



Rodrigo Wagner Paixão Pinto

**Morfogênese do Sistema Fluvial do Rift
Continental Sudeste do Brasil: Endorreísmo
e Captura Fluvial**

Tese de Doutorado

Tese apresentada ao Programa de Pós Graduação em
Geografia da PUC-Rio como requisito parcial para
obtenção do grau de Doutor em Geografia.

Orientador: Prof. Marcelo Motta de Freitas

Co-Orientador: Prof. André Augusto Rodrigues Salgado

Rio de Janeiro
Abril de 2020



Rodrigo Wagner Paixão Pinto

**Morfogênese do Sistema Fluvial do Rift
Continental Sudeste do Brasil: Endorreísmo
e Captura Fluvial**

Tese apresentada como requisito parcial para
obtenção do grau doutor pelo Programa de Pós-
graduação em Geografia da PUC-Rio. Submetida à
avaliação da comissão examinadora abaixo.

Prof. Marcelo Motta de Freitas

Orientador

Departamento de Geografia e Meio Ambiente – PUC-Rio

Prof. André Augusto Rodrigues Salgado

Co-orientador

Departamento de Geografia – UFMG

Prof. Sérgio Cadena de Vasconcelos

Departamento de Geografia e Meio Ambiente – PUC-Rio

Prof^a. Telma Mendes da Silva

Departamento de Geografia – UFRJ

Prof. Miguel Antônio Tupinambá Araújo Souza

Faculdade de Geologia – UERJ

Prof. Julio Cesar Horta de Almeida

Faculdade de Geologia – UERJ

Rio de Janeiro, 06 de abril de 2020

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Rodrigo Wagner Paixão Pinto

Graduou-se em Geografia pela PUC-Rio (Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro) em 2011. Obteve o título de Mestre em Geografia pela PUC-Rio em 2015. Desenvolveu pesquisas relacionadas à Geografia Física, Geomorfologia e Geociências. Participa do grupo de pesquisa MorfoTEKTOS desenvolvendo projetos de pesquisa de análise da evolução do relevo, processos erosivos e sistemas fluviais. Auxiliou no mapeamento dos deslizamentos de encostas ocorridos na Região Serrana do Rio de Janeiro em 2011. Atuou no diagnóstico do Meio Físico de empreendimentos lineares na região Sudeste, Norte e Centro-Oeste do Brasil. Atualmente é Professor Agregado 2 do Departamento de Geografia da PUC-Rio.

Ficha Catalográfica

Pinto, Rodrigo Wagner Paixão

Morfogênese do sistema fluvial do Rift Continental Sudeste do Brasil : endorreísmo e captura fluvial / Rodrigo Wagner Paixão Pinto ; orientador: Marcelo Motta de Freitas ; co-orientador: André Augusto Rodrigues Salgado. – 2020.

207 f. : il. color. ; 30 cm

Tese (doutorado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Geografia e Meio Ambiente, 2020.

Inclui bibliografia

1. Geografia e Meio Ambiente - Teses. 2. Morfogênese. 3. Rio Paraíba do Sul. 4. Bacias hidrográficas endorréicas. 5. Captura fluvial. I. Freitas, Marcelo Motta de. II. Salgado, André Augusto Rodrigues. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Geografia e Meio Ambiente. IV. Título.

CDD: 910

Agradecimentos

À Deus por sempre manter iluminados os caminhos da minha vida.

À minha esposa, companheira, conselheira, incentivadora e amiga Simone Monteiro, obrigado pelo carinho e atenção ao longo destes 15 anos de convívio, principalmente, pela paciência e por sempre me incentivar e acreditar em mim.

A meus pais, Maria da Graça Paixão Pinto e Marcos Antônio Moraes pelo carinho, atenção e apoio ao longo da minha vida e, principalmente, por acreditarem em mim. Ao meu irmão, Dyego Paixão pelos anos de convivência e pelos momentos de diversão.

Ao meu orientador, professor, amigo, Marcelo Motta de Freitas por me incentivar desde os áureos tempos da graduação na iniciação científica até o doutorado, me iniciando na ciência geomorfológica e por compartilhar todo conhecimento sobre o planalto sudeste comigo nesta tese.

Ao Professor André Salgado, co-orientador da pesquisa, pelo incentivo, apoio e orientação no entendimento da morfogênese do relevo e pela atenção e cuidado na evolução da pesquisa.

Aos professores Julio Cesar Horta de Almeida, Luiz Guilherme Eirado Silva e Miguel Tupinambá pelos ensinamentos na identificação e caracterização do relevo e conselhos sobre a evolução geológica - geomorfológica do Planalto Sudeste brasileiro.

À todos os funcionários e professores do departamento de Geografia da PUC-RIO pelos ensinamentos e pela contribuição na minha formação profissional e pessoal ao longo destes anos.

Aos integrantes do grupo de pesquisa MorfoTEKTOS pelas reuniões e debates sobre a evolução da paisagem geomorfológica e pelas observações e debates em campo que contribuíram muito para a minha análise da paisagem.

Aos pesquisadores e integrantes do Grupo de Pesquisa TEKTOS da Faculdade de Geologia da UERJ e a todos os companheiros do Departamento de Geologia Regional e Geotectônica, do qual tenho muito orgulho em fazer parte, mesmo que por pouco tempo.

Ao meu avô Antônio da Conceição Paixão, que sempre foi uma referência na minha vida. A todos os meus familiares pela oportunidade de convivência e pelo incansável apoio. Ao meu eterno pai, Roberto Wagner Freitas Pinto, que tenho certeza que está sempre ao meu lado e junto comigo em mais uma caminhada. *In memoriam.*

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Resumo

Pinto, Rodrigo Wagner Paixão; Freitas, Marcelo Motta. **Morfogênese do Sistema Fluvial no Rift Continental Sudeste do Brasil: Endorreísmo e Captura Fluvial**. Rio de Janeiro, 2020. 207p. Tese de Doutorado – Departamento de Geografia e Meio Ambiente, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O objetivo geral da presente Tese é analisar a morfogênese do sistema de drenagem do rio Paraíba do Sul e reconhecer os processos envolvidos na sua evolução. Para tanto, foram utilizados os seguintes procedimentos metodológicos: (i) revisão bibliográfica sobre a temática; (ii) construção de um banco de dados temáticos georreferenciados; (iii) análise morfológica e morfométricas dos sistemas de drenagem e do relevo; (iv) processamento de dados em ambiente SIG e análise dos resultados. Ao analisar a morfologia dos sistemas de drenagem na bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul foram identificadas zonas de convergência de drenagem ao longo da calha principal do rio, estando associadas aos grábens originados pelo tectonismo cenozoico que atingiu o planalto sudeste, sendo eles: Taubaté, Resende, Volta Redonda, Três Rios e Itaocara. Além disso, percebeu-se a ocorrência de gorges (gargantas) próximos às zonas de convergência de drenagem, o que sugere a formação de paleodivisores ao longo da bacia. Foram extraídos perfis normalizados de afluentes de drenagem que indicam que rios distantes da foz do rio Paraíba do Sul apresentam índices de concavidades elevados, indicando maior ajuste ao nível de base. Os mapas Seppômen indicam a formação de depressões topográficas ao longo do Planalto Sudeste, situados nos grábens e nas zonas de convergência de drenagem. A análise de perfis topográficos ao longo do divisor da Mantiqueira indica maior dissecação na porção nordeste e menor dissecação na porção sul, esta característica é corroborada pelos valores de chi (χ) que indicam um divisor mais próximo do equilíbrio na porção norte enquanto o divisor na porção sul está submetido à processos de migração e recuo. Com a análise dos resultados, pode-se dizer que o sistema fluvial da Bacia Hidrográfica do rio Paraíba do Sul possui uma complexa história evolutiva, herdada pela interação de esforços tectônicos e processos geomorfológicos sobre o relevo. Sua paleodrenagem era formada por sistemas fluviais endorreicos que convergiam na direção das depressões do relevo formadas com a consolidação do Rift Continental do Sudeste

do Brasil. Esta afirmação é comprovada por três evidências: (i) a ocorrência de drenagens inversas ao canal principal do rio Paraíba do Sul; (ii) Perfis de drenagens muito ajustados ao nível de base distantes da foz; (iii) a formação de zonas topográficas deprimidas interrompidas por elevações observados no mapa Seppômen. A evolução do sistema de drenagem da área de estudo se deu por meio de erosão remontante a partir de capturas fluviais sobre o planalto sudeste brasileiro. Estes mecanismos de erosão remontante e capturas fluviais dissecaram os paleodivisores e criaram vagas erosivas que incorporaram, uma a uma, os sistemas fluviais endorreicos do RCSB ao Oceano Atlântico. O sistema de capturas e o pulso erosivo do rio Paraíba do Sul atingiu o divisor da Serra da Mantiqueira inicialmente a norte, através do rio Pomba, e avançou sobre o planalto sudeste incorporando sistemas de drenagem endorréicos por meio de capturas de drenagem até configurar o sistema de drenagem atual.

Palavras-chave

Morfogênese; rio Paraíba do Sul; Bacias Hidrográficas Endorréicas; Captura Fluvial.

Abstract

Pinto, Rodrigo Wagner Paixão; Freitas, Marcelo Motta. **Morphogenesis of the Fluvial System of Southeastern Brazil Continental Rift: Endorheism and River Capture.** Rio de Janeiro, 2020. 207p. Tese de Doutorado – Departamento de Geografia e Meio Ambiente, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The main objective of this Thesis is to analyze the morphogenesis of the Paraíba do Sul River drainage system and to recognize the processes involved in its evolution. For that, the following methodological procedures were used: (i) bibliographic review about the theme; (ii) construction of a georeferenced thematic database; (iii) morphological and morphometric analysis of drainage and relief systems; (iv) data processing in a GIS environment and analysis of results. Analyzing the morphology of the drainage systems in the Paraíba do Sul river basin, drainage convergence zones were identified along the main river channel, being associated with the grays originated by the cenozoic tectonism that reached the southeast plateau, being: Taubaté, Resende, Volta Redonda, Três Rios and Itaocara. The occurrence of gorges (gorges) near the drainage convergence zones was noticed, which suggests the formation of paleodividers along the basin. Standardized profiles of drainage tributaries were extracted, indicating that rivers distant from the mouth of the Paraíba do Sul River have high concavity indexes, indicating greater adjustment at the base level. Seppômen maps indicate the formation of topographic depressions along the Southeast Plateau, located on the slopes and in the drainage convergence zones. These depressions occur at the Cenozoic grabens along the southeast plateau. Analysis of topographic profiles along the divider of Mantiqueira indicates greater dissection in the northeast portion and lesser dissection in the southern portion, this characteristic is corroborated by the chi (χ) values that indicate a divider closer to balance in the northern portion while the divider in the southern portion is submitted to migration and retreat processes. With the analysis of the results, it can be said that the river system of the Paraíba do Sul River Basin has a complex evolutionary history, inherited by the interaction of tectonic efforts and geomorphological processes on the relief. Its

paleodrainage was formed by endorheic river systems that converged in the direction of the relief depressions formed with the consolidation of the Continental Rift of Southeast Brazil. This statement is supported by three evidences: (i) occurrence of reverse drains to the main channel of the Paraíba do Sul River; (ii) Drainage profiles very adjusted to the base level far from the mouth; (iii) formation of depressed topographic zones interrupted by elevations observed in the Seppômen map. The evolution of the drainage system in the study area was achieved through eroding erosion from river catches over the southeastern Brazilian plateau. Mechanisms of remounting erosion and river catches dissected the paleodividers and created erosive waves that incorporated, one by one, the RCSB's endorheic river systems into the Atlantic Ocean. The capture system and the erosive pulse of the Paraíba do Sul River reached the Serra da Mantiqueira divider initially to the north, through the Pomba River, and advanced over the southeast plateau incorporating endorheic drainage systems by means of drainage catches until the system was configured. current drainage.

Keywords

Morphogenesis; Paraíba do Sul River; Endorheic Basins; River Capture.

Sumário

Introdução	19
Objetivos gerais e específicos.....	21
1. A Área de Estudo	23
1.1. Localização	23
1.2. Contexto Geológico Regional.....	24
1.2.1. Evolução Geotectônica.....	24
1.2.2. Caracterização do Sistema de Riftes Continentais do Sudeste do Brasil	27
1.3. Contexto Geomorfológico Regional.....	37
1.4. Contexto Climático Regional	46
1.5. Características Pedológicas e Vegetacionais.....	49
2. Rearranjos de drenagem e captura fluvial.....	51
2.1. Processos Evolutivos de Canais de Drenagem.....	52
2.2. Pirataria e Capturas Fluviais	54
2.3. Bacias Endorreicas	60
3. Procedimentos Metodológicos	64
3.2. Compilação e Estruturação de Banco de Dados.....	65
3.1. Revisão Bibliográfica	66
3.3. Análise Hipsométrica e Morfológica do relevo.....	66
3.4. Delimitação da Bacia Hidrográfica e Sub-bacias.....	67
3.5. Análise da Rede de Drenagem e Perfis Longitudinais	67
3.6. <i>NProfile</i>	68
3.7. Paleosuperfície – Mapas Seppômen.....	70
3.8. <i>Swath Profile</i>	72
3.9. Análise χ	73
3.10. Índice RDE	75
3.11. Lineamentos e Orientação de Drenagem.....	77
3.12. Stream Power Index (SPI).....	78
3.13. Morfogênese da BHRPS e compilação dos dados.....	80
4. Resultados e Discussões	81
4.1. Análise Morfológica e morfométricas da BHRPS	81
4.1.1. Convergências de Drenagem.....	81
4.1.2. Análise morfológica dos sistemas de drenagem	85
4.1.2.1. Zona de Convergência Taubaté	89
4.1.2.2. Zona de Convergência de Resende.....	91
4.1.2.3. Zona de Convergência de Volta Redonda.....	93
4.1.2.4. Zona de Convergência de Três Rios.....	95
4.1.2.5. Zona de Convergência de Itaocara	97
4.1.3. <i>NProfile</i>	100
4.1.4. Análise dos Mapas Seppômen.....	108
4.1.5. <i>Swath Profiles</i>	116
4.1.6. Fator Chi (χ)	120

4.2. Análise Divisor Paraná / Paraíba do Sul: O caso da Sub-bacia do Rio Paraíbuna	123
4.2.1. Perfis Topográficos e Longitudinais	124
4.2.2. Índice RDE e Densidade de <i>Knickpoints</i>	128
4.2.3. Lineamentos Estruturais e Orientação da Rede de Drenagem	130
4.2.4. Stream Power Index (SPI)	132
4.2.5. Mecanismos de Capturas Fluviais no Divisor Paraná / Paraíba do Sul	134
4.3. Paleodrenagem do Rio Paraíba do Sul	139
4.3.1. Do Endorreísmo ao Exorreísmo ou Morfogênese do sistema hidrográfico do Rio Paraíba do Sul	140
5. Considerações Finais	150
6. Referências Bibliográficas	153
Apêndices	167

Lista de Figuras

Figura 1.01: Localização e Modelo de Elevação do Terreno da Bacia Hidrográfica do rio Paraíba do Sul.....	23
Figura 1.02: Contexto geológico regional da bacia do Rio Paraíba do Sul, com destaque às unidades da Província Mantiqueira e Faixa Móvel Ribeira (modificado de Heilbron <i>et al.</i> , 2004). Legenda: 1 - Bacias sedimentares fanerozoicas; 2 - Plutons alcalinos do Neocretáceo e Paleógeno; Faixa Brasília Meridional: 3 - Nappe Guaxupé; 4 - Nappe de Passos, Sistema de Nappes Andrelândia; CSF - Cráton do São Francisco: 5 - Embasamento arqueano e paleoproterozoico; 6 - Cobertura/Grupo Bambuí; 7 - Sequências metassedimentares autóctones e para-autóctones; Faixa Ribeira: TOC - Terreno Ocidental: 8 - Domínio Inferior (Andrelândia); 9 - Domínio Superior (Juiz de Fora); TPS - Terreno Paraíba do Sul: 10 – Domínio Socorro; 11 - Domínio Apiaí; 12 - Domínio Embu; 13 - Domínio Paraíba do Sul; 14 - Domínio Cambuci; TOR - Terreno Oriental: 15 - Arco Magmático Rio Negro; 16 - Domínio Costeiro; 17 - Domínio Italva; 18 - TCF – Terreno Cabo Frio. CTB - Limite Tectônico Central (sutura da Faixa Ribeira).	27
Figura 1.03: Estruturação do relevo em perfil esquemático, com ênfase para as escarpas serranas ao longo dos blocos falhados e dos hemi-grabens formados entre as escarpas	28
Figura 1.04: Evolução estrutural do RCSB. Fonte: Riccomini et al. (2010). (a) Movimento distensivo de direção NNW-SSE durante o Eoceno-Oligoceno. (b) Transcorrência sinistral, seguida de compressão NE-SW e distensão NW-SE durante o Mioceno Inferior. (c) Transcorrência dextral, compressão NW-SE e consolidação do Alto Estrutural de Queluz durante o Plioceno e Pleistoceno tardio. (d) Distensão E-W a WNW-ESSE, consolidação do Alto Estrutural de Arujá durante o Pleistoceno tardio – Holoceno.....	29
Figura 1.05: Mapa topográfico do Sudeste do Brasil com o arcabouço estrutural do Sistema de Riftes Continentais do Sudeste. Riftes ao longo do rio Paraíba do Sul: (1) São Paulo, (2) Taubaté, (3) Queluz, (4) Resende - Volta Redonda, (5) Baixo Paraíba do Sul	31
Figura 1.06: Localização do Gráben de Taubaté	31
Figura 1.07: Coluna estratigráfica do gráben de Taubaté	32
Figura 1.08: Localização do Gráben de Resende e Volta Redonda.....	33

Figura 1.09: Coluna estratigráfica da bacia de Resende.....	34
Figura 1.10: Processo de voçorocamento no graben Resende.....	35
Figura 1.11: Localização e contexto geomofológico e estrutural do gráben de Três Rios. Apesar da ausência de registro de depósitos sedimentares Paleógenos e Neógenos, a região está inserido no Rifte do Baixo Paraíba do Sul (ZALAN & OLIVEIRA, 2005).....	36
Figura 1.12: Localização e contextualização geomorfológica e estrutural do gráben de Itaocara. Este gragen foi delimitado pelo mapeamento de falhas e estruturas no formato rômbo por Tupinambá <i>et al.</i> (2003).....	37
Figura 1.13: Altiplano da Serra da Bocaina próximo à nascente do rio Paraíba do Sul.....	38
Figura 1.14: Feição escarpada típica da Serra da Mantiqueira localizada próximo à localidade de Santa Rita do Ibitipoca..	39
Figura 1.15: Rio Paraíba do Sul próximo à cidade de São Fidélis. Pode-se perceber a morfologia de colinas dissecadas próximas à calha do rio e serras isoladas ao fundo.....	40
Figura 1.16: Terraços fluviais erodidos na bacia do rio Minerva devido ao rebaixamento do nível de base	45
Figura 1.17: Precipitação média mensal na BHRPS no período de 2001 e 2004. Fonte: Marengo & Alves, 2005.	47
Figura 1.18: Variações climáticas ao longo do Cenozoico, com ênfase para o máximo termal do Paleoceno e Eoceno.	48
Figura 2.01: Modelo proposto por Summerfield (1991) para a evolução tectônica em margens passivas. UT = Soerguimento termal; UI = Soerguimento isostático devido a denudação; ST = Subsidência termalmente derivada; SI = Subsidência isostática por acúmulo de sedimentos; r = Rotação da margem em função de SI + UI ; E = Retração do escarpamento oceânico; C = Topografia gerada pelo processo de “rifteamento”.....	54
Figura 2.02: Modelo proposto por Summerfield (1991) para evolução dos sistemas de drenagem em margem passiva	54

Figura 2.03: Modelos de reajuste de drenagem originados por capturas de drenagem desenvolvidos por Bishop (1995). A linha pontilhada indica o divisor de drenagem. (a) indica a decapitação, onde as cabeceiras de um canal mais agressivo pirateiam as da bacia hidrográfica adjacente; (b) ilustra a captura por interceptação, onde a cabeceira de um curso fluvial, graças a erosão remontante, intercepta o canal fluvial adjacente e (c) ilustra o desvio, ou seja, a migração lateral de um canal em direção ao sistema de drenagem adjacente.	57
Figura 2.04: Captura Fluvial do Rio Paraíba, com destaque para o cotovelo de Guararema	59
Figura 2.05: Localização das principais bacias endorréicas do mundo. O destaque cinza representa a área das bacias endorréicas, o destaque preto representa os grandes lagos.....	61
Figura 3.01: Perfil normalizado e parâmetros associados. A: Nascente; B: Foz; CT: concavidade, expressa a respectiva porcentagem do triângulo AOB; Cmax: máximo de concavidade; Lmax: posição da concavidade máxima em relação à cabeceira.....	69
Figura 3.02: Elaboração do mapa Seppômen segundo Motoki et al. (2009). (A) apresenta o modelo de criação de intervalos de grades. (B) representa o resultado do modelo de intervalos de grade	71
Figura 3.03: Modelo de coleta de dados da ferramenta Swath Profile... ..	73
Figura 3.04: Modelo de análise do Fator chi em bacias hidrográficas e grau de estabilização de divisores hidrográficos. (a) ambiente em desequilíbrio com potencial ocorrência de captura fluvial e migração de divisor. (b) ambiente em estágio equilibrado e divisor estacionário. (c) relação entre elevação e área perdida de canais de drenagem. (d) exemplo de migração de divisor.....	74
Figura 3.05: Valores de χ e seu significado.....	75
Figura 3.06: Perfil longitudinal de um rio mostrando o procedimento para o cálculo do índice RDE.	76
Figura 3.07: Modelo de obtenção dos valores de SPI em ambiente GIS.	79
Figura 4.01: Localização das zonas de convergência de drenagem ao longo do rio Paraíba do Sul. 1. Taubaté. 2. Resende. 3. Volta Redonda. 4. Três Rios. 5. Itaocara.....	82

Figura 4.02: Mapeamento das bacias de drenagem afluentes diretas do rio Paraíba do Sul e Rio Preto, no trecho entre Itaocara e Resende	83
Figura 4.03: Perfil esquemático de morfologia dos canais e bacias de drenagem ao longo da calha principal do rio Paraíba do Sul.....	84
Figura 4.04: Bacia Hidrográfica do rio Paraíba do Sul e a localização das zonas concêntricas de drenagem, paleodivisores e gargantas (<i>gorges</i>)	85
Figura 4.05: Perfis Topográficos transversais à calha do rio Paraíba do Sul onde foram identificados estreitamento do vale. As linhas tracejadas nesta imagem indicam os antigos níveis dos paleodivisores da BHRPS. A localização geográfica dos perfis na área de estudo pode ser observada na figura 4.04, representados pelas linhas tracejadas.	88
Figura 4.06: Contexto geomorfológico e localização da Zona de Convergência de Taubaté.	89
Figura 4.07: Perfil topográfico da Zona de Convergência de Taubaté.	90
Figura 4.08: Contexto geomorfológico e localização da Zona de Convergência de Resende.	91
Figura 4.09: Perfil topográfico na Zona de Convergência de Resende. A localização do mesmo poder ser visto na Figura 3	92
Figura 4.10. Contexto geomorfológico e localização da Zona de Convergência de Volta Redonda.....	94
Figura 4.11: Perfil Topográfico na Zona de Convergência de Volta Redonda.....	95
Figura 4.12: Contexto geomorfológico e localização da ZC de Três Rios.	96
Figura 4.13: Perfil topográfico da região da ZC de Três Rios. A localização do perfil pode ser observada na figura anterior.	97
Figura 4.14: Contexto geomorfológico e localização da ZC Itaocara.	99
Figura 4.15: Perfil topográfico no entorno da ZC de Itaocara.....	100
Figura 4.16: Figura de Localização dos rios analisados pela ferramenta NProfile.	101
Figura 4.17: Correlação entre os valores de C_T e a distância da foz dos afluentes do rio Paraíba do Sul.....	103
Figura 4.18: Perfis longitudinais normalizados das drenagens da margem direita do rio Paraíba do Sul.	106

Figura 4.19: Perfis longitudinais normalizados das drenagens da margem esquerda do rio Paraíba do Sul.....	107
Figura 4.20: Mapa Seppômen da BHRPS com célula 5 x 5 km.	109
Figura 4.21: Mapa Seppômen da BHRPS com célula 4 x 4 km.	110
Figura 4.22: Mapa Seppômen da BHRPS com célula 3 x 3 km.	111
Figura 4.23: Mapa Seppômen da BHRPS com célula 2 x 2 km.	112
Figura 4.24: Mapa Seppômen da BHRPS com célula 1 x 1 km	113
Figura 4.25: Perfil longitudinal do rio Paraíba do Sul conjugado ao perfil topográfico entre o Mapa Seppômen com célula de 5km e a topografia atual.	115
Figura 4.26: Localização geográfica dos perfis topográficos traçados ao longo da Serra da Mantiqueira. Perfil A - A' divisor Paraíba do Sul - Doce; Perfis B - B' e C - C' no divisor Paraíba do Sul - Grande.	117
Figura 4.27: <i>Swath Profiles</i> elaborados ao longo da Serra da Mantiqueira. Linha preta indica os valores máximos e linha cinza indica valores mínimos de altitude. Perfil A - A' divisor Paraíba do Sul - Doce; Perfis B - B' e C - C' no divisor Paraíba do Sul - Grande.	118
Figura 4.28: Valores de Chi (χ) ao longo do divisor da Serra da Mantiqueira do rio Paraíba do Sul. A localização destas áreas no contexto da BHRPS pode ser visto na Figura 4.16.	121
Figura 4.29: Localização geográfica e contexto altimétrico do divisor hidrográfico da Serra da Mantiqueira, no estado de Minas Gerais, e as bacias estudadas. 1. Córrego do Teixeira; 2. Córrego Ponte Funda; 3. Rio das Elvas; 4. Ribeirão dos Almeidas; 5. Ribeirão Bandeira; 6. Rio Vermelho; 7. Ribeirão Conceição; 8. Córrego do Salto; 9. Ribeirão Retiro do Meio; 10. Ribeirão Cata Maior; 11. Ribeirão do Váú; 12. Córrego Fundo; 13. Córrego Ponte Funda; 14. Ribeirão Palmital. As bacias ímpares drenam para o interior do continente, enquanto as bacias pares drenam para o RCSB.	124
Figura 4.30: Perfis topográficos elaborados na área de estudo. A localização dos perfis pode ser identificada na Figura 4.29.	126
Figura 4.31: Perfis longitudinais dos rios principais das bacias estudadas. Os perfis da parte esquerda estão associados às bacias que drenagem para o interior, enquanto os perfis da direita drenam para o RCSB.	127

Figura 4.32: Densidade de <i>knickpoints</i> identificados na área de estudo por meio da ferramenta <i>Knickpoint Finder</i> .	129
Figura 4.33: Densidade de lineamentos e roseta de orientação da área de estudo.	131
Figura 4.34: Roseta de Orientação dos canais de 1ª e 2ª ordem na área de estudo.	132
Figura 4.35: Valores de Stream Power Index (SPI) das bacias estudadas. As 7 primeiras bacias da esquerda para direita drenam para o RCSB e as outras 7 drenam para o planalto interiorano. A barra preta indica valores máximos, a barra cinza os valores mínimos e a linha indica os valores médios para cada bacia	133
Figura 4.36: Feições morfológicas de reordenamento dos sistemas de drenagem na borda oeste do RCSB. 1. Córrego do Teixeira; 2. Córrego Ponte Funda; 3. Rio das Elvas; 4. Ribeirão dos Almeidas; 5. Ribeirão Bandeira; 6. Rio Vermelho; 7. Ribeirão Conceição; 8. Córrego do Salto; 9. Ribeirão Retiro do Meio; 10. Ribeirão Cata Maior; 11. Ribeirão do Váú; 12. Córrego Fundo; 13. Córrego Ponte Funda; 14. Ribeirão Palmital.	135
Figura 4.37: Áreas planálticas capturadas pelos rios que drenam para o graben do Paraíba do Sul.	137
Figura 4.38: Mapa Paleotopográfico e com a paleoadrenagem da BHRPS no início da formação do RCSB e formação de bacias endorreicas.	141
Figura 4.39: Mapa Paleotopográfico e com a paleoadrenagem da BHRPS após a formação do RCSB e com a incorporação da bacia endorreica de Itaocara.	142
Figura 4.40: Mapa Paleotopográfico e com a paleoadrenagem da BHRPS após a formação do RCSB e a incorporação da bacia endorreica de Três Rios através do rebaixamento do paleodivisor de Sapucaia.	143
Figura 4.41: Mapa Paleotopográfico e com a paleoadrenagem da BHRPS após a formação do RCSB e a incorporação das bacias endorreicas de Volta Redonda e Resende.	144
Figura 4.42: Mapa Paleotopográfico e com a paleoadrenagem da BHRPS após a formação do RCSB e a incorporação da bacia endorreica de Taubaté pelo rebaixamento do paleodivisor de Queluz.	145
Figura 4.43: Mapa Topográfico e o sistema fluvial da BHRPS atual.	146

Lista de tabelas

Tabela 1: Valores de Índice de Concavidade, Cmax e dL das drenagens afluentes do rio Paraíba do Sul.	102
---	-----

“Let the landscape teach me. ”

Lester C. King, personal letter to Charles Higgins, 1958

Introdução

As características atuais dos sistemas de drenagem são o resultado da evolução geológica e geomorfológica da região nas quais estão inseridas. A morfogênese do relevo têm sido objeto de estudo das investigações geomorfológicas, desde muito tempo, com foco no entendimento dos seus processos erosivos e desnudacionais da superfície terrestre (CALVACHE & VISEIRAS, 1997; BURBANK, 2002). As bacias hidrográficas configuram a unidade de análise mais utilizada, tendo esta como um sistema aberto (CHORLEY, 1962) que possuem entradas (*input*) pelo regime de precipitação, uma funcionalidade interna de acordo com os elementos da paisagem presentes em seu interior e uma saída (*output*) em sua vazão líquida e sólida na foz.

