOURLÈS, D.; PAISANI, J.C.; LÉANNI, L.; BRAUCHER, R.; COUTO, E. V. de. Implications of drainage rearrangement for passive margin escarpment evolution in southern Brazil. **Geomorphology,** v. 306, p. 155-169, 2018.

STOKES, M.F.; GOLDBERG, J.; PERRON, T. **Captura contínua de rios na Amazônia.** 2018. v.45. ed. 11. American Geophysical Union. p.24.

TELBISZ, T.; KOVÁCS, G.; SZÉKELY, B.; SZABÓ, J. (2013). Topographic swath profile analysis: a generalization and sensitivity evaluation of a digital terrain analysis tool. **Zeitschrift für Geomorphologie**, 57: 485-513. 2013.

THORNBURY, W. D. 1954. **Principles of Geomorphology.** New York, John Wiley & Sons, Inc., 618p.

VALERIANO, M. M. **Topodata:** guia para utilização de dados geomorfológicos locais. São José dos Campos: INPE, 2008.

VELOSO, H. P.; GÓES-FILHO, L. **Fitogeografia brasileira - classificação fisionômico-ecológica da vegetação neotropical.** Boletim Técnico do Projeto RADAMBRASIL, Série Vegetação, v.1, n.1, 1982.

WILLETT, S.D; MCCOY, S.W.; PERRON, J.T; GOREN,L; CHEN, C;.**Dynamic Reorganization of River Basins.** Science 343. DOI: 10.1126/SCIENCE.1248765. 2014.

WHIPPLE,K.X.; DIBIASE, R.A.; FORTE, A.M.; (2017) .Preservation or piracy: diagnosing low-relief, high-elevation surface formation mechanisms.
Geology.45,9194.https://doi.org/10.1130/G38490.1.

WOBUS, C.; WHIPPLE, K.X.; KIRBY, E.; SNYDER, N.; JOHSON, J.; SPYROPOLOU, K.; CROSBY, B.; SHEEHAN, D. **Tectonics from topography: procedures, promise, and pitfalls,** GSA Special Papers, 398, 55–74, 2006.

ZANI, H.; ASSINE, M.L. Paleocanais no megaleque do rio Taquari: mapeamento e significado geomorfológico. **Revista Brasileira de Geociências**, Curitiba, v.41, p. 37-43, 2011.

ZANI, H.; ASSINE, M.L; SILVA, A; CORRADINI, F.A; KUERTEN, S.; GRADELLA. F dos Santos. Geoformas deposicionais e feições erosivas no pantanal mato-grossense identificadas por sensoriamento remoto. **Revista Geografia,** Rio Claro, v.34, p.643-654, 2009.