A paisagem geomorfológica atual pode ser compreendida como um cenário constituído a partir de heranças deixadas por processos de interação entre fatores endógenos e exógenos. De fato, as formas da superfície terrestre são resultantes da dinâmica entre fenômenos do interior do planeta, da superfície e da atmosfera, que esculturam o substrato rochoso ao longo do tempo geológico, dando origem ao relevo atual. Diversos conceitos são fundamentais para o entendimento da evolução da paisagem geomorfológica como o conceito de nível de base, recuo remontante da drenagem e capturas fluviais, descritos pelos diversos autores durante a construção do pensamento geomorfológico. Destaca-se nestes processos, a importância das variáveis: litoestruturas, processos e tempo. Logo, podemos considerar que a paisagem geomorfológica atual retrata apenas um momento no seu longo tempo de evolução e está em perpétua evolução. Neste contexto, a análise dos sistemas de drenagem e bacias hidrográficas constitui importante elemento no estudo da evolução geomorfológica da paisagem, uma vez que os rios são um dos principais agentes modeladores da superfície terrestre em ambientes não extremos como glaciais e áridos. A conformação, arranjo e distribuição dos sistemas de drenagem apresentam características intrínsecas do processo de evolução da paisagem de longo termo (BISHOP, 1995; SILVA & SANTOS, 2010; CHEREM *et al.*, 2012). Logo, através do estudo desses sistemas é possível analisar a dinâmica erosiva e denudacional em bacias hidrográficas, bem como identificar processos de migração de divisores e capturas fluviais (SUMMERFIELD, 1991; BURBANK, 2002; BRICALLI, 2016).

Capturas fluviais são fundamentais para a morfogênese dos sistemas de drenagem e do relevo. Em escarpamentos de margem passiva estão muito associadas ao nível de base dos oceanos, pois esses sendo topograficamente muito mais baixos que os continentais situados no reverso da escarpa, promovem input erosivo nas bacias costeiras. Input erosivo está associado ao aumento de energia erosiva dos canais de drenagem de uma bacia pela mudança de nível de base, geralmente, marcado por um rebaixamento deste nível que promove a incisão dos vales e erosão remontante nas cabeceiras. Com isso reordenam os sistemas fluviais como um todo e permitem a migração dos divisores hidrográficos para o interior do continente (SUMMERFIELD, 1991; BISHOP, 1995). Este processo ocorreu ao longo de boa parte da margem passiva do Oceano Atlântico, como no caso dos Appalaches (GALLEN & WEGMANN, 2015), na bacia do rio Douro (STRUTH *et al.*, 2019) e na Namíbia (BIERMANN & CAFFEE, 2001). Nos estudos mencionados, foram identificadas feições de capturas fluviais promovidas por rios que possuem sua foz no Oceano Atlântico sobre bacias endorreicas e rios que drenavam para o interior do continente.

Apesar do processo acima descrito ser fundamental para a evolução geomorfológica da rede de drenagem das margens passivas, na América do Sul, onde o clima tropical úmido é dominante atualmente, ainda são relativamente poucos e, salvo exceções, recentes os estudos que investigaram a importância da pirataria e capturas fluviais para a evolução da rede de drenagem, para a regressão das escarpas e para a morfogênese regional (AB'SABER, 1957; CHEREM *et al.*, 2012; REZENDE *et al.*, 2013; SALGADO *et al.*, 2014, 2016; SORDI *et al.*, 2018). Paralelamente, o tema nessa região é complexo, pois parte dessa margem passiva esteve submetida a proeminentes episódios tectônicos durante o Mesozoico e Cenozoico que acarretaram a formação de um rifte - o Rifte Continental do Sudeste do Brasil (RCSB) - que não progrediu até a sua completa ruptura (HEILBRON *et al.*, 2000; RICCOMINI *et al.*, 2004; RICCOMINI *et al.* 2010, RICCOMINI, 1989; ZÁLAN & OLIVEIRA, 2005). Além disso, sistemas de rifte como esse tendem a formar redes hidrográficas endorreicas e no Sudeste do Brasil, talvez graças ao seu clima tropical úmido, este tema – endorreísmo fluvial – nunca foi profundamente investigado. Deste modo, é notável a ausência de estudos científicos que investiguem a evolução da rede de drenagem da bacia hidrográfica do rio Paraíba

do Sul que está instalada no interior do RCSB e apresenta uma série de anomalias em sua atual configuração.

Objetivos gerais e específicos

O objetivo geral deste trabalho é analisar o sistema de drenagem da Bacia Hidrográfica do rio Paraíba do Sul e discutir episódios de endorreísmo e processos de rearranjo fluvial envolvidos na sua evolução e gênese, posteriormente, à formação do Sistema de Riftes Cenozóicos do Sudeste do Brasil (SRCSB). Além disso, propor a dinâmica de evolução do sistema de drenagem no Planalto Sudeste e reconstituir a paleodrenagem Cenozoica.

Os objetivos específicos da pesquisa incluem:

- Investigar a possibilidade de episódios, no Planalto Sudeste brasileiro, com sistemas de drenagem endorreicos;
- Analisar processos de captura fluvial no Planalto Sudeste no divisor hidrográfico localizado na Serra da Mantiqueira que separa as bacias hidrográficas do Paraná (Rio Grande) com a do Paraíba do Sul (Sub-bacia do Paraíbauna);
- Discutir a correlação da pirataria fluvial e capturas ocorridas no planalto sudeste – bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul - com alterações no nível de base regional e com o pulso erosivo atlântico;
- Reconstituir em linhas gerais a paleogeografia Cenozoica do sistema de drenagem do rio Paraíba do Sul;
- Colaborar na compreensão da morfogênese dos sistemas de drenagem e do relevo em margens do tipo rifte submetidas aos processos de rifteamento continental;

A presente tese está estruturada em 4 capítulos, sendo: O primeiro destinado à caracterização da área de estudo, especificamente, a Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul (BHRPS), desde a sua localização, contexto geológico, geomorfológico e ambiental. Serão apresentados dados existentes e pesquisas já realizadas na área da bacia. O capítulo dois da tese trata da revisão teórico conceitual que embasou a pesquisa, de maneira geral, abordará a evolução do relevo e sistemas de drenagens em margens do tipo rifte, capturas fluviais e bacias endorréicas. O terceiro capítulo consiste na apresentação dos procedimentos metodológicos que foram utilizados para a realização da pesquisa, desde a revisão bibliográfica, assim como, as análises em ambiente SIG. O quarto e último capítulo apresenta os resultados obtidos das análises morfológicas e morfométricas, bem como, a discussão dos mesmos. Neste capítulo, será apresentada a proposta para a morfogênese do sistema fluvial da BHRPS as considerações finais da tese.

1. A Área de Estudo

1.1. Localização

A área de estudo compreende a bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul situada na região Sudeste do Brasil e abrange os estados de São Paulo, Rio de Janeiro e Minas Gerais (Figura 1.01). Abrange 222 municípios entre os três estados mencionados, com destaque para Taubaté, Pindamonhangaba e São José dos Campos no estado de São Paulo; Volta Redonda, Resende, Três Rios e Campos dos Goytacazes no estado do Rio de Janeiro; e Juiz de Fora e Leopoldina no estado de Minas Gerais. A área da bacia é de aproximadamente 61.000 km² e possui um formato alongado de direção SW-NE comprimido pelas Serra da Mantiqueira e Serra do Mar. Dentre os principais afluentes, cabe destacar o rio Muriaé, rio Pomba, rio Paraibuna e rio Preto na margem esquerda, e o rio Grande, Piabanha e Piraí na margem direita.

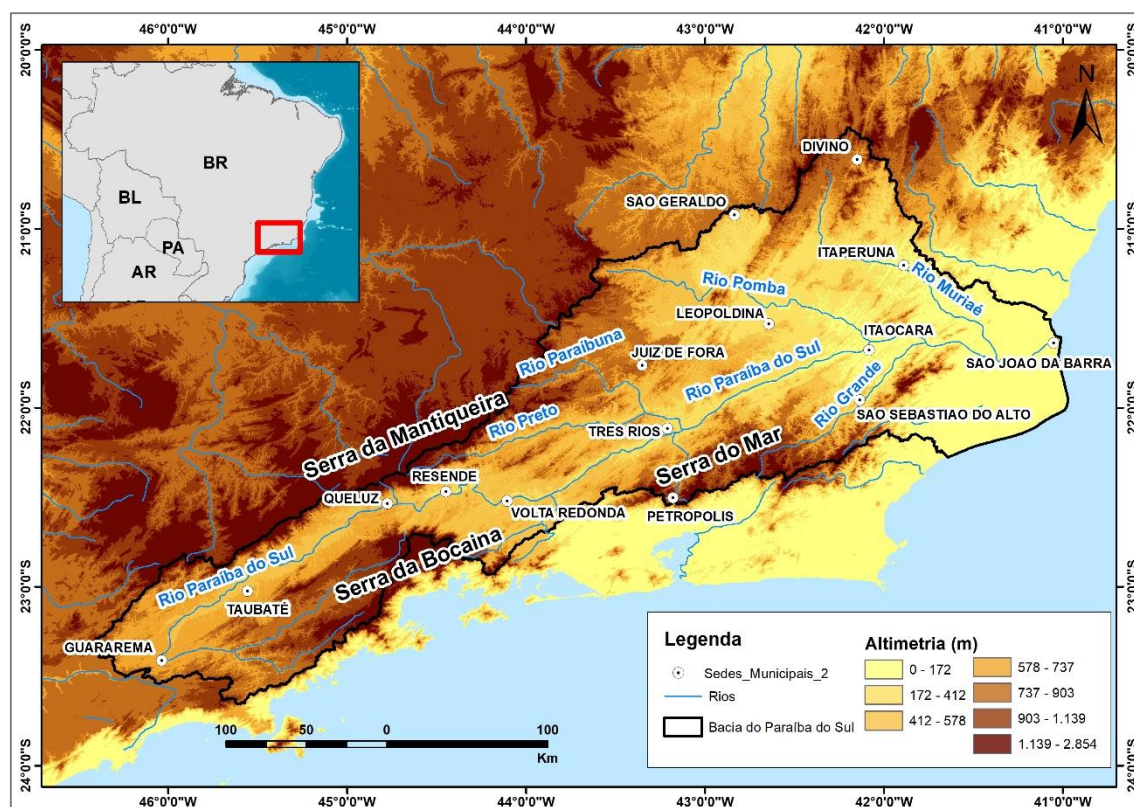


Figura 1.01: Localização e Modelo de Elevação do Terreno da Bacia Hidrográfica do rio Paraíba do Sul.

1.2. Contexto Geológico Regional

1.2.1. Evolução Geotectônica

A Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul (BHRPS), situada na Região Sudeste do Brasil, está geotectonicamente contida na Província Mantiqueira, uma das províncias estruturais definidas por Almeida *et al.* (1981). Representa uma entidade geotectônica com franca orientação nordeste, instalada a leste do Cráton do São Francisco ao final do Neoproterozoico e início do Paleozoico. Constitui juntamente com a Faixa Brasília e a Cunha de Guaxupé, o arcabouço geotectônico do Sudeste Brasileiro (ALMEIDA *et al.*, 1981; ALMEIDA & CARNEIRO, 1998). De fato, o arcabouço geotectônico da Região Sudeste do Brasil é formado por um núcleo estável no Neoproterozoico, designado de Cráton do São Francisco (ALMEIDA *et al.*, 1981), circundado por orógenos instalados no Neoproterozoico durante a Orogênese Brasileira/Pan-Africana, cuja estabilização desempenhou importante papel na aglutinação deste setor do Gondwana. Esses orógenos foram inicialmente designados de Faixa Brasília a oeste, Faixa Ribeira a sul-sudeste e Faixa Araçuaí a leste.

A área de estudo localiza-se na porção interna do cinturão orogênico denominado Faixa Móvel Ribeira. Portanto, a compartimentação tectônica dos terrenos que compõem a área de estudo está vinculada à evolução geológica da “Faixa” Ribeira. Esta evolução orogênica, considerada por Heilbron *et al.* (2000) como a mais nova no cenário das colagens brasileiras/pan-africanas do segmento crustal considerado, foi responsável pela deformação, metamorfismo, magmatismo e articulação dos diversos terrenos.

A evolução tectônica da região Sudeste do Brasil, de maneira geral, ocorreu por eventos distintos, destacando-se: (i) a amalgamação do continente Gondwana; (ii) o metamorfismo/magmatismo Brasileiro e; (iii) eventos tectônicos rúpteis no fanerozoico. O primeiro evento corresponde à colisão de três placas separadas por duas bacias oceânicas há 850 Ma aproximadamente (HEILBRON & MACHADO, 2003). O evento colisional do Brasileiro deu origem a deformações em diferentes períodos de acordo com as fases de metamorfismos, sendo formadas tanto no período sin-colisional como o pós-colisional. Durante o Mesozoico e Cenozoico, a

região sudeste do Brasil é marcada por eventos tectonomagmáticos e períodos de calma, que culminaram na reativação de estruturas brasileiras, ocorrência de magmatismo, movimentos distensivos e transpressivos que soergueram blocos e formaram um sistema de bacias do tipo pull-apart ao longo do vale do rio Paraíba do Sul e do Graben da Guanabara (HEILBRON *et al.*, 2016).

A Faixa Móvel Ribeira, formada no ciclo termotectônico de caráter dúctil do Brasileiro, tem sua gênese associada a um complexo cinturão de dobramentos e empurrões na atual margem do sudeste brasileiro. Estende-se paralelamente ao litoral sudeste brasileiro e é dividida em quatro terrenos tectono-estratigráficos imbricados para NW/W em direção ao Cráton de São Francisco (HEILBRON *et al.*, 2016): (i) Terreno Ocidental; (ii) Terreno Paraíba do Sul; (iii) Terreno Oriental e; (iv) Terreno Cabo Frio (Figura 1.02). Em termos estruturais tal processo colisional leva as unidades litológicas a um alinhamento de orientação NE, oblíquo a direção da colisão.

Após a formação da Faixa Ribeira durante o ciclo Brasileiro, a região sudeste do Brasil passou por um período de estabilidade tectônica entre 440 e 200 Ma, marcado por um ambiente intraplaca, formação de bacias sedimentares interioranas e sinéclises Paleozoicas (HEILBRON *et al.*, 2016). Este período perdurou até o Jurássico, quando esforços tectônicos promoveram o rifteamento e quebra do continente Gondwana, inicialmente na porção sul da Argentina se estendendo para NW até a completa ruptura e separação das placas Sul-americana e Africanas. A completa separação deste continente se deu no Cretáceo há, aproximadamente 104 Ma (HEILBRON *et al.*, 2016). Após a separação, ocorreu magmatismo alcalino na crosta, evidenciado por um enxame de diques identificados ao longo do litoral da região sudeste do Brasil com idades de 80 Ma. Outra atividade de intenso magmatismo ocorreu há aproximadamente 60 Ma, pela intrusão de plutons, plugs e stocks de magma alcalino. Neste mesmo período, ocorreu o soerguimento da Serra do Mar e o basculamento da bacia de Santos e, conseqüentemente, estruturas brasileiras foram reativadas (HEILBRON *et al.*, 2016).

Durante o Cenozoico, a região sudeste do Brasil foi submetida à esforços tectônicos marcados por rifteamento e magmatismo que promoveu a formação de um Sistema de Riftes Cenozoicos do Sudeste do Brasil (SRCSB) ao longo do vale

do rio Paraíba do Sul e no Graben da Guanabara (ZALAN & OLIVEIRA, 2005). Como evidência da tectônica rúptil durante o Cenozoico, foram identificadas brechas tectônicas silicificadas no entorno dos grabens associadas à falhas normais e intrusões alcalinas (HEILBRON *et al.*, 2016). A formação do Sistema de Riftes Cenozoicos da Região Sudeste do Brasil e características dos grabens no Planalto Sudestes será apresentado no item 1.2.2.

A bacia hidrográfica do Rio Paraíba do Sul abrange três terrenos tectônicos da Faixa Ribeira: Terreno Oriental, Terreno Paraíba do Sul e Terreno Ocidental (Figura 1.02). Além disso, a foz do rio Paraíba do Sul, situado no extremo leste do estado do Rio de Janeiro, situa-se sobre bacias sedimentares fanerozoicas. O Terreno Paraíba do Sul apresenta hornblendas ortognaisses com assinaturas de arcos magmáticos de idade paleoproterozoica, tendo as unidades que o compõem associadas à um microcontinente amalgado na Orogênese Brasileira. O Terreno Ocidental possui rochas de idades paleoproterozoicas e arqueanas associadas à um arco cordilheirano para o Complexo Mantiqueira, enquanto que as rochas do Complexo Juiz de Fora, pela sua variação composicional, indicam um arco magmático juvenil intraoceânico. O Terreno Oriental está associado à formação de arcos magmáticos Neoproterozoicos durante o fechamento do oceano Adamastor (HEILBRON *et al.*, 2016).

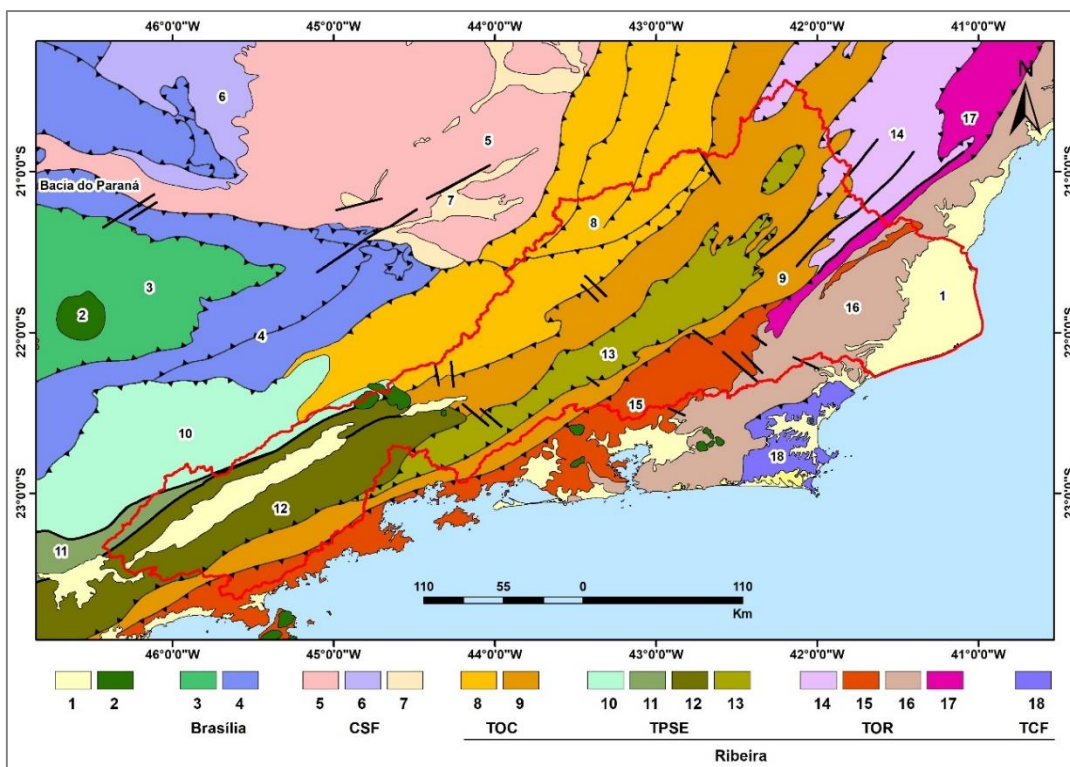


Figura 1.02: Contexto geológico regional da bacia do Rio Paraíba do Sul, com destaque às unidades da Província Mantiqueira e Faixa Móvel Ribeira (modificado de Heilbron *et al.*, 2004).
 Legenda: 1 - Bacias sedimentares fanerozoicas; 2 - Plutons alcalinos do Neocretáceo e Paleógeno;
 Faixa Brasília Meridional: 3 - Nappe Guaxupé; 4 - Nappe de Passos, Sistema de Nappes Andrelândia; CSF - Cráton do São Francisco: 5 - Embasamento arqueano e paleoproterozoico; 6 - Cobertura/Grupo Bambuí; 7 - Sequências metassedimentares autóctones e para-autóctones; Faixa Ribeira: TOC - Terreno Ocidental: 8 - Domínio Inferior (Andrelândia); 9 - Domínio Superior (Juiz de Fora); TPS - Terreno Paraíba do Sul: 10 - Domínio Socorro; 11 - Domínio Apiaí; 12 - Domínio Embu; 13 - Domínio Paraíba do Sul; 14 - Domínio Cambuci; TOR - Terreno Oriental: 15 - Arco Magmático Rio Negro; 16 - Domínio Costeiro; 17 - Domínio Italva; 18 - TCF – Terreno Cabo Frio. CTB - Limite Tectônico Central (sutura da Faixa Ribeira).

1.2.2. Caracterização do Sistema de Riftes Continentais do Sudeste do Brasil

O Rifte Continental do Sudeste do Brasil (RCSB) corresponde a uma estreita faixa alongada e deprimida seguindo a direção ENE, com extensão de aproximadamente 800Km, englobando as bacias sedimentares de Curitiba (PR), São Paulo, Taubaté (SP), Resende, Volta Redonda, Itaboraí e Barra de São João (RJ), e os grábens de Sete Barras (SP) e da Guanabara (RJ) (RICOMINNI, 1989). Para Asmus & Ferrari (1978), esta estreita faixa do relevo estende-se de Curitiba até o Rio de Janeiro possui de 50 a 100 km de largura e aproximadamente 1.000 km de comprimento. Sua morfologia é resultado de movimentos tectônicos rúpteis associados a falhas normais e oblíquas, situados em linhas de fraqueza pré-

cambrianas reativadas. O deslocamento de blocos, promoveu morfologias escarpadas ao longo da linha de falha e bacias do tipo pull-apart nos blocos abatidos por movimentos transtensivos (Taubaté, Resende, São Paulo e Volta Redonda) (Figura 1.03).

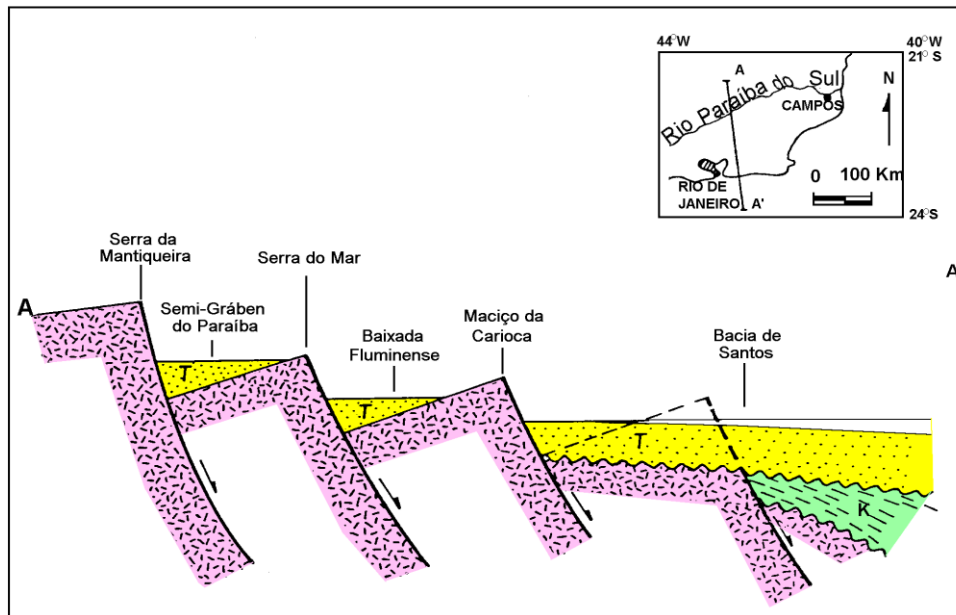


Figura 1.03: Estruturação do relevo em perfil esquemático, com ênfase para as escarpas serranas ao longo dos blocos falhados e dos hemi-grabens formados entre as escarpas. Fonte: Asmus & Ferrari (1978).

Os esforços tectônicos distensivos que ocorreram durante o Cenozoico promoveram a formação do Rift Continental do Sudeste do Brasil (RCSB) ou do Sistemas de Riftes Cenozoicos do Sudeste do Brasil (SRCSB) (ASMUS & FERRARI, 1978; RICOMINNI *et al.* 2010; ZALÁN & OLIVEIRA, 2005). Múltiplos eventos de esforços tectônicos ocorreram entre o Paleógeno e o Neógeno até a consolidação do RCSB. Inicialmente, ocorreu distensão da crosta na direção NNW-SSE, seguidos de movimentos transcorrentes entre o Mioceno e o Pleistoceno e, por fim, distensão da crosta de direção E-W a WNW-ESSE durante o Pleistoceno tardio (Figura 1.04).

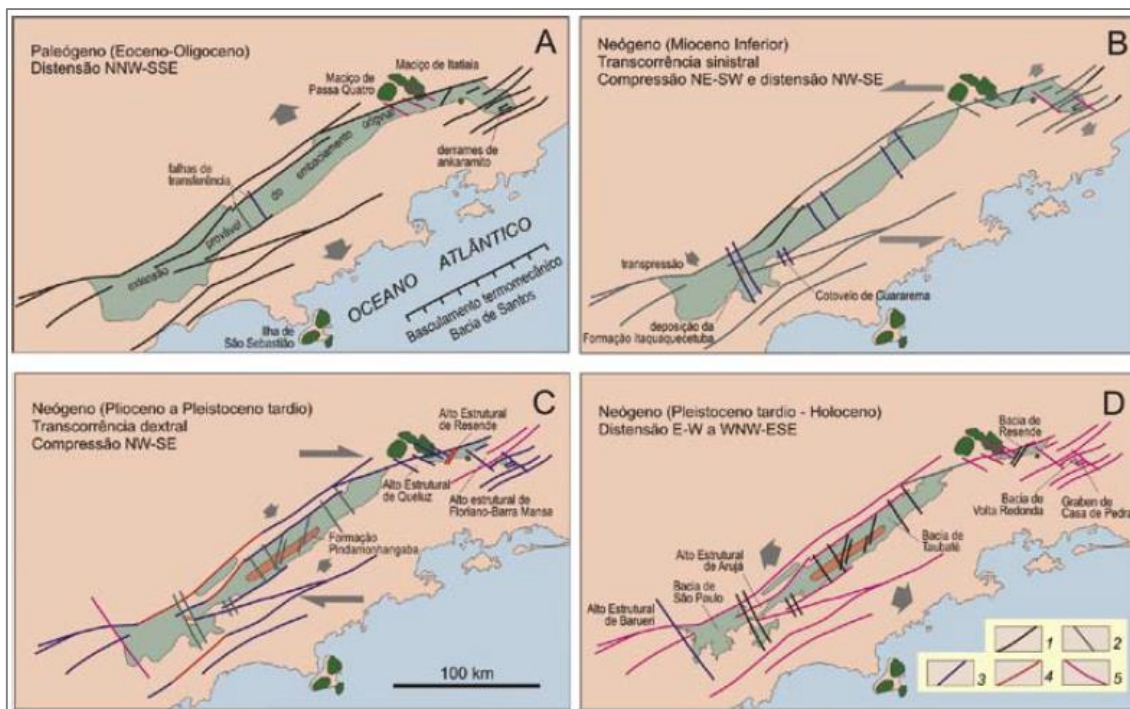


Figura 1.04: Evolução estrutural do RCSB. Fonte: Riccomini et al. (2010). (a) Movimento distensivo de direção NNW-SSE durante o Eoceno-Oligoceno. (b) Transcorrência sinistral, seguida de compressão NE-SW e distensão NW-SE durante o Mioceno Inferior. (c) Transcorrência dextral, compressão NW-SE e consolidação do Alto Estrutural de Queluz durante o Plioceno e Pleistoceno tardio. (d) Distensão E-W a WNW-ESE, consolidação do Alto Estrutural de Arujá durante o Pleistoceno tardio – Holoceno. Fonte: Ricominni et al. 2010.

Para Riccomini (1989) durante o Paleógeno as bacias de São Paulo, Taubaté, Resende e Volta Redonda estavam todas conectadas. Neste período ocorreu a depressão inicial para a formação dos grábens causado por movimentos extensionais de direção NNW e SSE. Durante este período, ocorreu também a sedimentação da Formação Resende associada a um sistema de drenagem entrelaçada e por deposição através de leques aluviais. Já na Formação Tremembé, do mesmo período, a sedimentação se deu em sistema lacustre. Embora a sedimentação destas formações remeta a um clima semiárido, com ocorrência de enxurradas, a prevalência de clima úmido não está descartada.

Durante o Mioceno, esforços transcorrentes sinistrais com direção E – W, com extensão NW – SE deu origem à formação dos Altos Estruturais de Arujá e Queluz, individualizando às bacias de São Paulo, Taubaté e Resende e Volta Redonda (RICCOMINI, 1989; RICCOMINI *et al.*, 2010). Durante o Mioceno, ocorreu a sedimentação da Formação Floriano na bacia de Resende (RAMOS *et al.*,

2006; BRÊDA *et al.*, 2013) e a sedimentação da Formação Pindamonhangaba na bacia de Taubaté. A sedimentação em ambas as bacias durante o Mioceno está associada a um sistema fluvial meandrante, em ambiente de menor energia.

Na bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul, Zálan & Oliveira (2005) definiram a formação de um extenso Sistema de Riftes Cenozoicos por boa parte do sudeste brasileiro, principalmente ao longo da calha principal do rio Paraíba do Sul (Figura 1.05). Os autores mencionam que a formação do SRCSB se deu pelo abatimento de blocos crustais em direção predominante NE-SW por esforços distensivos sinistrais oblíquos (ZÁLAN & OLIVEIRA, 2005). Os autores reconheceram a formação dos grabens de Taubaté, Resende e Volta Redonda na BHRPS. Além disso, a depressão topográfica que compreende o trecho à jusante de Volta Redonda até Itaocara foi definido como Rifte Baixo Paraíba do Sul. Neste rifte não foram identificados depósitos sedimentares Paleógenos ou Neógenos ao longo dos levantamentos geológicos e geomorfológicos da região.

Em termos das principais bacias sedimentares do RCSB, vale a pena começar destacando o Gráben de Taubaté que é a maior depressão tectônica do RCSB. Situa-se na porção leste do estado de São Paulo e corresponde a uma feição deprimida alongada na direção NE-SW (Figura 1.06). Sua origem está associada aos esforços distensivos durante o Paleógeno que abateu o bloco e iniciou o preenchimento vulcano-sedimentar sintectônico do Grupo Taubaté (RICCOMINI, 1989). Possui morfologia assimétrica apresentando sua borda falhada no sopé da Serra da Mantiqueira com escarpas variando entre 1.000m e 1.500m, e na borda meridional é limitada por falhas no contato com a Serra do Mar com escarpas variando entre 400m e 500m (ZÁLAN & OLIVEIRA, 2005). Possui depósitos sedimentares de granulometria grossa na borda das falhas da bacia, bem como, materiais finos e argilosos na porção central (RICCOMINI, 1989; FERNANDES & CHANG, 2001) (Figura 1.07).

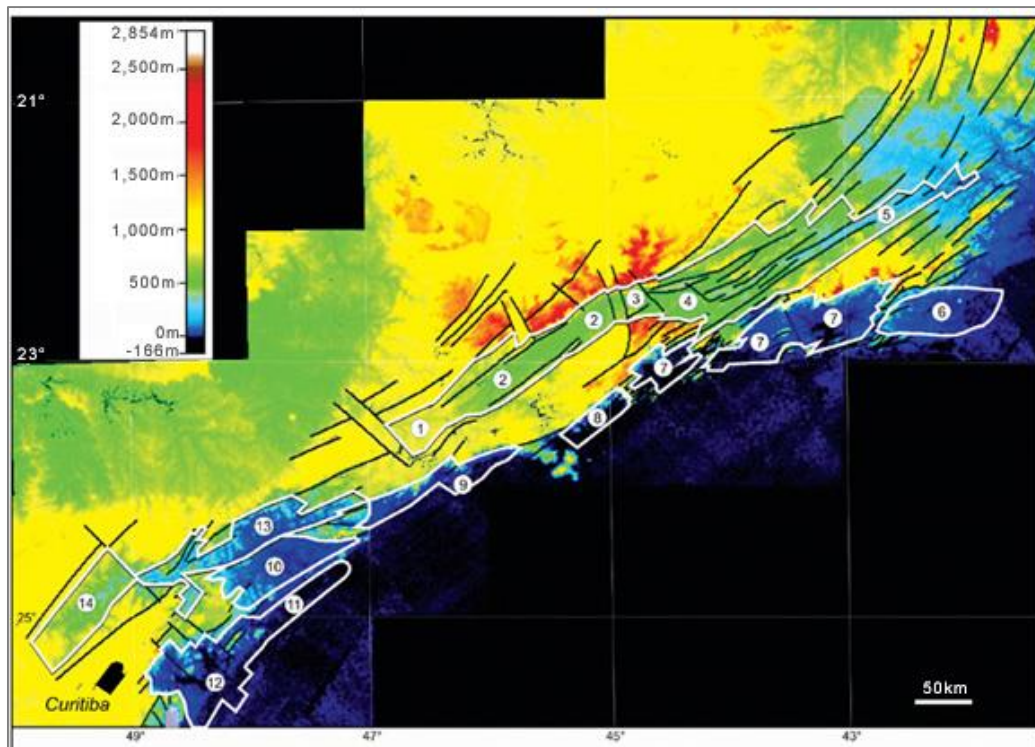


Figura 1.05: Mapa topográfico do Sudeste do Brasil com o arcabouço estrutural do Sistema de Riftes Continentais do Sudeste. Riftes ao longo do rio Paraíba do Sul: (1) São Paulo, (2) Taubaté, (3) Queluz, (4) Resende - Volta Redonda, (5) Baixo Paraíba do Sul. Fonte: Zálan & Oliveira, 2005.

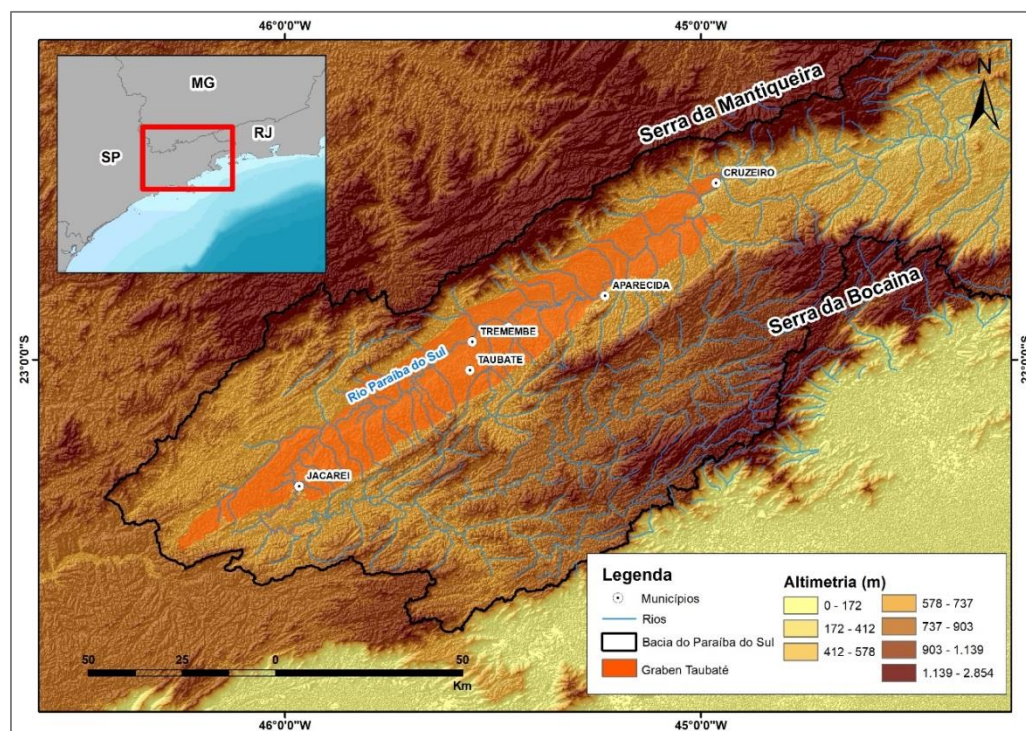


Figura 1.06: Localização do Gráben de Taubaté.

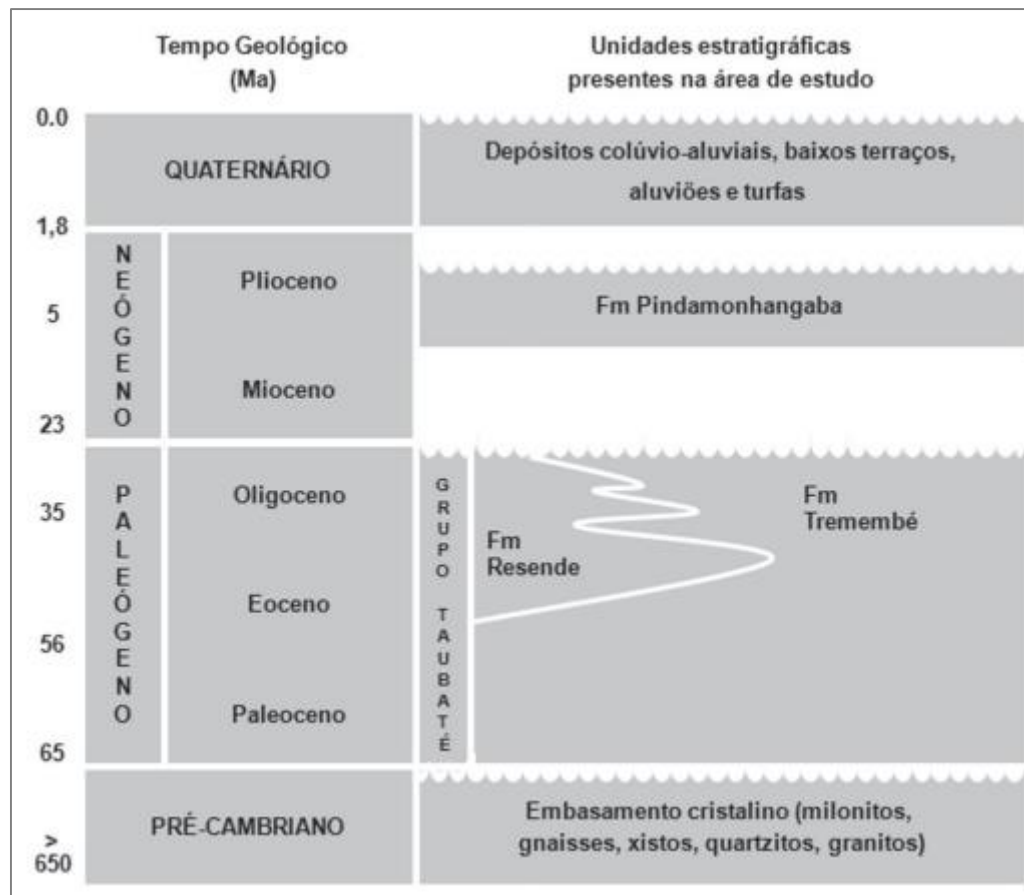


Figura 1.07: Coluna estratigráfica do gráben de Taubaté. Fonte: Rampanelli *et al.* (2011).

De acordo com Rampanelli *et al.* (2011), durante o Paleógeno ocorreu a sedimentação da Formação Resende marcada por um ambiente de sistema fluviais entrelaçados, com formação de leques aluviais. De acordo com o tipo de material, estes leques aluviais são diferenciados entre distais e proximais. Paralelamente, ocorreu ainda a sedimentação da Formação Tremembé, associado a um ambiente lacustre graças à formação de um extenso lago no gráben de Taubaté. O Mioceno, por sua vez, ficou marcado por atividade extensional dos blocos crustais e formação dos altos estruturais de Arujá e Queluz. Estes altos estruturais isolaram o Gráben de Taubaté do de São Paulo na porção sudoeste (Alto de Arujá) e do Gráben de Resende e Volta Redonda na porção nordeste (Alto de Queluz). Ao longo do Mioceno e Plioceno ocorreu a sedimentação da Formação Pindamonhangaba marcada por uma camada conglomerática associada à um sistema fluvial meandrante. Por fim, as sedimentações quaternárias recobrem a coluna estratigráfica (RAMPANELLI *et al.*, 2011).

Já a bacia sedimentar de Resende situa-se no extremo oeste do estado do Rio de Janeiro e localiza-se na calha principal do rio Paraíba do Sul (Figura 1.08). Sua área de afloramento de rochas sedimentares paleogênicas e neogênicas é de aproximadamente 250km². Assim como boa parte dos Riftes Continentais do Sudeste do Brasil, ela é considerada um hemigráben formada a partir de movimentos distensivos com direções predominantes NNW e SSE (RICCOMINI *et al.*, 2004).

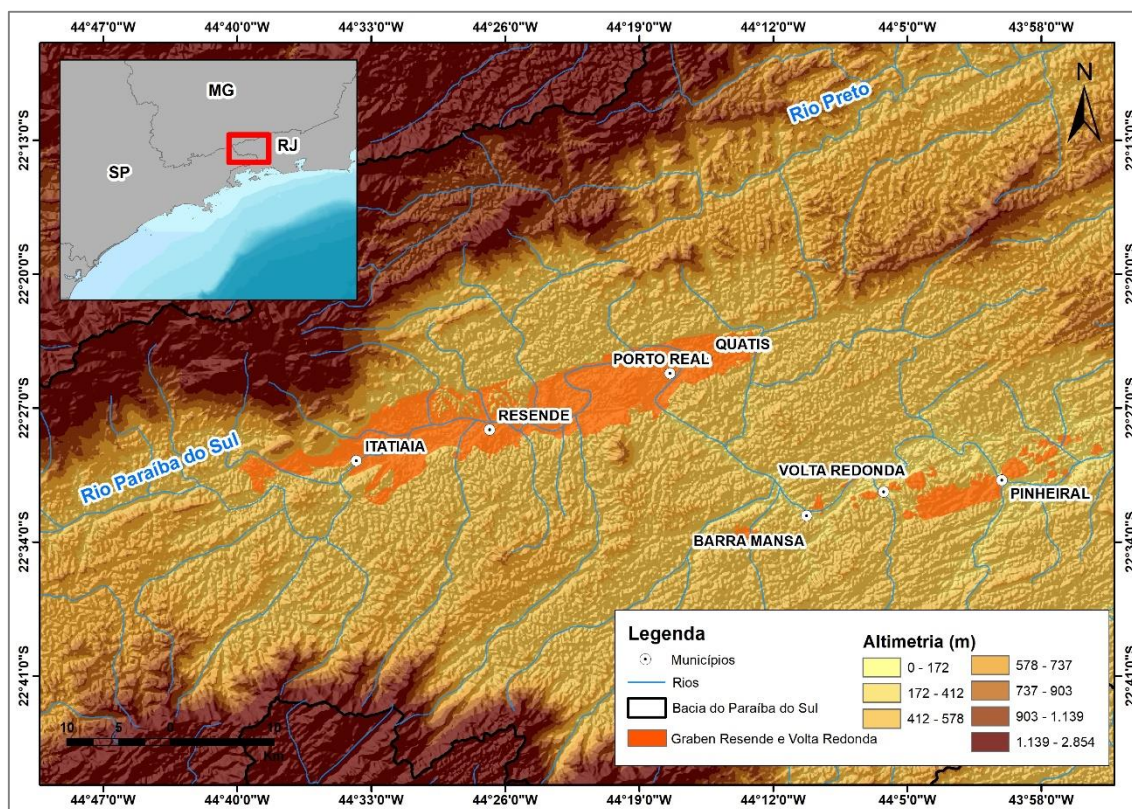


Figura 1.08: Localização do Gráben de Resende e Volta Redonda.

Inicialmente, Amador (1975) dividiu os depósitos sedimentares da bacia de Resende em duas unidades: Formação Resende (inferior) e a Formação Floriano (superior). Nesta divisão, Amador (1975) definiu os sedimentos da Formação Resende associados à um sistema de drenagem entrelaçado, com a ocorrência de leques aluviais na porção sul do Maciço de Itatiaia. Já os depósitos sedimentares da Formação Floriano estariam associados a uma sucessão de camadas arenosas e lamias de cones aluviais retrabalhadas por canais fluviais. Posteriormente, diferentes autores definiram novas características e subdivisões para os depósitos sedimentares da bacia de Resende. Destacam-se Melo *et al.* (1985), Riccomini

(1989), Lima & Melo (1994), Ramos (1997) e Ramos *et al.* (2006). Estes últimos definiram seis associações de fácies divididas em três unidades estratigráficas: Formação Ribeirão dos Quatis, Formação Resende e Formação Floriano (Figura 1.09). De acordo com Ramos *et al.* (2006), a formação Ribeirão do Quatis é a unidade basal dos depósitos, constituída essencialmente por conglomerados quartzosos, maduros, maciços, ocorrendo em inconformidade sobre o embasamento proterozoico. Também são observados depósitos areníticos, com granulodecrescência no topo desta unidade, com conglomerados finos da base. A sedimentação é interpretada como fluxos repentinos de alta energia em sistema fluvial entrelaçado (BRÊDA *et al.* 2013).

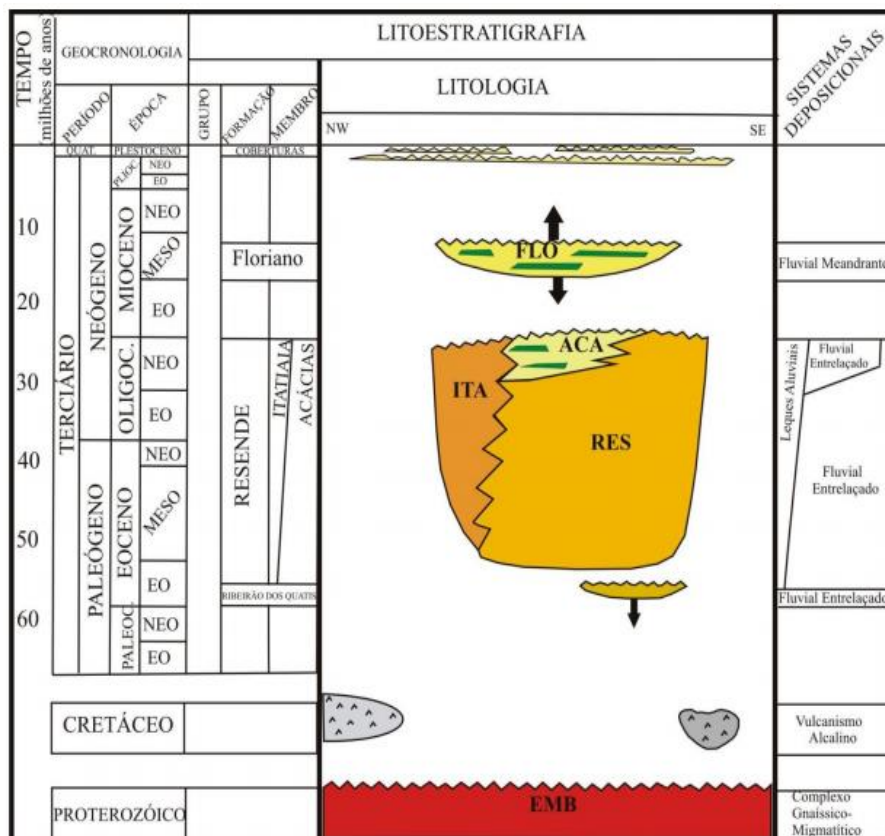


Figura 1.09: Coluna estratigráfica da bacia de Resende. Fonte: Ramos et al. (2006).

A Formação Resende corresponde à maior camada de depósitos paleogênicos da bacia e representa sequência de leques aluviais formados na borda norte da bacia (Figura 1.09). São constituídos de ruditos finos e lamitos arenosos na porção marginal e por arenitos arcossianos médios à grossos com estratificação cruzada na porção axial (RAMOS *et al.* 2006). Segundo Brêda *et al.* (2013), a origem sedimentar pode estar associada a um sistema fluvial entrelaçado de drenagens fluindo de sul e de oeste. Já a Formação Floriano corresponde aos depósitos mais superficiais da bacia de Resende, constituída por camadas de arenito lenticular ou sigmoidal, de espessura entre 1 e 2 metros e idade Miocênica. Esta formação representa o preenchimento final da bacia de Resende e de acordo com as suas características sedimentares está subordinada à um sistema fluvial meandrante de deposição (RAMOS *et al.* 2006; BRÊDA *et al.* 2013). Em alguns casos, são identificados processos erosivos de voçorocamento no relevo que expõem as sequências estratigráficas na vertente (Figura 1.10).



Figura 1.10: Processo de voçorocamento no graben Resende.

Seguindo para jusante na calha do Rio Paraíba do Sul, encontramos uma convergência de drenagem próxima a cidade de Três Rios, não só a convergência dos rios Paraíba do Sul, Paraibuna e Piabanha, mas também de uma série de afluentes, como o Rio Bemposta, Calçado, Chiador e Minerva, entre outros (FREITAS, 2007). No trabalho de Zálan & Oliveira (2005) esta depressão é

mapeada como integrante do que os autores chamaram de rifte do baixo Paraíba do Sul, a leste dos grábens de Resende e Volta Redonda. Este rifte não apresenta acumulação de depósitos sedimentares paleogênicos ou neogênicos mapeados, contudo, sua delimitação pode ser feita por meio da identificação de falhas ao longo da calha do rio Paraíba do Sul (Figura 1.11). Já o Gráben de Itaocara que possui geometria rômica, corresponde ao gráben mais à jusante do rifte Paraíba do Sul como definido por Zálan & Oliveira (2005) (Figura 1.12). Assim como o Gráben de Três Rios, não foram identificados depósitos sedimentares do Neógeno ou Paleógeno nos levantamentos geológicos e geomorfológicos. Tupinambá *et al.* (2003) definiram o Gráben de Itaocara como sendo formado por um conjunto de falhas e fraturas com direção predominantes para NE e NW. É delimitado por pelo Sistema de Falhamento do Rio Pomba na porção nordeste e, na porção sudoeste, por set de falhas e fraturas paralelas ao sistema de falhamento mencionado. As bordas noroeste e sudeste do são marcadas por estrutura neoproterozoicas da Faixa Móvel Ribeira reativadas (TUPINAMBÁ *et al.* 2003). Os depósitos sedimentares presentes estão associados à dinâmica de fluvial e das encostas de idade quaternária.

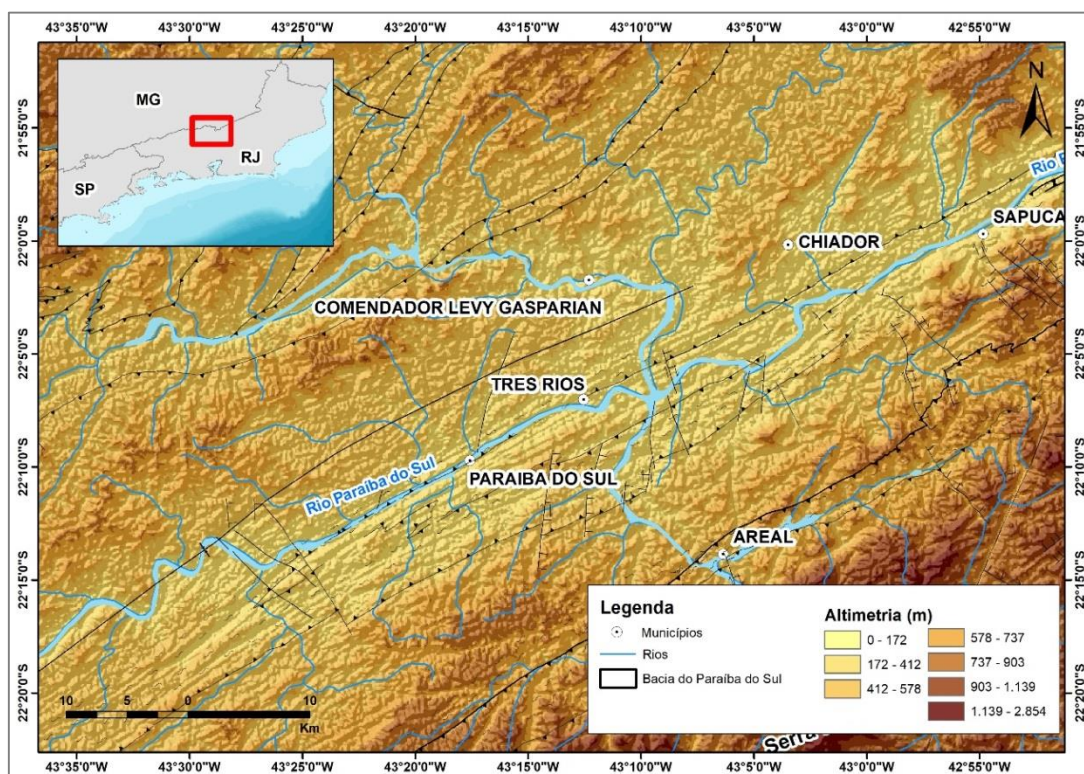


Figura 1.11: Localização e contexto geomorfológico e estrutural do gráben de Três Rios. Apesar da ausência de registro de depósitos sedimentares Paleógenos e Neógenos, a região está inserido no Rifte do Baixo Paraíba do Sul (ZALAN & OLIVEIRA, 2005).

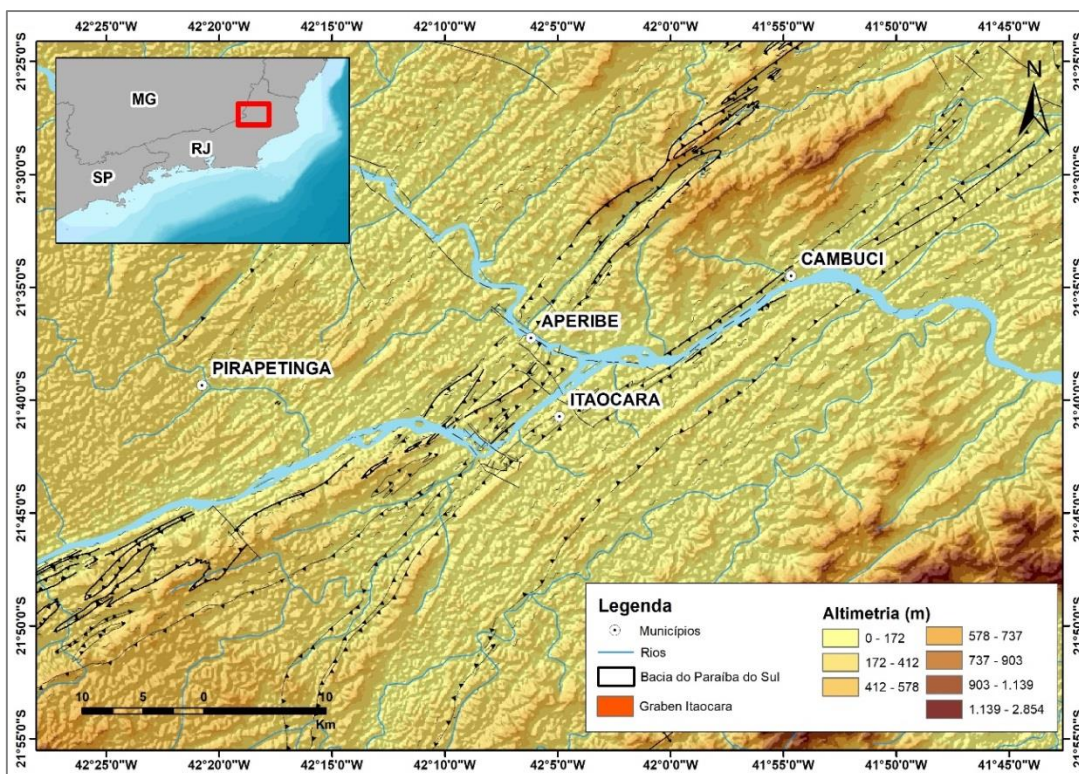


Figura 1.12: Localização e contextualização geomorfológica e estrutural do gráben de Itaocara. Este gráben foi delimitado pelo mapeamento de falhas e estruturas no formato rômbo por Tupinambá *et al.* (2003).

1.3. Contexto Geomorfológico Regional

De maneira geral, a BHRPS pertence ao domínio de Mares de Morro do Brasil Atlântico e ao longo do cinturão intertropical predominam rochas cristalinas e morfologias convexas intercaladas por pedimentação e mamelonização das serras (AB'SABER, 2003).

Sua nascente localiza-se no estado de São Paulo, nos altiplanos da Serra da Bocaina, no município de Cunha, onde o relevo atinge 2.000 metros de altitude e caracteriza-se por um extenso planalto dissecado no reverso da escarpa da serra (Figura 1.13). Ao todo, são percorridos aproximadamente 1.100km até sua foz no município de São João da Barra estado do Rio de Janeiro. De maneira geral, drena uma extensa superfície mamelonar situado ao longo do Sistema de Riftes Cenozoicos do Sudeste do Brasil (SRCSB), tendo a calha principal do rio Paraíba do Sul direção preferencial para Nordeste. Seus afluentes estão localizados nas proeminentes escarpas dos dois horts: (1) o oriental constituído pela Serra do Mar que alcança quase 2.300 metros de altitude e; (2) o ocidental formado pela Serra da

Mantiqueira com picos de mais de 2700 metros de altitude. A configuração do SRCSB se deu principalmente entre 60 e 35 Ma, mas há indícios de atividade tectônica pelo menos até a passagem entre o Neógeno e o Quaternário (RICCOMINI *et al.*, 2004; SANTOS *et al.*, 2006; SALGADO *et al.*, 20016).



Figura 1.13: Altiplano da Serra da Bocaina próximo à nascente do rio Paraíba do Sul.

Ao longo da bacia, podem ser identificados, pelo menos, quatro regiões que apresentam características físicas distintas que podem ser diferenciadas em: alto curso, médio curso superior, médio curso inferior e baixo curso (MARENGO & ALVES, 2005). O alto curso abrange a porção da nascente até a cidade de Guararema (SP), apresentando fortes declives e regime de chuva torrencial, com declividade média de 4,49 m/km e extensão de 371km; o médio curso superior caracteriza-se pela região entre Guararema (SP) e Cachoeira Paulista (SP), com padrão de drenagem do rio Paraíba do Sul variando entre meandrante e sinuoso, declividade média de 0,19 m/km e extensão de 208km. O médio curso inferior estende-se de Cachoeira Paulista (SP) até São Fidélis (RJ), onde o rio apresenta trechos encaixados e encachoeirados, a declividade média é de 1,0 m/km e extensão de 480km. Já o baixo curso situa-se entre São Fidélis (RJ) até a foz do rio Paraíba do Sul sendo marcado por uma extensa planície litorânea, apresenta declividade média de 0,22 m/km e extensão de 95km (MARENGO & ALVES, 2005).

A bacia estudada situa-se no planalto sudeste, no qual predominam ambientes colinosos e serranos entremeados por vales fluviais. A amplitude topográfica da bacia hidrográfica varia entre um pouco mais que 2.700m até o nível do mar. Os divisores que compõe a bacia hidrográfica correspondem às linhas de cumeadas das Serra da Mantiqueira - porção setentrional – (Figura 1.14) e da Serra do Mar na porção meridional. As altitudes nestes ambientes podem atingir 2.700m e configuram ambientes serranos com declividade acentuada e, por vezes, feições de escarpas morfológicas na Serra da Mantiqueira. Já o divisor meridional - Serra do Mar - configura um ambiente serrano constituído pelo reverso do escarpamento de margem continental da América do Sul. Apresenta escalonamentos do relevo até atingir a calha principal do rio Paraíba do Sul. Segundo Ab'Saber (1958), nestes ambientes podem ser encontradas planícies de soleira, encaixadas nas estruturas do substrato rochoso, de conformação estreita e alveolar. Na Serra da Mantiqueira, Marques Neto (2017) identificou forte correlação dos lineamentos estruturais com a orientação da rede de drenagem e alinhamentos serranos.



Figura 1.14: Feição escarpada típica da Serra da Mantiqueira localizada próximo à localidade de Santa Rita do Ibitipoca.

A porção central da bacia hidrográfica, na qual se instalou a calha principal do rio Paraíba do Sul corresponde a uma depressão alongada de direção predominante SW-NE acompanhada pelos divisores da Serra da Mantiqueira e

Serra do Mar. Ao longo do RCSB se instalou esta depressão, com destaque para os grábens de Taubaté, Volta Redonda e Resende (ZALÁN & OLIVEIRA, 2005). Esta depressão apresenta morfologia de relevo típica de colinas dissecadas, de baixo ângulo e, por vezes serras isoladas (Figura 1.15). Os vales fluviais neste compartimento geomorfológico apresentam planícies de inundação bem definidas, alvéolos mais extensos e, por vezes, padrão de drenagem meandrante.



Figura 1.15: Rio Paraíba do Sul próximo à cidade de São Fidélis. Pode-se perceber a morfologia de colinas dissecadas próximas à calha do rio e serras isoladas ao fundo.

Silva (2002) utilizou, para o estado do Rio de Janeiro, uma compartimentação geomorfológica baseada na metodologia proposta por Meis *et al.* (1982). A metodologia baseia-se na técnica de desnivelamento altimétrico em bacias de segunda ordem e a delimitação de unidades morfoestruturais do relevo. Silva (2002) identificou diferentes unidades na BHRPS, podendo destacar as Escarpas das Serras da Mantiqueira, da Serra dos Órgãos, da Serra da Bocaina e do Norte Fluminense, assim como, as depressões interplanálticas dos rios Paraíba do Sul, Pomba e Muriaé. Estas unidades possuem forte correlação com a estruturação geológica, evidenciados pela orientação preferencial dos compartimentos

topográficos mais elevados na direção NE-SW e, também, pela orientação das unidades morfoestruturais deprimidas, como a depressão interplanáltica do rio Paraíba do Sul (Silva, 2002). Esta característica pode ser observada na porção norte e central da BHRPS, não sendo observada à jusante de Itaocara.

Analisando a região do Médio Vale do Rio Paraíba do Sul, entre Resende, Volta Redonda, Bananal e Agulhas Negras, Silva *et al.* (2006) analisaram a ocorrência de anomalias de drenagem e sua relação com condicionantes litoestruturais e com mecanismos de reordenamento de drenagem. Os autores identificaram a ocorrência de um alinhamento de capturas fluviais associadas às estruturas pré-cambrianas reativadas durante o Neógeno. Além disso, evidenciaram a presença de vales secos e divisores rebaixados em compartimentos geomorfológicos mais rebaixados e o retrabalhamento erosivo nas cabeceiras de drenagem capturadas (SILVA *et al.*, 2006). Na porção de Barra Mansa, Eirado Silva *et al.* (1993) identificaram a formação de knickpoints não somente pela erosão diferencial dos litotipos da bacia do rio Bananal, mas, também, pelo controle estrutural de sets de fraturas e trend da foliação das rochas. Dantas (1995) no Médio Vale do Rio Paraíba do Sul demonstrou a influência dos knickpoints na estocagem de sedimentos ao longo da bacia do rio Bananal, dando origem aos alvéolos à montante de estrangulamentos topográficos.

Pasa (2013) realizou um estudo sobre o a antiga conexão entre as drenagens do rio Paraíba do Sul e Tietê, resgatando os trabalhos realizados por Ab'Saber (1957) e Ricominni *et al.* (2010). A autora percebeu que as bacias do rio Tietê e do rio Paraíba do Sul foram influenciados por movimentações tectônicas, sendo a BHRPS mais rebaixada, entalhada e incisa e, conseqüentemente, o processo e evolução erosiva é mais ativa em relação à bacia do rio Tietê. Através da análise dos sistemas de drenagem correlacionados com aspectos estruturais do relevo, Pasa (2013) atribui ao atual curso do Ribeirão Guararema possivelmente à antiga conexão entre o alto curso do rio Paraíba do Sul e o rio Tietê. Ricominni *et al.* (2010) atribuem o cotovelo de Guararema como sendo uma captura fluvial do rio Tietê pelo rio Paraíba do Sul, resultado de um processo tectônico de basculamentos de blocos e por erosão remontante de cabeceiras do rio Paraíba do Sul. Através de estudos de paleocorrentes nos depósitos Eocênicos da bacia de Taubaté, esta

captura fluvial é associada ao Mioceno pela mudança de direção do fluxo de deposição fluvial (RICOMINNI *et al.*, 2010).

Ao longo da BHRPS também foram identificados e descritos outros mecanismos de pirataria fluvial, principalmente nos divisores topográficos. Cherem *et al.* (2013) analisou o papel das capturas fluviais em diferentes locais ao longo do divisor hidrográfico do rio Paraíba do Sul e bacias adjacentes com o rio Doce e o rio Grande. Para os autores, neste setor da bacia, as capturas fluviais encontram-se em diferentes estágios de evolução e aceleram o processo de retração de escarpas. Além disso, Cherem *et al.* (2012) calcularam, através de técnicas de geoquímica, as taxas de denudação e migração de divisores entre bacias hidrográficas em regiões escarpadas no planalto sudeste. Dentre resultados, destaca-se o potencial erosivo da BHRPS em detrimento das bacias interioranas, promovendo capturas fluviais e migração do divisor para o interior do continente (CHEREM *et al.*, 2012). Um dos fatores que influenciam o maior potencial erosivo da BHRPS é o nível de base associado ao oceano atlântico, sendo mais baixo em relação às bacias interioranas, neste sentido, a BHRPS possui potencial erosivo maior do que as bacias hidrográficas adjacentes (CHEREM *et al.*, 2012; CHEREM *et al.*, 2013). Alguns trabalhos utilizaram isótopos cosmogênicos para quantificar as taxas de denudação e recuo de escarpamentos na BHRPS (REZENDE *et al.* 2013; SALGADO *et al.*, 2016; SOUZA *et al.*, 2019). Os trabalhos evidenciam maiores taxas de denudação para as bacias que drenam o piso inferior do Rift Continental Sudeste do Brasil, com taxas variando em torno de 20m à 40m por milhão de anos. Utilizando parâmetros morfométricos, Marent *et al.* (2018) avaliou a interação entre nível de base e a dissecação em bacias hidrográficas no sudeste de Minas Gerais, e percebeu que as bacias interioranas apresentam menor dissecação do que as bacias que drenam a frente escarpada da Serra da Mantiqueira em função do nível de base local se localizar próximo à cabeceira.

Na BHRPS foram realizados estudos de reconstituição da topografia através de ferramentas de geoprocessamento. Boa parte dos trabalhos focalizaram-se sobre a dissecação vertical do relevo (PELECH, 2016) e na mensuração da retração de escarpas em um trecho da Serra da Mantiqueira (MARQUES NETO *et al.*, 2019). Pelech (2016) estabeleceu um método semi-automático para a análise do paleorelevo e quantificou o volume de dissecação vertical da bacia do ribeirão Três

Poços localizada no Médio Vale do Rio Paraíba do Sul. O trabalho estimou um volume sedimentar entre 100 e 230 milhões de metros cúbicos remobilizados na bacia durante o evento Manso ocorrido no Quaternário (PELECH, 2016). Já Marques Neto *et al.* (2019) através da rotina de elaboração de mapas Seppômen em diferentes tamanhos de células calcularam o recuo da escarpa quartzítica da Serra da Mantiqueira. Os resultados demonstram evidências de regressão, com soerguimento e formação de patamares escalonados, reforçando a ideia da atividade tectônica cenozoica na manutenção dos grandes escarpamentos (MARQUES NETO *et al.* 2019).

Silva (2012) analisou mecanismos de evolução da paisagem para a BHRPS através da análise de parâmetros morfológicos, morfométricos e da compilação de dados termocronológicos por fissão de apatita disponíveis na literatura. O autor analisou os índices de denudação e soerguimento de blocos ao longo da calha do rio Paraíba do Sul, a partir de dados de diferentes trabalhos realizados no planalto sudeste e constatou que estes processos ocorreram em diferentes idades e estágios. O autor identificou uma mudança significativa no comportamento entre os desníveis topográficos na BHRPS, uma vez que na porção do alto curso, na região de Taubaté, as maiores amplitudes encontram-se na porção da Serra da Mantiqueira, enquanto que na porção mais à jusante, próximo ao rio Pomba, ocorre a inversão do desnível topográfico para a Serra do Mar. A assimetria da BHRPS também apresenta esta característica, sendo impulsionada para NW na porção de Taubaté para a Serra da Matiqueira e para SE no baixo curso em direção à Serra do Mar. Além disso, o autor identificou que as idades das amostras analisadas apontam para uma correlação maior com o tectonismo Cenozoico (SILVA, 2012). Mendes (2018) enfatiza que na porção emersa da margem continental sudeste do Brasil ocorreram uma combinação de mecanismos que atuaram em diferentes períodos que deixaram marcas na topografia da superfície. Para o planalto Sudeste, a Serra da Mantiqueira e do Mar, bem como, os grábens e bacias sedimentares associadas seriam o resultado da combinação de eventos geológicos pré-cambrianos e dos eventos mais recentes associados ao tectonismo Cenozoico (MENDES, 2018).

Em termos morfológicos, vale destacar uma sequência de trabalhos realizados em busca do entendimento da morfogênese do sistema fluvial e evolução do relevo da BHRPS. Motta *et al.* (1999) evidenciaram, ao longo do planalto

sudeste, a ocorrência de zonas de convergência hidráulica no eixo do rio Paraíba do Sul. Estas zonas de convergência apresentam relação direta o tectonismo Cenozoico e a formação do RCSB (MOTTA *et al.*, 1999). Após a percepção das zonas de convergência, Sarti *et al.* (2004) e Sarti & Freitas (2005) analisaram o entorno de Três Rios e Sapucaia e identificaram que afluentes menores do rio Paraíba do Sul, convergiam em direção à convergência de Três Rios. Em alguns casos, estes afluentes drenavam em direções opostas ao rio Paraíba do Sul e, para atingir a calha principal deste rio, apresentam anomalias de reordenamento fluvial, como o caso do rio Chiador e Minerva (SARTI & FREITAS, 2005; CASTANHEIRA & FREITAS, 2005). Souza *et al.* (2018) analisaram a influência do substrato rochoso na orientação da rede de drenagem, formação de knickpoints e capturas de drenagem na bacia dos córregos Minerva e Chiador. Os autores identificaram a formação de knickpoints sobre litotipos mais resistentes e formação de cotovelos de drenagem resultado de captura fluvial (SOUZA *et al.*, 2018). Nestas mesmas bacias, Silva *et al.* (2018) mapeou a distribuição de depósitos fluviais e identificou esta morfologia no divisor entre estas bacias, indicando a formação de um vale seco (Wind gap) associado à captura fluvial identificada por Souza *et al.* (2018). Além disso, foram identificados terraços fluviais retrabalhados pelo sistema fluvial na bacia do rio Minerva como indicador de input erosivo na bacia devido à captura fluvial e consequente rebaixamento do nível de base (SOUZA *et al.*, 2018) (Figura 1.16). Sarti (2008) analisou fenômenos de capturas fluviais na porção de Sapucaia e identificou o “Estreito de Sapucaia” como um paleodivisor que perdurou até o Paleoceno, sendo dissecado pelo nível de base atlântico.



Figura 1.16: Terraços fluviais erodidos na bacia do rio Minerva devido ao rebaixamento do nível de base.

Freitas (2007) atribuiu o fenômeno de capturas fluviais e evolução do relevo no Planalto Sudeste ao rebaixamento do nível de base atlântico. A quebra do continente Gondwana e a formação de uma margem passiva com o Oceano Atlântica promoveu mudança significativa no nível de base regional e, consequentemente, alterou a dinâmica erosiva das drenagens. Neste sentido, o planalto sudeste recebeu um input erosivo dos rios atlânticos que dissecaram o planalto e promoveram capturas fluviais por meio de recuo de cabeceiras. Destaca-se o rio Paraíba do Sul, que aproveitou o strike da foliação regional, dissecou o planalto sudeste e formou um grande sistema fluvial capturador de drenagens (FREITAS, 2007). Lima (2019) contrapôs o censo comum ao realizar o mapeamento de processos erosivos lineares através de imagens de satélite na BHRPS. A autora identificou que a ocorrência de processos de voçorocamento em áreas submetidas ao mesmo histórico de uso e cobertura tinham influência de condicionantes litológicos e estruturais (LIMA, 2019). Pode-se perceber a ocorrência de voçorocas ativas associadas a rochas metassedimentares do Grupo Paraíba do Sul e a orientação das mesmas condicionadas por estruturas do substrato rochoso, como foliação e fraturas (LIMA *et al.*, 2018).

As pesquisas e resultados apontados neste item embasaram o entendimento de evolução geológico-geomorfológico que será debatido na presente tese.

1.4. Contexto Climático Regional

A BHRPS apresenta grande biodiversidade de ambientes fitofisionômicos, tipos pedológicos e domínios morfoclimáticos. Neste item, serão apresentadas algumas características ambientais da área de estudo com base em estudos já realizados. Serão descritos aspectos da dinâmica climática atual e pretérita, bem como, características vegetacionais e pedológicas.

Em termos climáticos, a BHRPS está inserida no clima subtropical úmido, com temperatura média anual variante entre 18°C e 24°C. A estação do verão é marcada por altas temperaturas e precipitações que podem atingir 2.500mm no ano, com média mensal de 200mm à 250mm por mês. Já o inverno é marcado por um período mais seco, com médias de precipitação acumulada de até 50mm mensais (MARENGO & ALVES, 2005) (Figura 1.17). A Serra do Mar e a Serra da Mantiqueira abrandam o caráter tropical do clima e favorecem a chuva orográfica (SANT'ANNA NETO, 2005) que alcança quase os 2.500 mm na porção mais elevada da área de estudo. Ao analisar a dinâmica de precipitação para a região de Taubaté, Folhes & Fisch (2006) identificaram média anual de 1.350mm para o período de 1983 a 2005. Costa *et al.* (2012) identificaram, para o Médio Vale do Rio Paraíba do Sul, valores médios anuais de 1.300mm consultando diferentes estações pluviométricas. Para o baixo curso da BHRPS, Armond (2018) identificou média pluviométrica de 500mm anuais para a baixada litorânea do norte do estado do Rio de Janeiro.

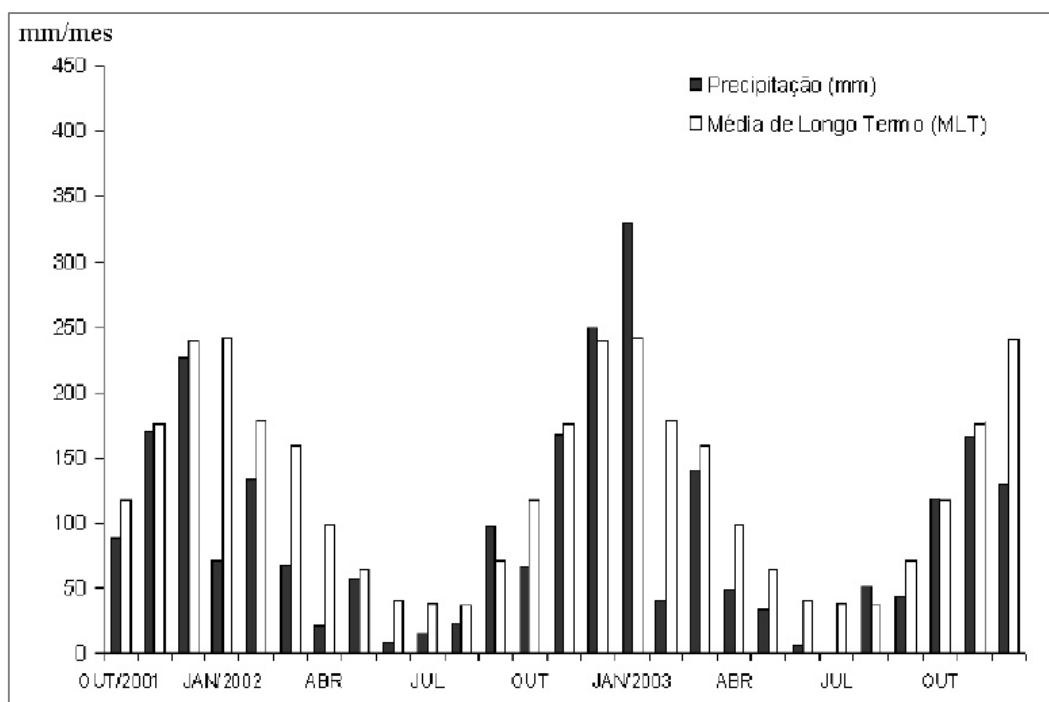


Figura 1.17: Precipitação média mensal na BHRPS no período de 2001 e 2004. Fonte: Marengo & Alves, 2005.

Em relação ao paleoclima, ao longo do Cenozoico ocorreram importantes mudanças climáticas globais, registrando períodos de aquecimento e glaciação ao longo do Paleógeno, Neógeno e Quaternário. Contudo, ainda são poucos os trabalhos que buscam compreender a dinâmica climática da região para períodos anteriores ao Quaternário. Destacam-se poucos trabalhos, de âmbito global, que ressaltam a ocorrência de um período de máximo aquecimento durante o Paleoceno e o Eoceno (HIGGINS & SCHRAG, 2006; INGLIS *et al.*, 2015; KHIEL *et al.*, 2018; LITTER *et al.*, 2019). Este período climático é marcado por intenso aquecimento global impulsionado pelo aumento de gases de efeito estufa na atmosfera, com ápice de temperatura ocorrido no Eoceno, que modificou a circulação atmosférica e oceânica, além de promover a extinção de foraminíferos bentônicos e mudanças em espécies de mamíferos terrestres (LITTER *et al.*, 2019). Variações orbitais devido aos efeitos gravitacionais da terra também influenciaram na distribuição sazonal e latitudinal da irradiação na Terra (KHIEL *et al.*, 2018). Na transição do Eoceno para o Oligoceno ocorreu umas das mais importantes mudanças climáticas no planeta, marcado por resfriamento global causando alterações significativas na circulação oceânica e na biota terrestre (LITTER *et al.*, 2019) (Figura 1.18). Para a região sudeste do Brasil, acredita-se que estas mudanças

climáticas influenciaram na dinâmica hidrológica e erosiva do relevo. A análise dos sedimentos e depósitos correlatos nos grábens do planalto sudeste, podem auxiliar no entendimento da dinâmica climática do sudeste brasileiro para este período.

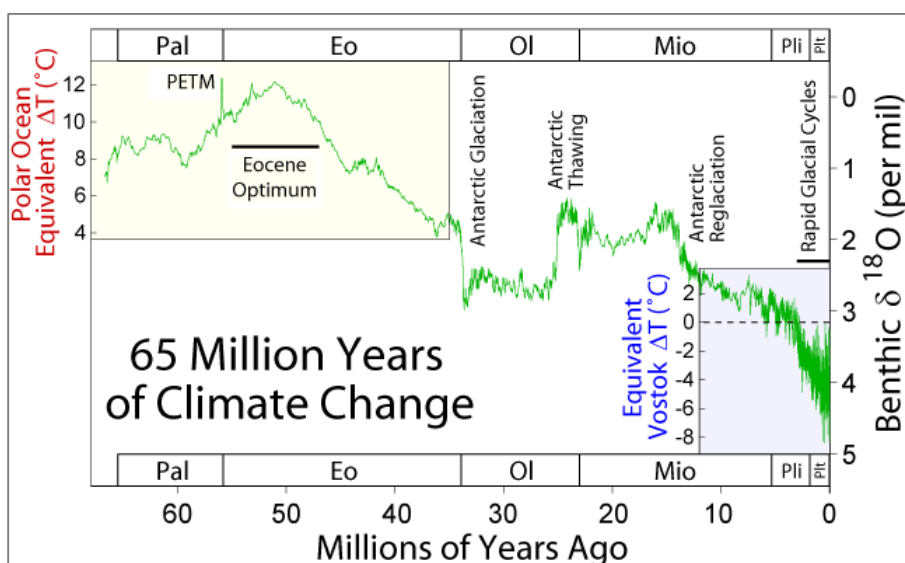


Figura 1.18: Variações climáticas ao longo do Cenozoico, com ênfase para o máximo termal do Paleoceno e Eoceno.

O clima no Quaternário é caracterizado pela alternância de períodos glaciais e interglaciais influenciados pelos ciclos orbitais de Milankovitch que promovem variações na insolação do planeta (MELO & MARENGO, 2008). O final do Pleistoceno marca o último máximo glacial, há aproximadamente 11.000 anos, que culminou no início do Holoceno (MORO & BICUDO, 1998). Behling & Hooghiemstra (2001) identificaram que formações vegetacionais do tipo savana expandiram-se devido a condições climáticas mais secas, e as florestas úmidas ficaram reclusas em pequenos espaços. No início do Holoceno, o clima ficou mais úmido e, com isso, as savanas deram lugar para as florestas úmidas (BEHLING, 2002). Para o Holoceno Médio, para o Hemisfério Sul, diferentes reconstituições climáticas para este período apontam um aquecimento entre 11.000 e 9.000 anos atrás, que pode ser explicado pelo calor transmitido das correntes marítimas e atmosféricas reorganizadas neste período. Durante o Holoceno tardio, sucedeu um resfriamento gradativo (MELO & MARENGO, 2008).

No Brasil, ocorreram flutuações entre o clima semiárido frio e o clima quente úmido (BIGARELLA, 1964). Estas flutuações influenciaram sobremaneira a distribuição espacial dos biomas brasileiros, sendo no clima seco, as florestas

ficaram restritas aos refúgios, enquanto que no clima úmido as florestas conseguiram se expandir devido a chuvas de convecção e intemperismo químico acentuado do relevo (BIGARELLA, 1975). Paisani *et al.* (2013) ao analisar a influência das alternâncias climáticas do Quaternário na evolução de paleovale de segunda ordem identificaram mudanças significativas no sistema geomorfológico na transição do Pleistoceno tardio para o Holoceno, com mudança na dinâmica erosiva de baixa, no Pleistoceno, para muito alta durante o Holoceno. Esta mudança está associada a um clima mais quente e úmido no Holoceno (PAISANI *et al.*, 2013). Meis & Moura (1984) identificaram a influência do clima do Quaternário superior no relevo do sudeste brasileiro através das taxas de sedimentação e evolução das encostas a partir da análise de sequências estratigráficas. Para as autoras, a ocorrência de antigos depósitos retrabalhados, discordâncias erosivas nas sequências e a presença de stonelines são resultados de mudanças climáticas e sucessivos episódios desnudacionais (MEIS & MOURA, 1984).

1.5. Características Pedológicas e Vegetacionais

De acordo com as informações disponibilizadas pelo banco de dados ambientais do IBGE (2019), os solos que predominam na BHRPS são os Latossolos e Argissolos em diferentes compartimentos do relevo e unidades geológicas. Outras classes de solo podem ser identificadas na área de estudo, como os Cambissolos e os Neossolos Litólicos que se restringem às porções mais acidentadas e declivosas da bacia, sendo mais comuns nas regiões serranas da Serra do Mar e da Mantiqueira. Os Neossolos Flúvicos podem ser encontrados nas planícies fluviais da calha principal do rio Paraíba do Sul, bem como, nos leitos marginais dos afluentes principais, tais como o rio Pomba, rio Paraíbuna, rio Piabanha, rio do Quilombo e rio Preto.

Em relação à vegetação, pode-se dizer que a área de estudo está inserida no bioma da Mata Atlântica, com presença de fitofisionomias e ecossistemas distintos. Embora a pluviosidade seja concentrada nos meses de primavera e verão do hemisfério sul, não há propriamente uma estação seca. Isto favoreceu a instalação de uma floresta tropical densa, a Mata Atlântica, sendo que nas regiões mais elevadas essa floresta se adapta até se transformar em um conjunto de campos

arbustais de altitude. Dentre as fitofisionomias que originalmente cobriam a área da BHRPS pode-se destacar: Florestas Estacional, Floresta Ombrófila e Formações Pioneiras (AGEVAP, 2007). Contudo, devido aos diferentes usos do solo na BHRPS, com destaque para a atividade cafeeira, poucos remanescentes florestais podem ser encontrados, restritos nas encostas mais íngremes das Serra do Mar e da Mantiqueira, bem como, em Unidades de Conservação. De acordo com o levantamento apresentado pela AGEVAP (2007), a floresta estacional recobre 3,5% da área da BHRPS, enquanto que a Floresta Ombrófila apenas 7,5%. Boa parte dos fragmentos florestais, foram substituídos por campos/pastagens que correspondem por 67% da área da bacia, sendo a cobertura mais representativa da BHRPS.

2. Rearranjos de drenagem e captura fluvial

Os sistemas fluviais sempre foram de extrema importância para homem servindo tanto para locomoção como para o abastecimento populacional. As primeiras sociedades fixaram-se próximas aos rios mais importantes, dentre eles, o rio Nilo. Suas áreas deposicionais, geralmente planas, com possibilidade de captação de água potável e terrenos férteis, sempre foram locais preferenciais para a ocupação das sociedades no Egito. Este mesmo padrão se repetiu em diversas partes da superfície terrestre (LIMA, 2006; SILVA, 2010).

As drenagens também são consideradas importantes na modelagem da paisagem e, conseqüentemente, do relevo, sendo influenciada por diferentes variáveis. Diante disso, torna-se fundamental para o entendimento da paisagem o estudo dos padrões e características das drenagens, bem como, seus condicionantes. Esta tem sido uma das preocupações da geomorfologia para compreensão dos processos de dissecação e das formas resultantes do relevo (CHRISTOFOLETTI, 1974; COELHO NETTO, 1994; BISHOP, 1995).

Guerra (1993) define drenagem como uma feição linear negativa produzida por água de escorrência, que modela a topografia de uma região. Por sua vez, Christofolletti (1974) conceitua como canais de escoamento inter-relacionados que formam uma bacia. Mais recentemente, Deffontaines & Chorowicz (1991) definem rede de drenagem como um conjunto de superfícies topográficas subaéreas, as quais são contíguas com pendentes ladeiras acima, em todos os lados, à exceção da direção do fluxo da água. Esse conjunto de superfícies pode ser coberto com água, temporariamente ou de forma perene.

Na geomorfologia clássica, os trabalhos associados aos mecanismos e condicionantes modeladores das formas do relevo davam ênfase ao papel exercido pelos sistemas fluviais. A teoria de ciclo erosivo proposto por Davis (1899) influenciou boa parte dos pesquisadores até meados do século XX e, durante esse período, poucos foram os trabalhos desenvolvidos no que diz respeito aos processos que ocorrem nas encostas. Somente na década de 60, com o resgate do conceito de equilíbrio dinâmico e da interdependência entre os elementos da paisagem elaborados por Gilbert (1877) e o reconhecimento de sistemas geomorfológicos que as dinâmicas e processos que ocorrem nas encostas ganharam destaque, através dos

trabalhos de Hack (1960) e Howard (1965). Neste sentido, de acordo com Silva (2010) a relação entre a intensidade entre as forças endógenas e exógenas ao sistema geomorfológico e as diferenças de resistência do substrato resultaria nas diferenças morfológicas do relevo.

O reconhecimento de fatores extrínsecos ao sistema na modificação da paisagem foi bastante utilizada pelos geomorfólogos. Os mecanismos de evolução da rede de drenagem e das encostas estaria submetida às dinâmicas dos processos erosivos, sendo um dos principais agentes modeladores do relevo. Contudo as dinâmicas erosivas estão submetidas às variações de forças extrínsecas, como os índices pluviométricos ou mudança da cobertura vegetal (LEOPOLD *et al.*, 1964; SILVA 2010). Outro fator externo importante na elaboração das formas do relevo são os condicionantes litoestruturais que influenciam na esculturação da paisagem. O controle exercido pelos aspectos litológicos, tectônicos e estruturais se dá através da interação entre as taxas de soerguimento crustal e as taxas de denudação do relevo, assim como, no processo de erosão diferencial frente a resistência litológica, que será aprofundada mais adiante (PENCK, 1953; DANTAS, 1995; GHROMANN *et al.*, 2011; CAMOLEZI *et al.*, 2012).

A partir disso, os estudos voltaram-se no entendimento de evolução de bacias através de ciclos de erosão/deposição e reconhecimento que os processos erosivos acelerados, como voçorocas e ravinas, correspondem ao primeiro estágio de evolução da drenagem (BERGER & AGHASSY, 1984). De acordo com Oliveira (1999) os processos erosivos derivam da tendência de sistemas naturais a atingir um estado de equilíbrio entre energia disponível e a eficiência do sistema em dissipar energia. Segundo Bak (1997), quando um sistema natural (vertente, bacia de drenagem, etc.) não é eficiente para dissipar a energia disponível, o sistema se adapta, entrando assim em um novo estado de equilíbrio.

2.1. Processos Evolutivos de Canais de Drenagem

A evolução do relevo em ambientes de margens passiva ganhou maior destaque apenas após uma série de trabalhos publicados no final dos anos oitenta e início dos noventa do século passado (PINET & SORIAU, 1988; SUMMERFIELD, 1991; LEEDER, 1991; MILLIMAN e SYVITSKI, 1992; GILCHRIST &

SUMMERFIELD, 1994). Isto se deu, em parte, em função da inovação tecnológica e os diferentes métodos geocronológicos que auxiliam na interpretação dos eventos evolutivos destes ambientes principalmente numa escala temporal de longo termo (SUMMERFIELD, 1991; BURBANK, 2002; MARENT *et al.*, 2013). Além disso, Summerfield (1991) aponta que as análises das camadas sedimentares depositadas no fundo oceânico auxiliaram na interpretação de evolução tectônica das margens passivas. Uma das características marcantes sobre a evolução de margens passivas está associada ao soerguimento e subsidência de blocos crustais que podem configurar margens de baixa ou alta amplitude (GILCHRIST & SUMMERFIELD, 1994; MARENT *et al.* 2013). Neste contexto, Summerfield (1991) propôs um modelo das forças tectônicas atuantes em margens passivas e sua respectiva evolução em que os escarpamentos de margem passiva seriam mantidos na paisagem graças ao soerguimento dos blocos continentais em função do alívio de pressão causado pela erosão, em conjunto com a subsidência dos oceânicos adjacentes devido ao acúmulo de sedimentos (Figura 2.01). Este sistema ainda teria em paralelo uma regressão do escarpamento em direção ao interior do continente, pois os cursos fluviais que drenam a escarpa diretamente para o oceano apresentam maior energia e poder erosivo que aqueles que vertem no reverso continental.

De fato, a configuração da evolução da paisagem através do soerguimento e subsidência de blocos tende a influenciar não somente na morfologia do relevo, assim como no sistema de drenagem. Uma das características marcantes de margens passivas é a divisão entre bacias hidrográficas costeiras e interioranas (SUMMERFIELD, 1991). A evolução destes sistemas de drenagens que escoam por compartimentos geomorfológicos distintos ocorreria por meio de capturas fluviais que causariam a migração de divisor (SUMMERFIELD, 1991) (Figura 2.02).

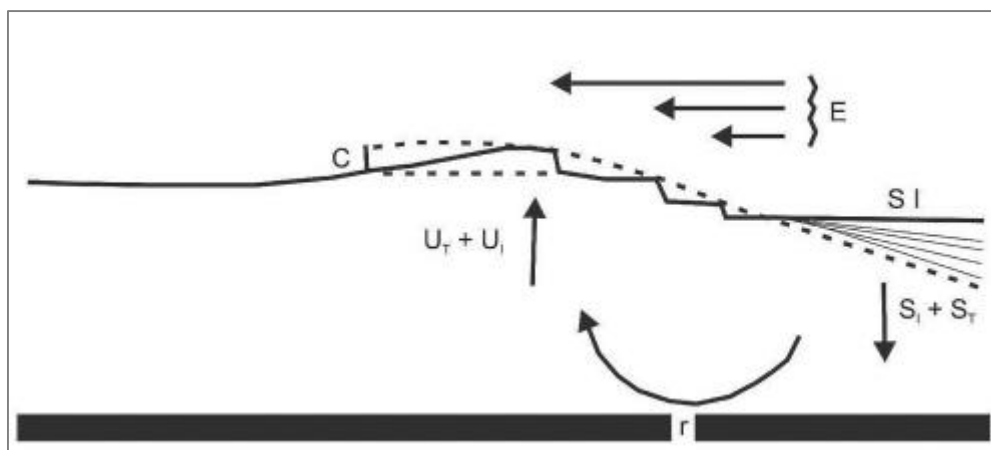


Figura 2.01: Modelo proposto por Summerfield (1991) para a evolução tectônica em margens passivas. U_T = Soerguimento termal; U_I = Soerguimento isostático devido a denudação; S_T = Subsidiência termalmente derivada; S_I = Subsidiência isostática por acúmulo de sedimentos; r = Rotação da margem em função de $S_I + U_I$; E = Retração do escarpamento oceânico; C = Topografia gerada pelo processo de “rifteamento”. Fonte: Adaptado Summerfield (1991).

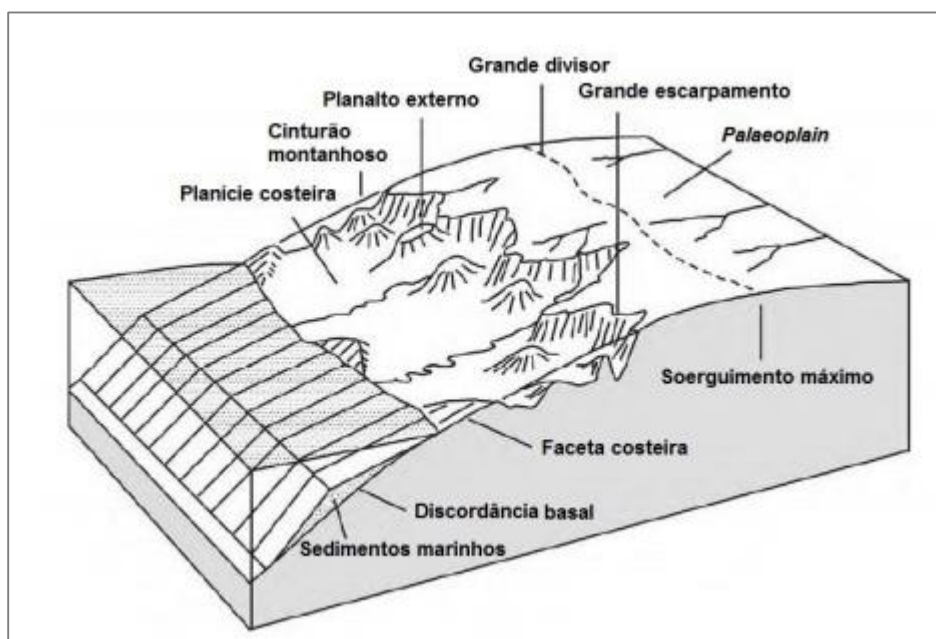


Figura 2.02: Modelo proposto por Summerfield (1991) para evolução dos sistemas de drenagem em margem passiva. Fonte: Rezende (2013).

2.2. Pirataria e Capturas Fluviais

O fenômeno de pirataria fluvial foi inicialmente percebido, principalmente, por pesquisadores americanos e franceses no final do século XIX. Neste período destaca-se o estudo do caso da captura do rio Mosa pelo rio Mosela, ocorrido na região da Lorena na França e que foi observado primeiramente por William Morris

Davis (DAVIS, 1899; CHRISTOFOLETTI, 1977; OLIVEIRA, 2010). Neste estudo e nos subsequentes, percebe-se a ocorrência de anomalias de drenagens indicadoras de capturas fluviais, tais como cotovelos e vales abandonados (OLIVEIRA, 2010).

De maneira geral, pode-se dizer que a captura fluvial (river capture ou streampiracy) corresponde ao desvio natural das águas de uma bacia hidrográfica para outra, promovendo a expansão de uma drenagem em detrimento da vizinha (CHRISTOFOLETTI, 1975; CHRISTOFOLETTI, 1977; BISHOP, 1995; OLIVEIRA, 2010; SILVA & SANTOS, 2010). Logo, um rio comete pirataria (piracy) ao conquistar seu vizinho (MILLER, 1915). Trata-se, portanto, de um importante fenômeno no processo de desenvolvimento da drenagem, sujeita ou não a controles estruturais como, por exemplo, a migração de níveis de base locais (CHRISTOFOLETTI, 1977; SUMMERFIELD, 1991). Entretanto, apesar de sua importância no entendimento da evolução da rede drenagem, poucos estudos deram ênfase à questão das capturas de drenagens. Além disso, raros foram aqueles que apresentaram descrições pormenorizadas que consideraram os fatores paleogeográficos, geomorfológicos e geológicos envolvidos.

Dentre as classificações existentes para as tipologias de capturas de drenagem, destacam-se os trabalhos de Christofolletti (1975, 1977) e de Paul Bishop (1995). Apesar de complementares e semelhantes, ambos apresentam particularidades que merecem ser destacadas. De acordo com Christofolletti (1977), existem cinco tipos de capturas fluviais: (1) por absorção; (2) aplainamento lateral; (3) transbordamento; (4) subterrânea e; (5) recuo das cabeceiras.

A captura *por absorção* ocorre quando um rio entalha mais que os outros adjacentes, alargando assim seu divisor de drenagem e englobando os cursos laterais. Este processo é a base para o entendimento dos cursos d'água se reunirem em alguns cursos principais e, conseqüentemente, responsável pela hierarquização inicial das bacias de drenagem. Já as capturas *por aplainamento lateral* ocorrem graças à erosão lateral promovida por um rio principal, dos interflúvios que o separam de um tributário. Isto agrega as águas situadas a montante do referido curso. Por sua vez, a captura *por transbordamento* acontece quando um rio recebe um aporte elevado de sedimentos gerando entulhamento do seu leito, elevando-o ao nível superior, fato que pode ocasionalmente ultrapassar a planície de inundação e drenar para vales vizinhos. As *capturas subterrâneas* são comuns em ambientes

cársticos, nos quais a velocidade de dissolução das rochas e o nível freático no qual escoia o curso subterrâneo são os fatores fundamentais para explicar tal ocorrência (CHRISTOFOLETTI, 1977; SILVA & SANTOS, 2010; OLIVEIRA, 2010). Por fim, Christofolletti (1977) chama atenção para as capturas fluviais originadas pelo *recuo das cabeceiras* de drenagem. Nesta tipologia, um canal erode o divisor mais rapidamente que o canal vizinho até que haja o rebaixamento do divisor e, assim, captura seu fluxo d'água. Um fator importante no desencadeamento deste processo é a diferença altimétrica entre os canais envolvidos, sendo os tributários do rio mais baixo topograficamente responsáveis pela erosão do divisor. Dentro da literatura geomorfológica, boa parte dos casos citados relacionados às capturas de drenagem enquadra-se na tipologia do recuo das cabeceiras (CHRISTOFOLETTI, 1975; SILVA & SANTOS, 2010).

Já Bishop (1995) chama atenção para tipos de capturas que podem ser promovidos por dois processos diferentes: Top-down e bottom-up. As capturas fluviais ocasionadas por um processo top-down estão associadas a eventos de migração de canal, tectonismo ou deslizamentos catastróficos. O processos de bottom-up estão se relacionam a interceptação ativa de um rio e apropriação de um sistema de drenagem adjacente, e normalmente são causados pelo avanço erosivo de cabeceiras de drenagem. Sendo assim, Bishop (1995) propôs três típicos processos de pirataria fluvial (Figura 2.03) que aqui serão denominados de decapitação, interceptação e desvio. As tipologias resultantes desses processos são evidenciadas, normalmente, por fatores geológicos e/ou morfológicos, sendo caracterizados por anomalias de drenagem (BISHOP, 1995; GONTIJO, 1999).

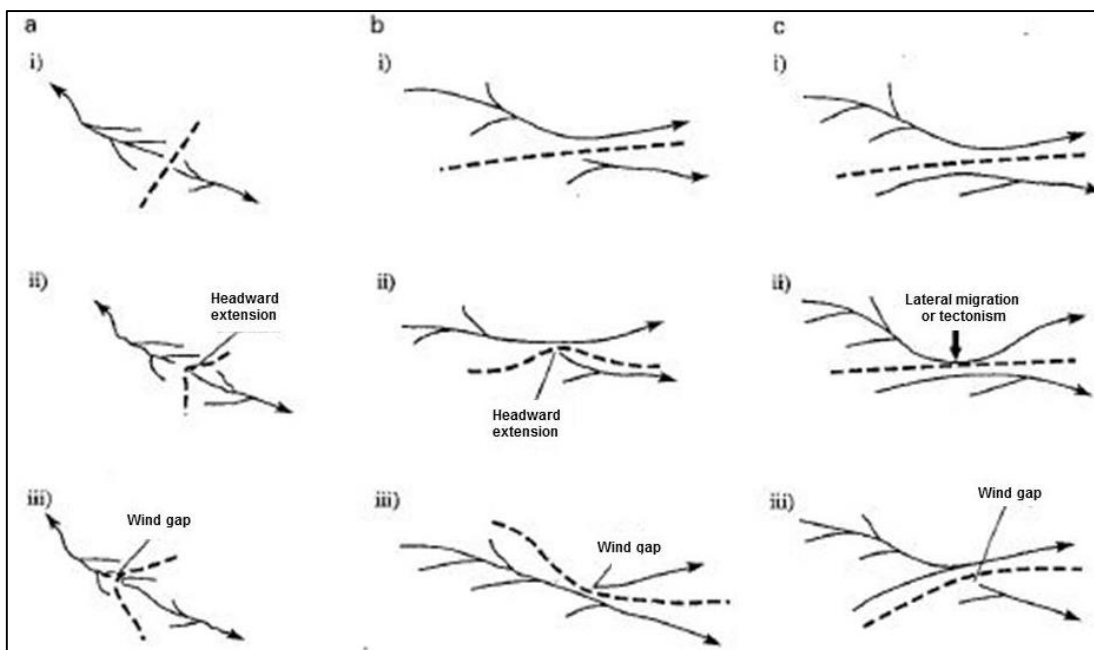


Figura 2.03: Modelos de reajuste de drenagem originados por capturas de drenagem desenvolvidos por Bishop (1995). A linha pontilhada indica o divisor de drenagem. (a) indica a decapitação, onde as cabeceiras de um canal mais agressivo pirateiam as da bacia hidrográfica adjacente; (b) ilustra a captura por interceptação, onde a cabeceira de um curso fluvial, graças a erosão remontante, intercepta o canal fluvial adjacente e (c) ilustra o desvio, ou seja, a migração lateral de um canal em direção ao sistema de drenagem adjacente.

Em relação às evidências, as anomalias de drenagem podem ser representadas por cotovelos de drenagem, baixos divisores ou por vales abandonados nos locais adjacentes à captura. A Geologia contribui na investigação estratigráfica dos depósitos por meio das semelhanças entre os materiais depositados e a disposição dos mesmos. Além disso, podem ser realizadas datações dos sedimentos em diferentes locais e através dos resultados pode-se aferir a ocorrência ou não de paleodrenagens que evidenciam as capturas (BISHOP, 1986).

No ponto da captura de drenagem é bastante comum a ocorrência de uma forte mudança de direção do eixo de drenagem caracterizando, assim, uma anomalia de drenagem denominada cotovelo. Ela é a feição mais mencionada na literatura como evidência captura fluvial e suas causas são, em sua maioria, associadas a litoestrutura (COELHO NETTO, 2003; CASTANHEIRA *et al.*, 2005; SILVA *et al.*, 2006). Além disso, outros atributos podem surgir na paisagem após a captura, como o caso dos “vales secos” (dryvalley) e dos níveis de base locais (knickpoints). Estes podem ocorrer no local da captura ou à montante do cotovelo e demonstram a diferença altimétricas entre as bacias envolvidas, algo que é de extrema

importância para que haja o desvio de drenagem. Porém, não é necessário que as diferenças topográficas sejam elevadas e dependendo da diferença, não é necessário a formação de um nível de base local no ponto de captura (CHRISTOFOLETTI, 1977; SMALL, 1978 apud BISHOP, 1995).

O reajuste de drenagem pode contribuir no entendimento da evolução do modelado da paisagem numa perspectiva de longo termo. Neste sentido, a datação dos depósitos e a associação das anomalias com os condicionantes geológicos permitem a reconstrução paleogeográfica da rede de drenagem sob a influência de eventos tectônicos ao longo de milhares de anos. Ollier (1981) demonstrou a influência do rifte do mar da Tasmânia e a quebra continental na geração de capturas de drenagem ao longo do Mesozoico e do Cenozoico. Nesta mesma linha de raciocínio, Silva (1991) e Silva *et al.* (2006) relacionam a presença de divisores rebaixados no planalto sudeste brasileiro aos eventos de reativação tectônica durante Paleógeno, com o basculamento dos blocos e a consequente aceleração erosiva nas cabeceiras de drenagem pelo rebaixamento do nível de base. O desenvolvimento deste processo, associado ao rebaixamento de divisores, pode contribuir para a captura de drenagens.

No Brasil, até o início do século XX foram poucos os trabalhos voltados para o entendimento das capturas de drenagem dão ênfase aos processos e tipologias, bem como, apresentam uma abordagem mais complexa sobre o tema, onde sejam consideradas as diferentes variáveis geológicas e geomorfológicas na análise das capturas que ocorrem no território nacional. De maneira geral, os trabalhos existentes eram incipientes e pouco conclusivos sendo, os exemplos de capturas de drenagem a nível regional mais estudados e mencionados que os de escala locais. Dentre os casos abordados, destaca-se a captura do Rio Tietê pelo Rio Paraíba do Sul, sendo evidenciada pelo cotovelo de Guararema (Figura 2.04) (AB'SABER, 1957). Além desta, merece destaque a captura do Córrego Alegre pelo Córrego Barreiro de Baixo na cidade de Bananal, Médio Vale do Paraíba do Sul e capturas fluviais identificadas ao longo do divisor hidrográfico da Serra da Mantiqueira (SILVA, 1991; CHEREM *et al.*, 2012; REZENDE *et al.*, 2013).

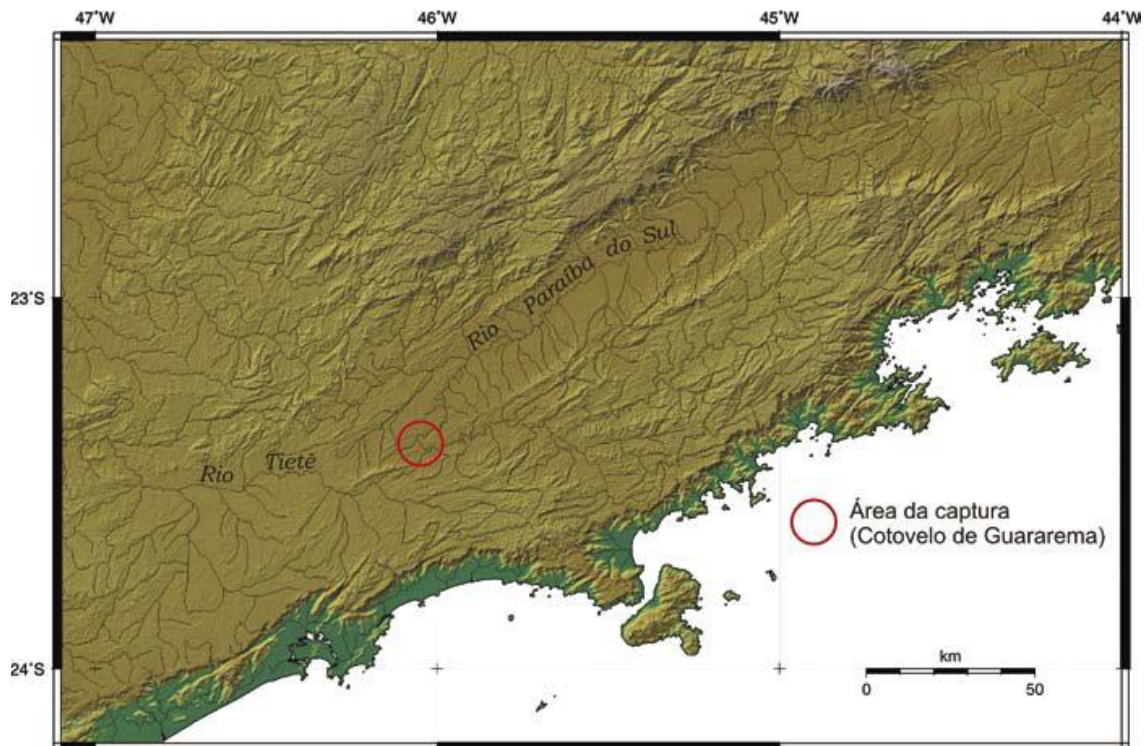


Figura 2.04: Captura Fluvial do Rio Paraíba, com destaque para o cotovelo de Guararema.
Fonte: Riccomini et al. (2010).

Entretanto, com o começo do século XXI os trabalhos que investigaram processos de pirataria fluvial e rearranjo de drenagem proliferaram no Brasil. Merece destaque a descoberta de uma megacaptura do Rio Negro na Amazônia (ALMEIDA-FILHO *et al.*, 2007). No Sul e Sudeste, destacam-se os trabalhos desenvolvidos por Salgado *et al.* (2014, 2016), Oliveira (2010), Cherem *et al.* (2012), Rezende *et al.* (2013) e Sordi *et al.* (2018). Nos trabalhos mencionados foram identificados e analisados mecanismos de capturas fluviais em divisores hidrográficos das principais bacias inseridas na margem passiva da plataforma continental. Ao longo do divisor hidrográfico dos grandes escarpamentos da região sul e sudeste, foram identificados mecanismos de pirataria fluvial e migração de divisor para o interior do continente. Este processo é controlado por condicionantes litológicos, estruturais e, sobretudo, pelo nível de base regional SRCSB cujas bacias que drenam para o litoral tendem a apresentar taxas de denudação maiores e, consequentemente, promovem capturas fluviais de drenagens que corriam para o interior do continente (CHEREM *et al.*, 2012; SALGADO *et al.*, 2016; SORDI *et al.*, 2018). Neste sentido, ressalta-se o potencial erosivo do rio Paraíba do Sul em detrimento das bacias interioranas adjacentes, como no caso da bacia do rio Doce e do rio Paraná, uma vez que drena o piso inferior do oceano Atlântico (SALGADO

et al., 2016). Cherem *et al.* (2012) identificaram que a bacia do rio Paraíba do Sul apresenta taxas de denudação maior que as bacias mencionadas e, com isso, incorporam áreas destas bacias em seus limites.

Neste sentido, a evolução dos sistemas de drenagem em margens do tipo rifte ocorre por processos de rearranjos fluviais e migração de divisores de drenagem, condicionada pela diferença erosiva entre as bacias que drenam para o interior do rifte e as bacias que drenam para o interior dos continentes. As drenagens associadas ao nível de base do rifte tendem à apresentar maior potencial erosivo, promovendo o recuo dos escarpamentos que bordejam as áreas abatidas e, conseqüentemente, capturam sistemas fluviais interioranos. Em alguns casos, podem ocorrer a formação de bacias endorréicas nestes ambientes que, posteriormente, são incorporadas ao sistema de drenagem exorreico por meio de captura fluvial (CUNHA *et al.*, 2019). As principais características de bacias endorréicas, dinâmica hidrológica e mecanismos de evolução serão apresentadas a seguir.

2.3. Bacias Endorreicas

Bacias endorréicas referem-se a sistemas de drenagem que convergem para o interior de áreas emersas e não apresentam conexão hidrológica com o oceano (DORSAZ *et al.*, 2013). Por vezes podem apresentar acumulação de sedimentos continentais oriundos do processo erosivo e deposicional do relevo no entorno, seja em ambiente fluvial ou lacustre. Representam, aproximadamente, 20% da superfície terrestre e localizam-se, em sua maioria, nas regiões áridas do planeta (NICHOLS, 2004; NICHOLS, 2007; DORSAZ *et al.*, 2013) (Figura 2.05). Dentre as bacias endorréicas existentes na superfície terrestre, destacam-se o Mar Cáspio e Aral na Ásia Central, Lago Chade na África, Lago Titicaca na América do Sul, Lago Eyre na Austrália e o Great Salt Lake na América do Norte. Seu sistema de drenagem convergem para áreas topográficas mais rebaixadas, podendo formar lagos permanentes, ou lagos efêmeros em regiões mais secas, depósitos aluviais ou depósitos de sais (DORSAZ *et al.*, 2013).

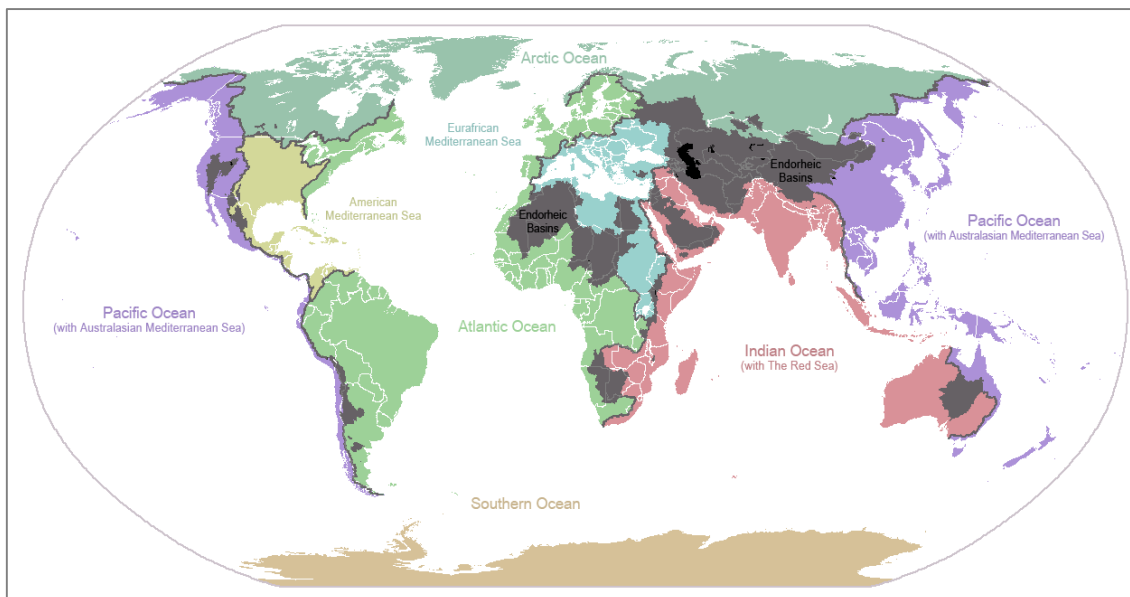


Figura 2.05: Localização das principais bacias endorréicas do mundo. O destaque cinza representa a área das bacias endorréicas, o destaque preto representa os grandes lagos.
Fonte: <http://i.imgur.com/Z19wE.png> Acesso em: Janeiro, 2020.

A dinâmica hidrológica de bacias endorreicas é controlada por diferentes fatores, principalmente as que se localizam em ambientes áridos e semi-áridos. Dentre os fatores, cabe destacar: (i) a irregularidade dos eventos pluviométricos, tanto em magnitude quanto em intensidade na bacia; (ii) taxas de evaporação muito elevadas, afetando significativamente o balanço hídrico; (iii) a influência da orografia na flora e na fauna e, também, nos processos hidrológicos; (iv) baixas taxas de interceptação devido à baixa cobertura vegetal; (v) as características da superfície e do substrato rochoso controlam a infiltração; (vi) e as águas subterrâneas podem contribuir significativamente para o fornecimento de umidade para a superfície e o subsolo (LAITY, 2008; DORSANZ *et al.*, 2013). Diante destas características hidrológicas, as bacias endorreicas localizadas em ambientes áridos e semi-áridos não apresentam drenagem superficial integrada em sua maioria. Apenas as bacias endorreicas situadas em ambientes úmidos apresentam sistema de drenagem integrado e, por vezes, podem apresentar lagos em períodos do ano.

Diferentemente das bacias exorreicas, as endorréicas não sofrem influência da mudança do nível de base dos oceanos. Em ambientes úmidos, a variação do nível do lago da bacia é que vai influenciar na dinâmica erosiva e deposicional, já em ambientes secos, o nível de base será influenciado pela espessura dos depósitos sedimentares (NICHOLS, 2004).

A formação de bacias endorreicas pode estar associada aos forelands em ambientes orogênicos, como no caso da bacia do rio Ebro na Espanha antes de ser incorporada para o sistema exorreico do oceano (GARCIA-CASTELLANOS & CLOETINGH, 2012). Além disso, sua gênese pode ocorrer graças aos processos de rifteamento, pois estes promovem a formação de uma depressão topográfica e a convergência do sistema de drenagem adjacente. Já seu fim, ou seja, sua incorporação ao sistema exorréico, pode ocorrer por duas maneiras: ou por preenchimento sedimentar das bacias e transbordamento do sistema de drenagem endorreico, ou por mecanismos de capturas fluviais promovidas por bacias exorreicas adjacentes (VACHERAT *et al.*, 2018; STRUTH, *et al.*, 2019). Ambos os processos foram observados em diferentes regiões do mundo como, por exemplo, nos Appalaches (GALLEN & WEGMANN, 2015) e na Namíbia (BIERMANN & CAFFEE, 2001). Entretanto, o caso que tem recebido maior destaque refere-se às paleobacias endorréicas da Península Ibérica que foram incorporadas aos rios Ebro e Douro (ANTÓN, *et al.*, 2012; GARCIA-CASTELLANOS *et al.*, 2015; STOKES *et al.*, 2018; VACHERAT *et al.*, 2018; STRUTH *et al.*, 2019; CUNHA *et al.*, 2019). No caso da paleobacia endorreica do rio Douro, seu fim teve origem no rompimento promovido pelo pulso erosivo remontante advindo da alteração do nível de base do Oceano Atlântico. Este pulso erosivo alcançou as bacias endorréicas e transformou o sistema de drenagem em exorreico. O processo promoveu forte incisão fluvial (ANTÓN *et al.*, 2018) e intensa erosão dos sedimentos depositados na antiga bacia endorreica, restando apenas relictos na paisagem (GARCIA-CASTELLANOS *et al.*, 2015; CUNHA *et al.*, 2019). Paralelamente, houve transbordamento de paleobacias interiores (CUNHA *et al.*, 2019; STRUTH *et al.*, 2019), fato que acelerou o processo de incorporação do interior da Península Ibérica à rede de drenagem exorreica, seja do rio Ebro ou do rio Douro.

O processo de incorporação da bacia endorreica no interior da Península Ibérica pelo sistema exorreico Atlântico do rio Douro, pode servir como processo análogo ao ocorrido no Planalto Sudeste. Acredita-se que o Planalto Sudeste brasileiro, antes da atual configuração do sistema fluvial da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul, apresentava sistemas de drenagens fechados, portanto, endorreicos, que foram incorporados ao sistema atlântico por erosão remontante e capturas de drenagem. Neste sentido, as paleodrenagens endorreicas podem ter sido

formadas durante o tectonismo Cenozoico que ocorreu no Planalto Sudeste sendo, posteriormente, incorporado ao nível de base atlântico até a configuração atual e formação da BHRPS. Na presente tese, tentar-se-á identificar características e evidências morfológicas e morfométricas que apontam para períodos de endorreísmo no Planalto Sudeste que se assemelham à outros locais, como o caso do rio Douro (CUNHA *et al.*, 2019) e o sistema fluvial da Namíbia (BIERMANN & CAFFEE, 2001).

3. Procedimentos Metodológicos

No presente estudo foram utilizados procedimentos e análises morfológicas e morfométricas do sistema de drenagem e do relevo da BHRPS. As abordagens morfológicas estão relacionadas às respostas dos sistemas de drenagem e do relevo para os condicionantes litológicos e estruturais e, também, podem auxiliar a compreender eventos e processos geomorfológicos pretéritos (SILVA & SANTOS, 2010; BISHOP, 1995). Já a abordagem morfométrica está associada à utilização de equações matemáticas para extração de informações geomorfológicas e baseia-se nas informações topográficas e altimétricas do relevo (CHRISTOFOLETTI, 1980). A combinação de ambas as abordagens possibilitam a interpretação dos mecanismos de evolução geomorfológica da paisagem.

Neste capítulo serão apresentados os procedimentos metodológicos utilizados para o desenvolvimento e alcançar os objetivos da pesquisa. Os procedimentos metodológicos utilizados para tal, foram: (i) revisão bibliográfica sobre a temática; (ii) construção de um banco de dados temáticos georreferenciados; (iii) análise morfológica e morfométricas dos sistemas de drenagem e do relevo; (iv) trabalhos de campo; (v) processamento de dados em ambiente SIG e análise dos resultados.

Os procedimentos mencionados anteriormente deram origem a três artigos científicos que foram submetidos para publicação em revistas acadêmicas. O primeiro artigo aborda aspectos morfológicos e morfométricos no divisor de drenagem entre o rio Paraíba do Sul e o rio Paraná, na sub-bacia do rio Paraíbuna, intitulado “Morfogênese do Divisor Hidrográfico Paraná/Paraíba Do Sul: O caso da Sub-Bacia do Paraíbuna”, publicado na Revista Brasileira de Geomorfologia. O segundo artigo trata de parâmetros morfométricos e morfológicos do sistema de drenagem da BHRPS e a possível ocorrência de bacias endorreicas no planalto sudeste, intitulado “Bacias Endorreicas e Captura Fluvial na Morfogênese da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul” submetido à Revista Brasileira de Geomorfologia. Por fim, será elaborado um artigo com a compilação dos dados apresentados na presente tese, enfatizando episódios de endorreísmo no planalto sudeste, bem como, a evolução do sistemas de drenagens em margens do tipo Rife que será submetido para revista Journal Of South America Earth Science. Os artigos já submetidos serão inseridos ao final da Tese como Apêndices.

3.2. Compilação e Estruturação de Banco de Dados

Esta etapa consistiu na compilação dos dados temáticos que seriam utilizados para a realização do presente estudo, referentes à hipsometria, rede de drenagem, geologia e geomorfologia da BHRPS. Inicialmente, foram utilizadas a base cartográfica do IBGE na escala de 1:50.000 através de cartas topográficas, totalizando 124 cartas para a área da BHRPS. As cartas topográficas estão disponíveis para download na biblioteca virtual do IBGE (<https://biblioteca.ibge.gov.br/>) e, posteriormente, as mesmas foram georreferenciadas no software ArcGIS. As cartas topográficas, inicialmente, foram utilizadas na delimitação da bacia estudada e auxiliou na caracterização geomorfológica da área de estudo junto com a obtenção dos resultados obtidos em outros procedimentos. Também foi utilizada a rede de drenagem disponibilizada pela Agência da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul (AGEVAP) contendo informações topológicas mais refinadas do sistema de drenagem da área de estudo, bem como, a toponímia dos rios e afluentes do rio Paraíba do Sul (<http://sigaceivap.org.br/map#>).

Além da base cartográfica do IBGE e da AGEVAP, foram obtidas imagem de radar SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) refinadas no âmbito do projeto TOPODATA do Instituto Espacial de Pesquisas Espaciais (INPE) (VALERIANO & ROSSETI, 2012). Ao todo, foram utilizadas 9 imagens de radar que estavam inseridas na área de estudo que foram integradas em um mosaico único através do software ArcGIS. A partir da imagem SRTM mosaicada foram extraídas informações altimétricas e derivados dados morfométricos, como: anomalias de drenagem (índice RDE), lineamentos estruturais, Swath Profile, NProfile, valores de X, Stream Power Index (SPI), Mapas Seppômen.

A utilização dos dados mencionados possibilitou a análise morfológica e morfométricas do sistema de drenagem e do relevo na BHRPS, bem como, na identificação de feições morfológicas relacionadas a processos de reorganização fluvial na evolução do planalto sudeste brasileiro.

3.1. Revisão Bibliográfica

A revisão bibliográfica objetivou contextualizar o tema, situando o leitor e adequando a tese quanto aos conhecimentos científicos já publicados sobre o tema. Neste sentido, foram consultados diferentes referências bibliográficas relacionadas à temática e à área de estudo.. Além disso, foram consultados textos sobre diferentes temáticas para a presente tese, dentre elas destacam-se: os aspectos físicos da área de estudo, como clima, geologia, geomorfologia e solos; rearranjo fluvial; evolução de drenagem em margens do tipo Rifte; contexto geológico e geotectônico regional; utilização de parâmetros morfométricos para análise de evolução do relevo.

3.3. Análise Hipsométrica e Morfológica do relevo

O mapa hipsométrico possibilita a visualização da diferença altimétricas do relevo, além de espacializar o relevo e seus compartimentos topográficos. Sua visualização se dá pela diferenciação de cores de acordo com a definição de intervalos altimétricos. A partir da visualização das informações altimétricas, foram identificados, ao longo da BHRPS, feições morfológicas importantes para a presente tese, tais como, divisores rebaixados, estrangulamentos topográficos (gorges), depressões topográficas, dentre outros.

Este mapa foi elaborado a partir do modelo digital de elevação (MDE) extraído por meio de imagem radar do projeto TOPODATA, com resolução espacial de 30m (VALERIANO & ROSSETI, 2012). A partir do MDE, foi extraído o relevo sombreado utilizando a ferramenta Hillshade do ArcGIS, mantendo-se a angulação vertical em 45°. O relevo sombreado possibilita a melhor visualização da morfologia do relevo, bem como, é possível extrair os lineamentos positivos e negativos da bacia. Através da interpretação espacial do comportamento topográfico do relevo foram realizadas análises da morfologia do relevo, identificando mudanças abruptas na altimetria do relevo, bem como, foram extraídos perfis topográficos ao longo da BHRPS. Ao todo, foram extraídos 3 perfis topográficos ao longo do divisor da bacia do rio Paraíba do Sul na Serra da Mantiqueira, para avaliar a morfologia e o comportamento topográfico desta porção do divisor da bacia. Além disso, foram traçados perfis topográficos ao longo da

calha principal do rio Paraíba do Sul para analisar a morfologia do vale e identificar possíveis paleodivisores.

3.4. Delimitação da Bacia Hidrográfica e Sub-bacias

Na presente tese foi utilizada a bacia de drenagem como escala de análise, uma vez que, no entendimento dos processos hidrológicos e erosivos, a bacia de drenagem constitui-se na unidade de análise da paisagem, pois segundo Coelho Netto (1994) caracteriza um sistema hidrogeomorfológico, onde as mudanças de ordem natural ou antrópicas que operam no fornecimento de energia causam um reajuste nas formas e processos, de acordo com suas intensidades.

A delimitação da bacia de drenagem foi realizada utilizando o software ArcGis 10.5, tendo como base as curvas de nível extraídas das cartas topográficas do IBGE. A delimitação da bacia permite inferir o recorte espacial da pesquisa, assim como, identificar os cursos d'água que compõem o sistema de drenagem do rio Paraíba do Sul. Além disso, foi realizado o mapeamento das sub-bacias do rio Paraíba do Sul com o objetivo de analisar sua distribuição espacial, área e morfologia dos cursos de drenagem afluentes do rio Paraíba do Sul.

3.5. Análise da Rede de Drenagem e Perfis Longitudinais

A maneira como se desenvolve a rede de drenagem está intimamente ligada ao substrato geológico (HOWARD, 1967). Neste sentido, através do MDE e das cartas topográficas do IBGE foram analisadas a distribuição, o arranjo e conformação do sistema de drenagem da BHRPS e sua correlação espacial com os divisores, vales e depósitos cenozoicos presentes na área de estudo. Os procedimentos para análise morfológica da rede de drenagem foram elaborados a partir da base cartográfica do IBGE na escala de 1:50.000.

Para a interpretação e análise morfológica da BHRPS, atentou-se para a identificação de anomalias de drenagem, como cotovelos de drenagem, e processos de rearranjo fluvial. Além disso, foram identificadas cursos de drenagem com orientação de fluxo inversos à calha principal do rio Paraíba do Sul. A análise da rede de drenagem também levou em consideração os padrões geométricos dos

canais fluviais despontando suas direções, formas, densidade e organização. Em relação aos padrões de drenagem, focalizou-se para identificação de padrões de drenagem do tipo radial centrípeta, que pode ser evidências de drenagens endorreicas no Planalto Sudeste.

O perfil longitudinal de canal tem como função representar a declividade ou gradiente de um rio, através da relação entre a altimetria e o comprimento de determinado curso d'água (CHRISTOFOLETTI, 1974). Os mesmos são realizados ao longo de toda a extensão do rio, desde a sua nascente até a foz ou confluência com outro rio. A análise dos perfis longitudinais é uma ferramenta bastante importante para os estudos geomorfológicos e são bastante utilizados para a identificação de mudanças abruptas ou não na declividade dos rios.

A elaboração dos perfis longitudinais se deu a partir da visualização em ambiente SIG dos dados hipsométricos e da rede de drenagem concomitantemente. Diante disso, o eixo principal da drenagem do rio Paraíba do Sul foi traçado, desde a sua nascente até atingir sua foz, para elaboração do perfil longitudinal. Também foram extraídos perfis longitudinais de drenagens ao longo do divisor hidrográfico Paraíba do Sul – Paraná com o objetivo de analisar as diferenças morfológicas dos rios que drenam para o gráben sudeste e os rios que drenam para o reverso da escarpa da Mantiqueira. Para confecção dos perfis, utilizou-se a ferramenta 3D analyst para a geração do perfil longitudinal que, posteriormente, foi analisado em conjunto com outros dados.

3.6. NProfile

Foram extraídos perfis longitudinais de drenagem normalizados de rios afluentes do rio Paraíba do Sul e obtidos seus índices de concavidade (Concavity Index). Estas informações foram geradas a partir da utilização da Ferramenta NProfile que cria perfis normalizados de drenagens e calcula o índice de concavidade (CT) da drenagem a partir da morfologia do perfil longitudinal (PÉREZ-PEÑA *et al.*, 2017). O valor de concavidade é definido como o percentual área do triângulo da OAB (Fig. 3.01) entre o perfil do rio e o linha reta que conecta a cabeceira à foz. Além disso, indica o máximo de concavidade (Cmax) e atribui um valor de distância entre o Cmax e a cabeceira do afluente (dL) (Figura 3.01).

De maneira geral, os perfis longitudinais em condições de equilíbrio apresentam feição côncava para cima, demonstrando o ajuste estabelecido pela denudação e remodelamento do relevo (CHRISTOFOLETTI, 1974; PÉREZ-PEÑA *et al.*, 2017). Em alguns casos, os perfis das drenagens podem apresentar pontos de inflexão, conhecidos como knickpoints, que alteram a morfologia côncava do mesmo (BURBANK & ANDERSON, 2013). As drenagens que apresentam valores de CT elevados nos perfis normalizados, tendem a ser mais dissecadas e próximas do perfil de equilíbrio. Normalmente, as drenagens que se situam mais distantes da foz do rio principal tendem a apresentar valores de CT menores, enquanto os rios mais próximos à foz apresentam valores de CT maiores.

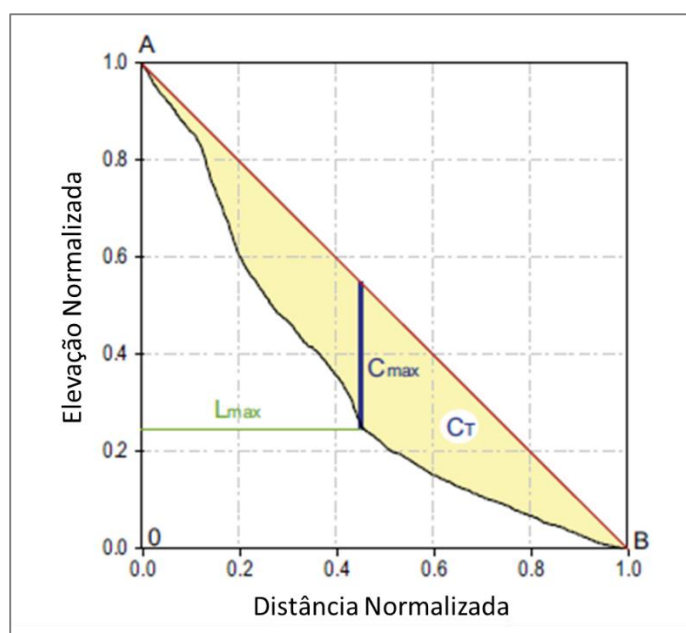


Figura 3.01: Perfil normalizado e parâmetros associados. A: Nascente; B: Foz; CT: concavidade, expressa a respectiva porcentagem do triângulo AOB; Cmax: máximo de concavidade; Lmax: posição da concavidade máxima em relação à cabeceira. Fonte: Pérez-Peña *et al.*, 2017

Ayaz & Dhali (2019) analisaram perfis normalizados de drenagem na porção do Himalaia para verificar a influência da Neotectônica na morfologia dos canais. Os autores perceberam que o índice de concavidade era influenciado por eventos tectônicos recentes, e os rios que apresentavam menores valores de concavidade representam os canais influenciados por estes movimentos. Stutenbecker *et al.* (2016) utilizaram perfis longitudinais de drenagem normalizados para a análise de tributários na porção dos Alpes Suícos e associaram a morfologia de canais de drenagem com eventos de glaciação em longo tempo,

contudo, perceberam a influência da erosão diferencial pela variação litológica na morfologia dos perfis de canais. Fekete & Vojtko (2014) analisaram a influência de falhamentos e neotectônica nos canais de drenagem na região da Eslováquia, associando canais com perfis convexos e retilíneos submetidos à atividades tectônicas recentes.

Na presente tese, foram extraídos perfis normalizados de afluentes do rio Paraíba do Sul com o objetivo de avaliar o índice de concavidade e sua correlação com a distância da foz, para elucidar quais afluentes estão mais ajustados ao nível de base. Os resultados obtidos através deste procedimento podem contribuir na identificação de afluentes do rio Paraíba do Sul que situam-se longe da foz e apresentam elevado índice de Cmax e, consequentemente, ajustado ao nível de base. Esta abordagem contribui no entendimento no grau de ajuste dos principais afluentes da bacia para o nível de base do rio Paraíba do Sul.

3.7. Paleosuperfície – Mapas Seppômen

A elaboração de mapas paleotopográficos, através da rotina Seppômen, revelam a configuração topográfica pretérita à dissecação atual dos sistemas de drenagem. A metodologia Seppômen foi introduzido no Brasil por Motoki *et al.* (2008), e sua abordagem cartográfica baseia-se no preenchimento de vales (COUTO *et al.*, 2012). A partir do cruzamento dos dados do Mapa Seppômen com os dados topográficos atuais é possível estabelecer as áreas com maior dissecação e entalhamento fluvial e as áreas mais preservadas como relictos da paleopaisagem. No Brasil, ainda são escassos os trabalhos com mapas Seppômen para análises regionais, com destaque para Couto *et al.* (2012) que analisaram a borda planáltica do Paraná, e Marques Neto *et al.* (2019) que analisou a paleotopografia da Serra da Mantiqueira e as taxas de retração da escarpa.

Os procedimentos para confecção dos mapas Seppômen consistem na divisão da área de estudo em células quadráticas de mesmo tamanho e, posteriormente, extração do maior valor altimétrico dentro de cada célula (Figura 3.02). Os outros valores são desconsiderados na rotina que se segue, ignorando, assim, as morfologias de entalhamento dos vales. Com os valores máximos de altimetria de cada célula, foi realizado interpolação dos dados através da ferramenta

IDW no Arcgis 10.5. O tamanho das células varia de acordo com o tamanho da área de estudo, recomenda-se células de tamanho maiores para análises regionais e células com tamanho menores para análises em escalas locais (MARQUES NETO *et al.*, 2019). Quanto maior for o tamanho da célula maior a extrapolação paleotopográfica do relevo.

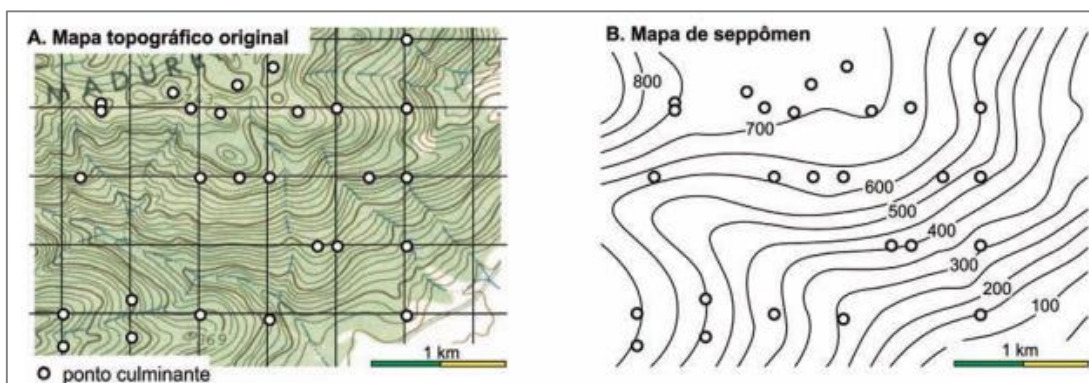


Figura 3.02: Elaboração do mapa Seppômen segundo Motoki *et al.* (2009). (A) apresenta o modelo de criação de intervalos de grades. (B) representa o resultado do modelo de intervalos de grade.

Na região sudeste do Brasil, foram realizadas análises topográficas com a utilização da metodologia Seppômen (MOTOKI *et al.*, 2008; AIRES *et al.*, 2012; MARQUES NETO *et al.*, 2019). Motoki *et al.* (2008) analisaram a origem e formação do maciço sienítico do Medanha no Rio de Janeiro através da elaboração e análise de mapas Seppômen e características morfológicas do maciço. Aires *et al.* (2012) realizaram a rotina de mapas Seppômen na Serra do Mar para identificação de unidades geomorfológicas, bem como, analisar o tectonismo Cenozoico na formação da escarpa de falha desta serra. Estes autores analisaram o divisor da Serra do Mar na porção de Teresópolis e Nova Friburgo e identificaram 3 unidades geomorfológicas divididas por falhamentos reativados no tectonismo Cenozoico (AIRES *et al.*, 2012). Na porção da Serra da Mantiqueira, Marques Neto *et al.* (2019) analisaram as escarpas das cristas quartzíticas e a correlação entre soerguimento x desnudação em margens do tipo rifte através da elaboração de mapas Seppômen. Os resultados apontam para uma regressão da escarpa com formação de patamares escalonados oriundos de soerguimento tectônico (MARQUES NETO *et al.*, 2019).

Na presente tese, a elaboração dos mapas paleotopográficos através da rotina de Seppômen objetiva identificar depressões topográficas ao longo do

planalto sudeste que podem auxiliar na identificação de eventos de endorreísmo preteritamente. Os mapas paleotopográficos também podem ajudar na identificação de paleodivisores que separavam bacias de drenagem no Planalto Sudeste. Diante disso, foram elaborados mapas Seppômen ou mapa de nivelamento de topos com diferentes tamanhos de grades de células para a BHRPS, sendo elas: 5km x 5km; 4km x 4km; 3km x 3km; 2km x 2km; 1km x 1km. Os mapas com diferentes tamanhos de células possibilitam a reconstrução topográfica da área da BHRPS, permitindo análises em diferentes escalas espaciais e temporais. As grades que apresentam áreas maiores estão associadas a escalas temporais maiores, enquanto que as grade de áreas menores, apresentam escalas temporais mais restritas.

3.8. *Swath Profile*

Os perfis de Swath são utilizados para análise do comportamento topográfico e morfológico e possibilita a identificação de feições geomorfológicas e atributos estruturais controladores do relevo. A construção do perfil Swath se dá a partir da definição de uma janela móvel da superfície na qual são extraídos os valores máximos, médios e mínimos da topografia. Através da interpretação dos perfis é possível compreender a dinâmica erosiva da superfície pela variação altimétrica entre os valores máximos e mínimos obtidos, bem como, auxiliam na análise de evolução de longo-tempo do relevo (CHEN *et al.*, 2015; SORDI *et al.*, 2018).

Na presente tese, foram elaborados perfis de Swath ao longo do divisor da Serra da Mantiqueira para melhor compreensão da morfologia do relevo ao longo do divisor, bem como, comparar a amplitude de relevo na região. Estes perfis são utilizados para demonstrar os desníveis topográficos que existem em trechos de determinada região, como a altitude de seus topos e vales, além da inclinação das encostas. Auxilia no entendimento do comportamento topográfico em diferentes porções da bacia contribuindo para correlação com outras variáveis, tais como padrões de drenagens e geológicas, de acordo com as características do relevo de cada ambiente. A utilização deste procedimento na presente tese objetivou compreender as variações altimétricas dos níveis topográficos entre a bacia do rio

Paraíba do Sul e as bacias adjacentes em diferentes trechos. A partir disso, poder-se-ia identificar áreas com maior ou menor dissecação.

Neste sentido, foram traçados três perfis topográficos ao longo do divisor do rio Paraíba do Sul na Serra da Mantiqueira, com o objetivo de analisar o grau de dissecação do divisor em diferentes setores e, conseqüentemente, refletir sobre a evolução do relevo nesta região. Para tanto, utilizou-se a ferramenta Swath Profile através do ArcGis 10.5 que gera perfis com os valores máximos, médios e mínimos ao longo de uma janela predefinida de 5km (Figura 3.03) (HERGARTEN *et al.*, 2014; PÉREZ-PEÑA *et al.*, 2017). Os resultados desta análise permitem qualificar o grau de dissecação do relevo, através da maior ou menor diferença entre os valores máximos e mínimos.

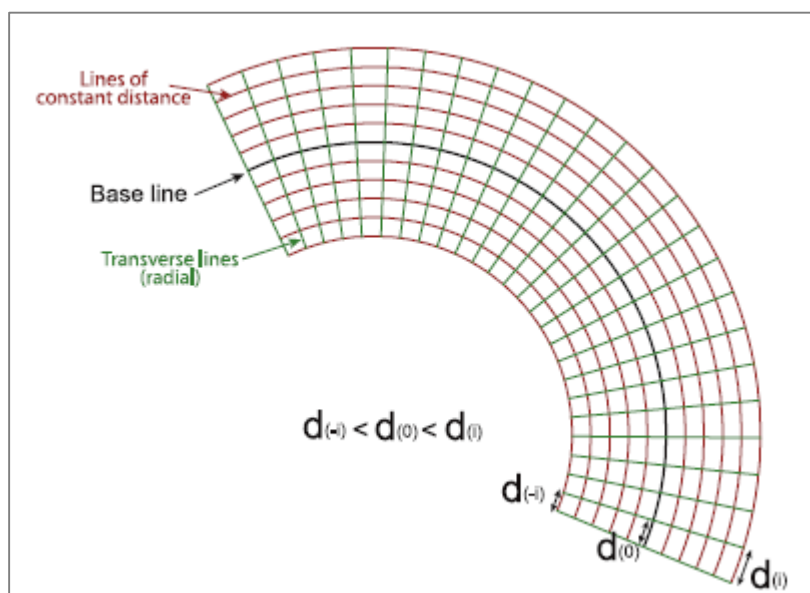


Figura 3.03: Modelo de coleta de dados da ferramenta Swath Profile. Fonte: Pérez-Peña *et al.*, 2017.

3.9. Análise χ

Outro parâmetro morfométricos utilizado foi a quantificação dos valores de Chi (χ) ao longo do mesmo divisor dos perfis elaborados (WILLET *et al.*, 2014; SORDI *et al.*, 2018). O fator Chi avalia o potencial erosivo dos rios e a migração de divisores hidrográficos, sendo uma ferramenta bastante útil para analisar a evolução dos sistemas de drenagem. Além disso, os valores de χ permitem inferir

canais de drenagem e divisores hidrográficos que estão em estágios de equilíbrio dinâmico ou em estágio de desequilíbrio e migração de divisores por meio de capturas fluviais (PERRON & ROYDEN, 2013; WILLET *et al.*, 2014). Com isso, possibilita inferir a migração de divisores hidrográficos por meio dos valores de χ , onde os menores valores para χ representam as drenagens com maior potencial erosivo, enquanto que valores elevados para χ representam os rios que serão capturados (Figura 3.04).

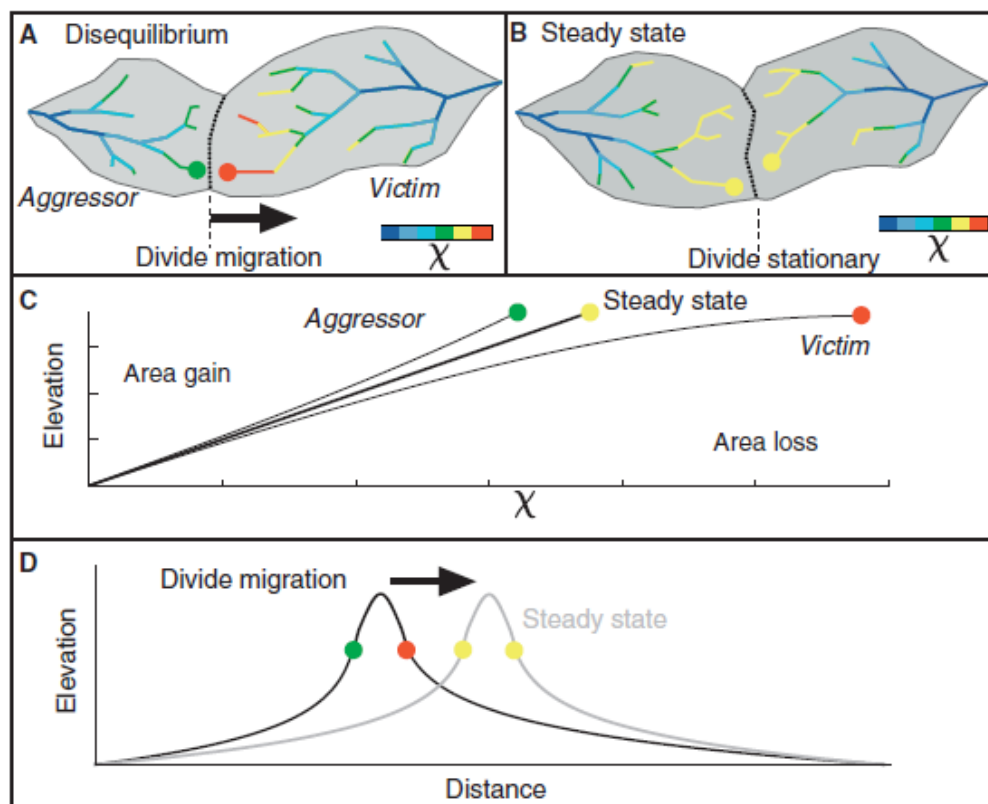


Figura 3.04: Modelo de análise do Fator chi em bacias hidrográficas e grau de estabilização de divisores hidrográficos. (a) ambiente em desequilíbrio com potencial ocorrência de captura fluvial e migração de divisor. (b) ambiente em estágio equilibrado e divisor estacionário. (c) relação entre elevação e área perdida de canais de drenagem. (d) exemplo de migração de divisor.

Fonte: Willet *et al.*, 2014.

Para a presente Tese, foram extraídos os valores de χ através do script topotoolbox 2 no software Matlab, no qual foram inseridas linhas de códigos para análise espacial e altimétrica do modelo digital de elevação utilizado na pesquisa. Este procedimento foi realizado ao longo do divisor da Serra da Mantiqueira que, juntamente com os resultados dos perfis de Swath Profile, auxiliam no

entendimento da morfogênese do relevo naquela região. Os resultados obtidos com o fator χ permitem avaliar o grau de estabilidade do divisor de drenagem, podendo apontar para um divisor ajustado ou para a migração do divisor (Figura 3.05). Neste sentido, através da obtenção dos valores de χ ao longo da Serra da Mantiqueira podem ser identificadas áreas em que ocorrem a migração do divisor por mecanismos de rearranjo de drenagem e capturas fluviais, assim como, áreas mais estabilizadas já próximas do ajuste ao nível de base. Sordi *et al.* (2018) utilizou a análise dos valores de χ para avaliar o potencial erosivo entre bacias que drenam para compartimentos geomorfológicos distintos na região sul do Brasil. Os autores evidenciaram que os rios que drenam para o nível de base atlântico apresentam valores de χ menores e, conseqüentemente, maior potencial erosivo (SORDI *et al.*, 2018). Este mesmo comportamento foi evidenciado por Struth *et al.* (2019) em comparação com as bacias do rio Douro e Ebro em Portugal e Espanha. χ .

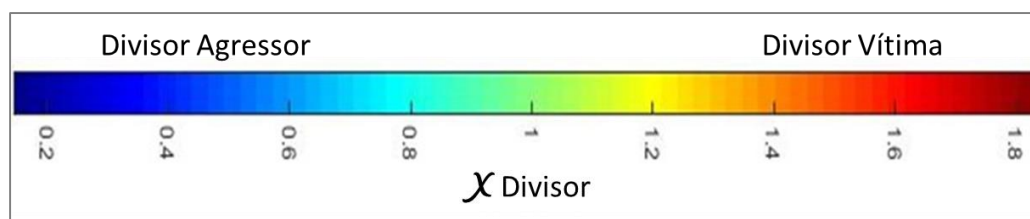


Figura 3.05: Valores de χ e seu significado.

Fonte: Willet *et al.*, 2014.

3.10. Índice RDE

O índice RDE ou índice relação declividade-extensão foi proposto por Hack (1973) e baseia-se na interpretação do perfil longitudinal dos canais de drenagem, correlacionando a declividade e extensão do canal por trechos. Esta ferramenta de análise permite a identificação de anomalias ao longo do perfil, tais como, o aumento de energia do fluxo de drenagem em determinado trecho baseando-se nas informações de declividade (SALAMUNI *et al.*, 2013). É obtido através da multiplicação da declividade do segmento pela distância entre o segmento e a nascente do rio (Figura 3.06). Alguns estudos utilizaram o índice RDE para

identificar áreas anômalas associadas à knickpoints e, conseqüentemente, áreas com interesse morfotectônico e morfoestrutural.

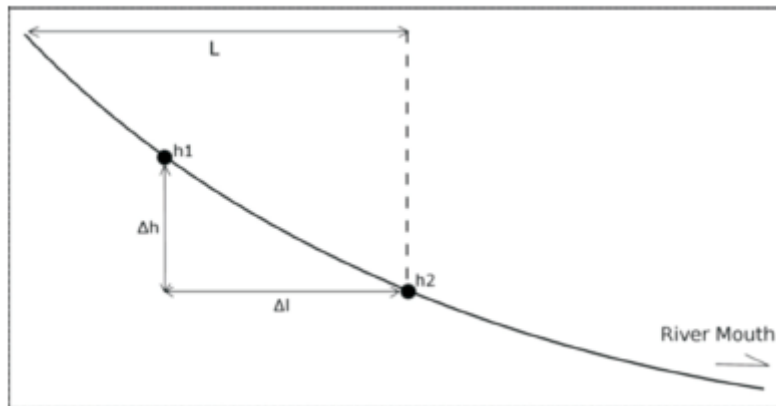


Figura 3.06: Perfil longitudinal de um rio mostrando o procedimento para o cálculo do índice RDE.

Fonte: Salamuni *et al.*, 2013.

Para extração do índice RDE e identificação das anomalias de drenagem na área de estudo, utilizou-se o software Knickpoint Finder (QUEIROZ *et al.*, 2014; SALAMUNI *et al.*, 2013) que se baseia no índice de Hack (HACK, 1973) para a identificação de anomalias de drenagem ao longo do perfil longitudinal dos rios. O Knickpoint Finder é um software baseado em linguagem Python que automatiza o processo de análise morfológica e morfométricas da superfície utilizando dados topográficos de modelos digitais de elevação (MDEs) (QUEIROZ *et al.*, 2014). Os dados obtidos são pontos de anomalias de 1ª e 2ª ordem, definidos como corredeiras e quedas d'água respectivamente. Etchebehere *et al.* (2004) propuseram o índice de relação declividade encosta (RDE) que corresponde à uma derivação do índice de Hack. O índice baseia-se no aumento da energia da corrente fluvial em determinado ponto do segmento de drenagem em função de sua declividade da superfície (ETCHEBEHERE *et al.*, 2004). Neste sentido, o índice RDE pode ser calculado pela seguinte equação:

$$RDE = (\Delta H / \Delta L) \cdot L, \text{ onde:}$$

ΔH = diferença altimétrica entre as extremidades do segmento; ΔL = extensão do trecho em planta; L = distância entre a extremidade inferior desse trecho e a nascente do rio.

Na presente tese, este procedimento foi realizado ao longo do divisor hidrográfico da Serra da Mantiqueira entre o rio Paraíba do Sul e do rio Grande, especificamente na sub-bacia do rio Paraíba. Esta análise busca evidenciar anomalias que indicam mecanismos de reordenamento de sistemas de drenagem e identificar áreas que ainda estão em ajuste do perfil longitudinal de drenagem. Neste sentido, podem ser caracterizados os canais de drenagem nesta porção do divisor e correlacionar com a morfogênese desta feição. Por fim, foi elaborado mapa de densidade de knickpoints para melhor visualização dos dados.

3.11. Lineamentos e Orientação de Drenagem

Este procedimento tem por objetivo representar as orientações preferenciais das estruturas geológicas da área de estudo. Para este procedimento, os lineamentos foram traçados diante análise das imagens orbitais SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) (VALERIANO & ROSSETTI, 2012). A partir do SRTM extraiu-se o relevo sombreado utilizando a ferramenta *hillshade* do software Arcgis que auxilia na visualização da variação topográfica do relevo, bem como, permite melhor interpretar as direções e lineamentos do relevo. Para a identificação dos lineamentos, foi mantida a iluminação vertical com angulação de 45°, assim como a obtenção do relevo sombreado. Foram obtidos os lineamentos positivos e negativos da área em estudo, sendo os positivos considerados como os lineamentos e cristas de serras e morros, enquanto os negativos estão associados aos vales fluviais. Por fim, foi executada a ferramenta *Cogo* para obtenção dos valores referentes aos azimutes dos lineamentos e, posteriormente, adicionadas ao *OpenStereo* 0.1.2 para confecção da roseta de orientação.

Foram traçados lineamentos estruturais através do software ArcGis 10.1, tendo como produto final um arquivo no formato *shapefile* com informações topológicas lineares. Após este procedimento, utilizou-se a ferramenta *Cogo* no Toolbox do ArcGis 10.1 para a obtenção dos valores azimutais de cada lineamento identificado. Com os valores de azimute extraídos, os dados foram tratados no Excel e gerada roseta de orientação dos mesmos no software *OpenStereo* 0.1.2 para avaliar o controle estrutural regional. Além disso, foram extraídas as orientações dos canais de 1ª e 2ª ordem da área de estudo para correlação com os resultados

obtidos dos lineamentos estruturais. A análise destes dados possibilita identificar possíveis controles estruturais nos sistemas de drenagem na área de estudo.

3.12. Stream Power Index (SPI)

O Stream Power Index (SPI) indica o potencial erosivo dos canais de determinada área através da interpolação dos dados de declividade e acumulação do fluxo de drenagem (MOORE *et al.*, 19991; CHEN & YU, 2011; ZHANG *et al.*, 2015) (Figura 3.07). A análise de valores de SPI juntamente com outros parâmetros morfométricos contribui no entendimento de processos erosivos, transporte de sedimentos e na dissecação do relevo (ZHANG *et al.*, 2015). Através da interpolação matemática de dados de declividade com acumulação de fluxo de drenagem são identificadas áreas com maior potencial erosivo em bacias hidrográficas, podendo comparar com bacias vizinhas e perceber o comportamento erosivo entre elas. Neste sentido, podem ser identificadas bacias que possuem valores de SPI elevados em relação à bacia adjacente que configuram áreas com potencial erosivo maior. Estes valores podem ser correlacionados com outros parâmetros morfométricos e características, tais como variação de níveis de base, índice RDE dentre outros, podendo indicar bacias com maior potencial de capturar áreas por erosão de cabeceiras.

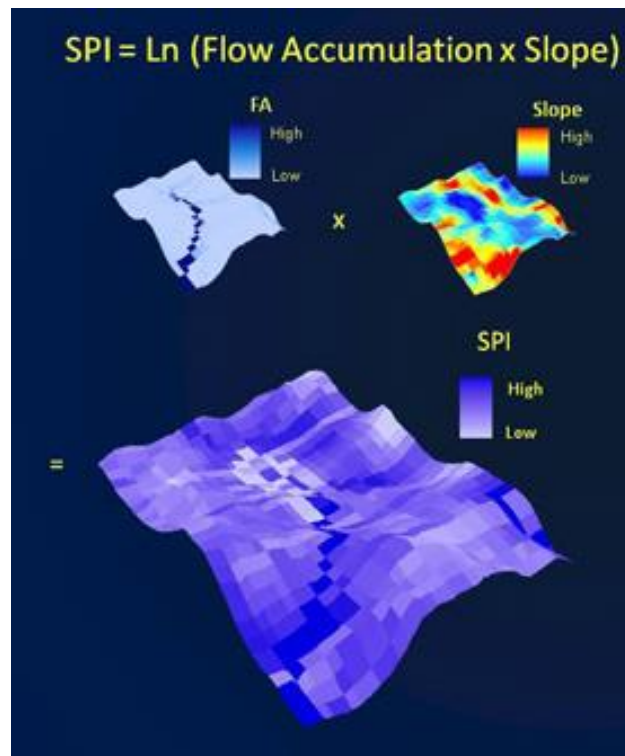


Figura 3.07: Modelo de obtenção dos valores de SPI em ambiente GIS.

Fonte Galzki *et al.*, 2011.

Na presente tese, foram obtidos os valores de SPI ao longo do divisor da Serra da Mantiqueira na sub-bacia do rio Paraíbuna (afluente do rio Paraíba do Sul) e da sub-bacia do rio Grande (afluente do rio Paraná). Ao todo, foram analisadas 14 bacias de drenagem, sendo 7 que drenam a frente escarpada da Serra da Mantiqueira para o rio Paraíbuna; e 7 que drenam o reverso da Serra para o rio Grande. Este procedimento tinha por objetivo avaliar a influência da diferença entre os níveis de base das bacias e sua relação com o potencial erosivo entre elas e, consequentemente, identificar áreas com potencial para capturas de drenagem e migração de divisor. Para obtenção dos valores de SPI, utilizou-se como base o MDE obtido pelo projeto TOPODATA (VALERIANO & ROSSETI, 2012) que através do Toolbx do ArcGIS foram obtidas as informações de fluxo acumulado e de declividade em arquivos separados no formato raster. Estes arquivos foram utilizados para a interpolação e cálculo do SPI, que foi elaborado por Danielson (2013) cujos valores são obtidos através da seguinte equação:

$$SPI = \text{Ln} ("Acumulação"+0.001)*("Declividade"/100)+0.001)$$

, onde:

SPI = Stream Power Index; “Acumulação”: Raster de Fluxo acumulado da drenagem; “Declividade”: Raster de declividade.

3.13. Morfogênese da BHRPS e compilação dos dados

Através da análise dos dados produzidos na presente tese em conjunto com dados disponibilizados em outros trabalhos, elaborar-se-á uma proposta para a morfogênese da BHRPS. Esta proposta basear-se-á nos aspectos morfológicos e morfométricos obtidos na presente tese e nos referencias teóricos apresentados anteriormente, no que tange à mecanismos de capturas fluviais e bacias endorreicas.

4. Resultados e Discussões

Neste capítulo serão apresentados os resultados e discussões da presente Tese. Para melhor entendimento, optou-se por apresentar os resultados em diferentes escalas de análise, uma vez que foram extraídos dados em escalas distintas. Primeiramente, serão apresentados os resultados morfológicos e morfométricos obtidos na escala da BHRPS, tais como, convergências de drenagem, Nprofile e Mapas Seppômen. No segundo momento, serão apresentados dados obtidos ao longo do divisor hidrográfico da Mantiqueira, onde foram analisados perfis topográficos e os índices do Fator X, com o objetivo de analisar o comportamento morfológico e morfométricos do divisor da porção noroeste da BHRPS. Por fim, serão apresentados resultados de informações acerca de capturas fluviais, migração de divisor e parâmetros morfométricos no divisor da Mantiqueira associado à sub-bacia do rio Paraíba. Estes resultados de escala mais locais, contribuem para o entendimento evolutivo da BHRPS como um todo, uma vez que evidenciam mecanismos e processos de evolução da bacia.

4.1. Análise Morfológica e morfométricas da BHRPS

4.1.1. Convergências de Drenagem

Ao analisar o sistema de drenagem do rio Paraíba do Sul pode-se observar a ocorrência de zonas com convergência de drenagens de afluentes importantes do rio estudado. Estas zonas são recorrentes ao longo da calha principal do rio Paraíba do Sul e apresentam a convergência de pelo menos três canais de drenagem afluentes importantes. Ao longo das pesquisas realizadas pelo Grupo Morfotektos, trabalhos anteriores identificaram e investigaram algumas zonas de convergências e anomalias, como a zona de convergência de Três Rios (CASTANHEIRA *et al.*, 2005; SARTI *et al.*, 2004; FREITAS, 2007) e a convergência de Itaocara, mais a jusante. Com a evolução da pesquisa, foram assim identificadas, ao todo, cinco zonas de convergência de drenagem (Figura 4.01). Estas zonas de convergência foram nominadas pelas cidades próximas à sua localização, a saber: Taubaté, Resende; Volta Redonda; Três Rios; Itaocara.

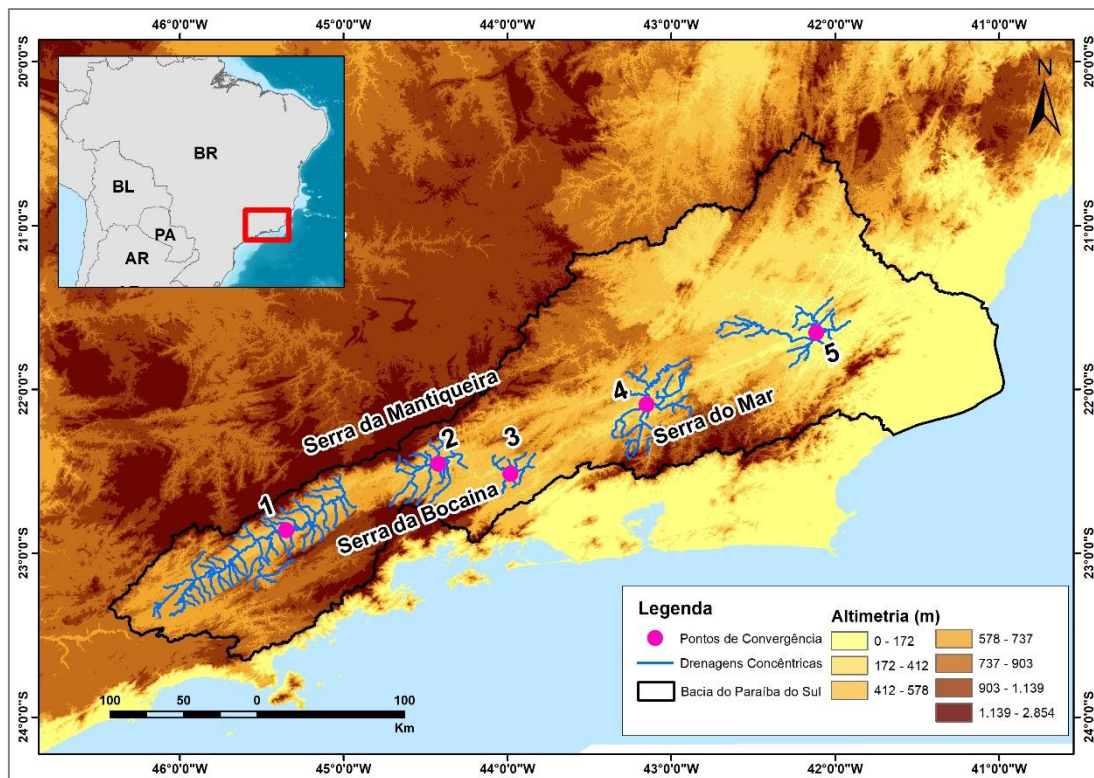


Figura 4.01: Localização das zonas de convergência de drenagem ao longo do rio Paraíba do Sul.
1. Taubaté. 2. Resende. 3. Volta Redonda. 4. Três Rios. 5. Itaocara.

Esta característica não é comum para sistemas de drenagem situados em margens passivas, sendo mais comum, a ocorrência de drenagens do tipo “espinha de peixe”, apresentando seus afluentes ao longo da calha principal. Estas zonas de convergência apresentam drenagens afluentes com direção de fluxo opostas à calha principal do rio Paraíba do Sul, indicando reordenamento de drenagem nestas zonas (FREITAS, 2007).

Desta forma, temos um paleo-sistema de drenagem dividido em zonas de convergência em diversas sub-bacias mantidas por divisores, a saber: de oeste para leste, a zona de convergência de Taubaté que engloba as drenagens que confluem para a bacia sedimentar parcialmente preservada, com destaque para os rios Jaguari, Una e Parateí. A zona de convergência de Resende, com a bacia sedimentar parcialmente preservada, reúne os rios Pirapetinga, Conceição, Figueiras, Barreiro de Baixo, além de vários pequenos córregos em direção à convergência de Volta Redonda com sua bacia sedimentar parcialmente preservada, como os Rios Turvo, Bananal, Carioca, Brandão, os Rios Flores, Preto, Manuel Duarte. Para jusante a expressividade destas convergências é ainda maior com a Zona de Convergência de

Três Rios, onde drenagens, além do próprio rio Paraíba do Sul, se encontram como os Rios Piabanha e Paraibuna; diversos afluentes menores também fluem para esta zona de convergência como os rios Calçado, Bemposta, Floresta, Pilões, Santa Fé e alguns mais distantes com significantes inflexões de captura como Chiador e Minerva (SARTI *et al.*, 2004; CASTANHEIRA & FREITAS, 2005; CASTANHEIRA *et al.*, 2005; SARTI & FREITAS, 2005). Por fim a zona de convergência de Itaocara, onde o rio Pomba, um dos maiores afluentes do rio Paraíba do Sul, o encontra nos arredores de Itaocara (TUPINAMBÁ *et al.*, 2003).

O trabalho de incisão do Rio Paraíba do Sul entalhando o leito principal da bacia e, portanto rebaixando continuamente o nível de base das bacias afluentes, configura um contundente trabalho erosivo que, hoje, pode ser visto na morfologia de sua calha principal. A rede atual e a configuração morfológica das bacias afluentes em relação à calha principal evidencia tal processo de ajuste ainda em curso. O mapa das bacias afluentes do Rio Paraíba do Sul (Figura 4.02) demonstra distribuição espacial das bacias de drenagem por suas áreas. Notam-se três grandes grupos de bacias afluentes: a) bacias de grande porte, constituídas pelos grandes afluentes para as zonas de convergência; b) bacias de porte médio que correm de pequenos planaltos para caírem em perfis abruptos para o leito principal do Rio Paraíba do Sul; e c) pequenas e rápidas drenagens afluentes diretas de gradiente abrupto, registrando o entalhe da calha principal do Rio Paraíba do Sul.

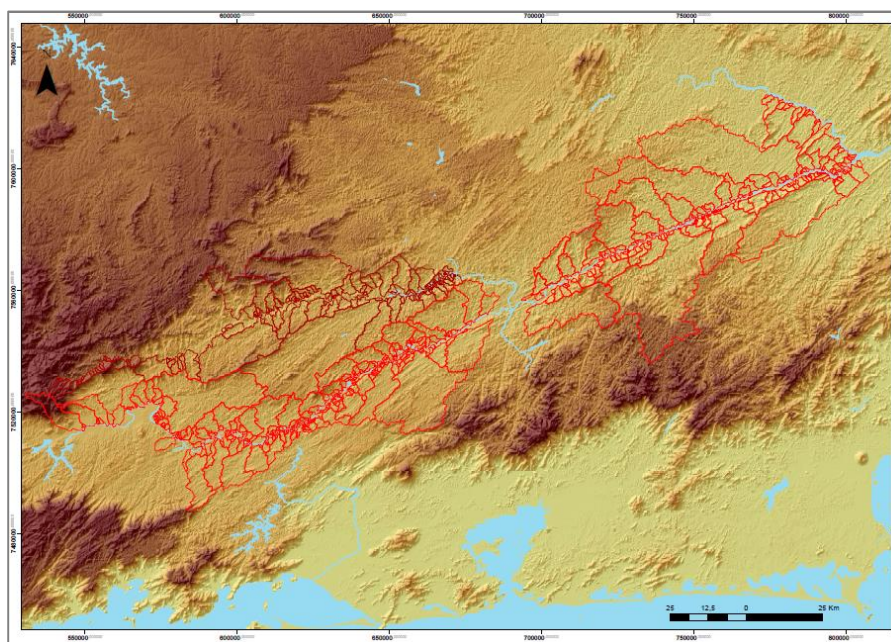


Figura 4.02: Mapeamento das bacias de drenagem afluentes diretas do rio Paraíba do Sul e Rio Preto, no trecho entre Itaocara e Resende.

As bacias de grande porte representam sistemas de drenagens que foram capturados pelo rio Paraíba do Sul e passaram a dissecar o relevo do planalto sudeste para se ajustar ao nível de base. Boa parte dessas bacias apresentam relevos relictos do planalto sudeste e, além disso, drenagens com direções opostas ao rio Paraíba do Sul. As bacias de grande extensão cujas nascentes encontram na Serra do Mar, como no caso do rio Grande, Paquequer e do Quilombo, drenam sobre extensos degraus topográficos até atingir a calha principal do rio Paraíba do Sul, sendo estes sustentados por níveis de base em forma de cachoeira. Já as bacias de menor área configuram rápidos de drenagem que caem diretamente na calha do eixo principal do rio Paraíba do Sul. Estas bacias, em sua maioria, são de primeira ordem e pequena extensão de drenagem, contudo, sua declividade é considerável para atingir a calha do rio Paraíba do Sul instalado no RCSB. De maneira geral, os rápidos de drenagem configuram bacias hidrográficas que possuem apenas um curso de drenagem e drenam sobre as encostas marginais ao rio Paraíba do Sul diretamente para a sua calha principal. Possuem área relativamente pequenas em relação às bacias adjacentes que já conseguiram estender suas cabeceiras sobre o planalto sudeste e possuem cursos fluviais com poucos quilômetros de extensão (Figura 4.03).

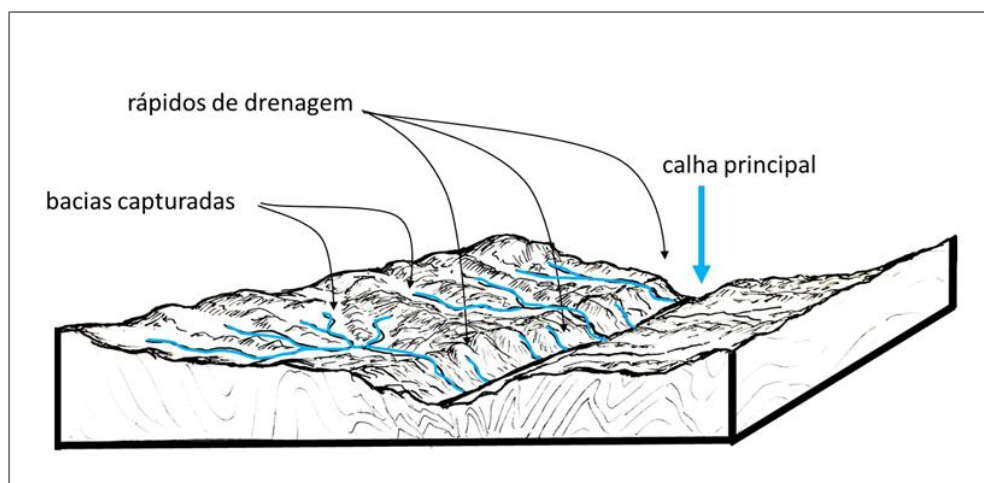


Figura 4.03: Perfil esquemático de morfologia dos canais e bacias de drenagem ao longo da calha principal do rio Paraíba do Sul.

Fonte: Desenho Marcelo Motta de Freitas.

4.1.2. Análise morfológica dos sistemas de drenagem

O sistema de drenagem do rio Paraíba do Sul apresenta diferentes padrões de drenagem, sendo influenciado por condicionantes litológicos e estruturais (FREITAS, 2007; SILVA, 2012; SALGADO *et al.*, 2016). Contudo, pode-se perceber em alguns trechos do rio, o predomínio do padrão de drenagem do tipo radial centrípeta, que convergem para pontos específicos da superfície. Como dito anteriormente, foram identificados 5 pontos de ocorrência de drenagens com padrão radial centrípeta que foram definidos aqui como zonas concêntricas de drenagem. É possível identificar as zonas concêntricas próximas às localidades de Itaocara, Três Rios, Volta Redonda, Resende e Taubaté (Figura 4.04). Estas zonas situam-se em sua maioria associadas aos grábens abortados do tectonismo cenozoico que ocorreu na região. Desta forma, pode-se dizer que estas drenagens possuem controle estrutural marcante.

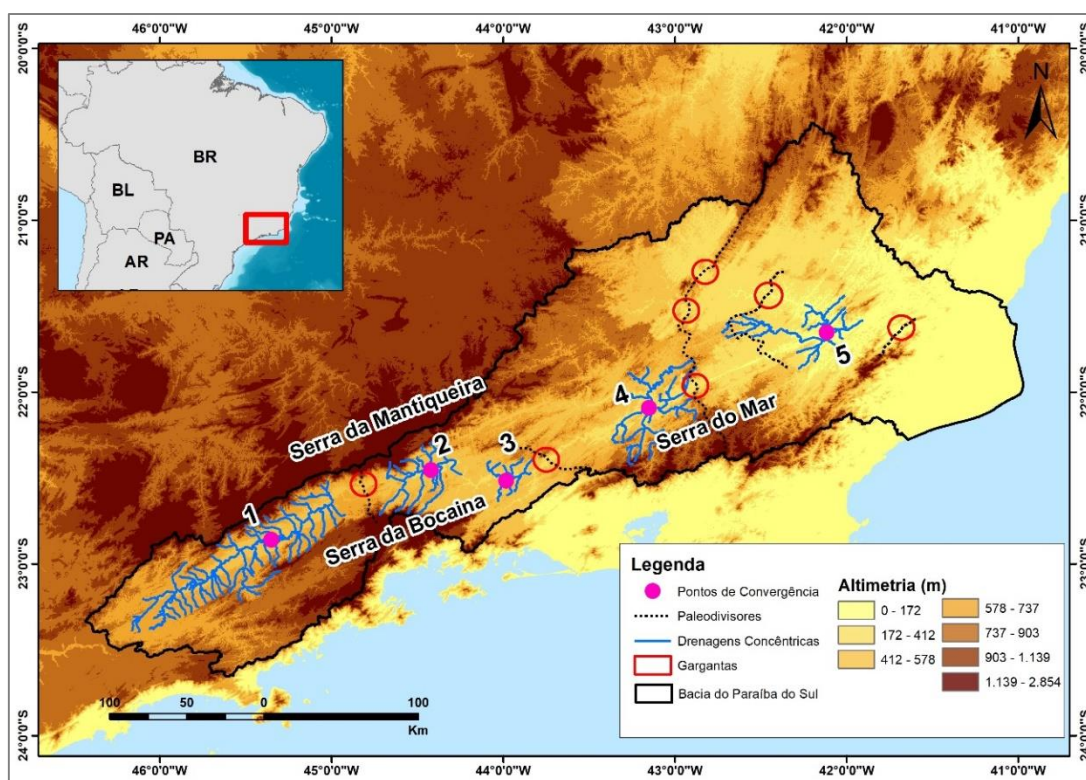


Figura 4.04: Bacia Hidrográfica do rio Paraíba do Sul e a localização das zonas concêntricas de drenagem, paleodivisores e gargantas (*gorges*).

Possivelmente estas zonas concêntricas apresentavam sistemas de drenagens isolados, sendo delimitados por divisores topográficos, formando bacias de drenagem endorreicas. O padrão radial centrípeta da rede drenagem nestas zonas

e a ocorrência de depósitos sedimentares cenozoicos nas bacias de Taubaté, Resende e Volta Redonda corroboram esta hipótese. As bacias endorreicas caracterizam-se pela concentração e deposição de sedimentos na parte mais rebaixada do relevo, podendo formar depósitos sedimentares, assim como, a ocorrência de lagos. Além disso, é possível identificar drenagens inversas ao canal principal do rio Paraíba do Sul em direção às zonas de convergência. A formação destas bacias endorreicas pode estar associada ao RCSB, através do rebaixamento de blocos crustais, interrompidos por altos estruturais, que formaram as porções mais baixas das bacias endorreicas e, conseqüentemente, deram origem ao sistema de drenagem radial ou concêntrico (Figura 4.04). Um dos exemplos mais marcante das zonas concêntricas é a de Três Rios, cujo nome está associado à convergência entre os rios Paraíba, Paraíbauna e Piabanha.

Próximo aos depocentros e ao padrão concêntrico da rede de drenagem são identificadas vales estreitos na calha do rio Paraíba do Sul, apresentando aspecto de "gargantas", circundados por alinhamentos serranos remanescentes, indicando possíveis paleodivisores. Os vales estreitos em forma de "gargantas" indicam a vaga erosiva na qual o divisor foi rebaixado e, conseqüentemente, as bacias endorreicas foram conectadas (Figura 4.04). Um dos exemplos mais marcantes é o Estreito de Sapucaia localizado à jusante de Três Rios que indica o antigo divisor que limitava a drenagem do Rio Paraíba do Sul (SARTI, 2008).

Ao analisar os perfis topográficos ao longo do perfil, percebe-se o vale fluvial da calha principal do rio Paraíba do Sul bem estreitos ao cruzar pelos paleodivisores, ao mesmo tempo, pode-se ter uma noção da morfologia do relevo (Figura 4.05). O paleodivisor de Taubaté está associado ao Alto Estrutual de Queluz (RICCOMINI, 1989) e pode-se perceber que, apesar da calha principal do rio Paraíba do Sul, o relevo é suave e com baixa amplitude altimétrica entre os topos e os vales. Por ser o paleodivisor mais distante da foz, esta região talvez não tenha sido tão afetada pelo pulso erosivo do rio Paraíba do Sul, o que pode explicar o relevo mais suave e apresentar bacia sedimentar bem preservada.

Os perfis topográficos dos paleodivisores de Miguel Pereira e Sapucaia demonstram o vale principal do rio Paraíba do Sul bem encaixado e estreito, formando gorges nestes locais, como o Estreito de Sapucaia já descrito por Sarti (2008). No caso do paleodivisor de Miguel Pereira, o rio Paraíba do Sul drena entre

as Serras da Concórdia e a Serra de Miguel Pereira, a diferença entre o vale e os topos marginais ao leito fluvial atinge 200 metros, enquanto que no caso de Sapucaia, o rio Paraíba do Sul drena encaixado entre a Serra do Mar e a Serra da Prata, podendo atingir 400 metros de amplitude altimétrica entre o vale principal e os cumes (Figura 4.05). O paleodivisor próximo à zona de convergência de Itaocara apresenta o vale do rio Paraíba do Sul alargado e com baixa amplitude de relevo entre o leito fluvial e os topos. Esta característica pode ser explicada pela proximidade deste local com a foz do rio Paraíba do Sul, sendo este local mais afetado pelos processos erosivos e desnudacionais e mais ajustados ao nível de base geral. Mesmo assim, pode-se perceber que a calha principal do rio Paraíba do Sul encontra-se encaixada, delimitada por prolongamentos da Serra do Itacolomi e a Serra da Bandeira, com desnível topográfico de aproximadamente 100m (Figura 4.05).

As gargantas ou gorges, formados ao longo da calha principal do rio Paraíba do Sul, são evidências de antigos divisores de drenagem que isolavam sistemas fluviais endorreicos no Planalto Sudeste que posteriormente foram conectados com o rebaixamento dos divisores. As gargantas são evidenciadas pelo estreitamento do vale na calha principal do rio Paraíba do Sul. Neste sentido, as gargantas correspondem à vagas erosivas nas quais o rio Paraíba do Sul promoveu maior dissecação e rebaixo o divisor, promovendo capturas fluviais através do Planalto Sudeste por meio de recuo de cabeceira (SARTI, 2008; FREITAS, 2007). O rebaixamento destes divisores pode ter sido controlado por estruturas do substrato rochoso, tais como foliação e sets de fraturas. A identificação de zonas de convergências de drenagem, sistemas fluviais com padrões de drenagem centrípeta e presença de depósitos sedimentares Cenozoicos ajudam a corroborar a formação de paleodivisores no Alto de Queluz, na Serra de Miguel Pereira, no Alto de Sapucaia e em Itaocara.

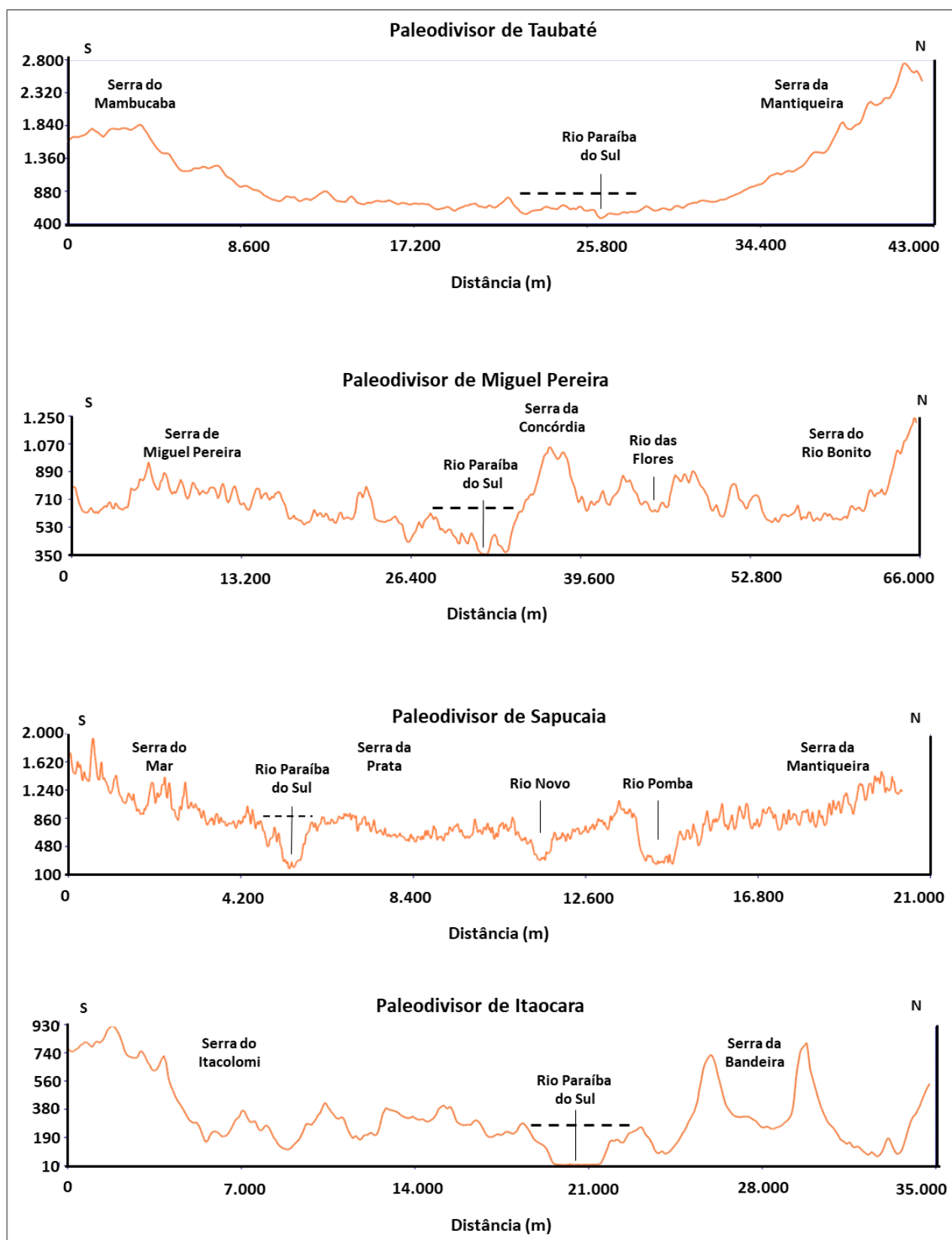


Figura 4.05: Perfis Topográficos transversais à calha do rio Paraíba do Sul onde foram identificados estreitamento do vale. As linhas tracejadas nesta imagem indicam os antigos níveis dos paleodivisores da BHRPS. A localização geográfica dos perfis na área de estudo pode ser observada na figura 4.04, representados pelas linhas tracejadas.

A seguir, serão descritas as zonas de convergência de drenagem.

4.1.2.1. Zona de Convergência Taubaté

A Zona de Convergência (ZC) Taubaté, situa-se na porção do alto curso do rio Paraíba do Sul, localizada no gráben homônimo do Sistema de Riftes Cenozoicos do Sudeste. Esta ZC encontra-se na depressão topográfica da calha principal do rio Paraíba do Sul, com orientação SW-NE, delimitada pela Serra da Mantiqueira na porção norte e pela Serra da Bocaina e Serra do Quebra Cangalha na porção sul. Situa-se no estado de São Paulo, abrangendo 18 municípios dentre os quais destacam-se, Aparecida, Taubaté, Guaratinguetá, Cruzeiro, Pindamonhangaba, São José dos Campos e Guararema. Em relação à altimetria, a ZC encontra-se em, aproximadamente, 500m de altitude, enquanto que as cabeceiras dos rios que drenam para este ponto podem atingir 2.000m de altitude (Figura 4.06).

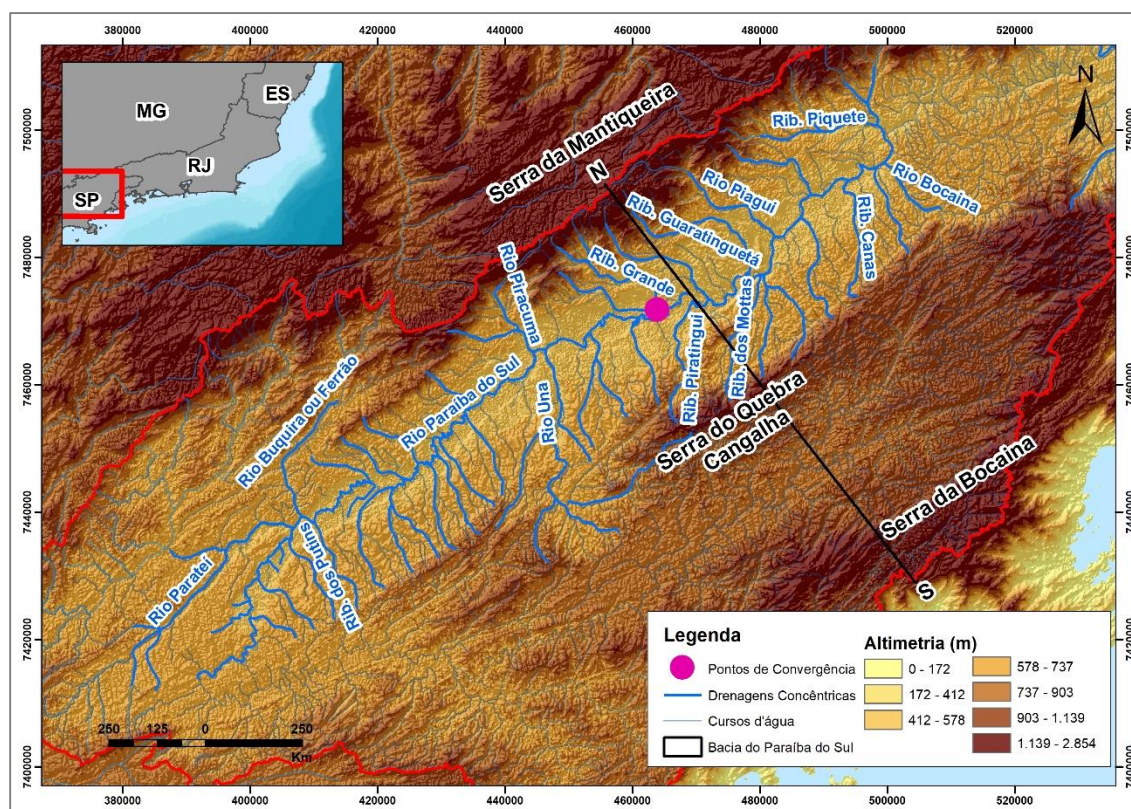


Figura 4.06: Contexto geomorfológico e localização da Zona de Convergência de Taubaté.

A zona de convergência configura-se pela coincidência das drenagens locais se direcionarem para o depocentro do graben, esculpindo suas encostas em equilíbrio com este nível de base. Dentre as principais drenagens que convergem para este ponto, cabe destacar o rio Parateí, rio Jaguari, rio Buquira, ribeirão do Tuvu, ribeirão Taperuçu, ribeirão dos Motas, rio Piracuma, ribeirão Tetequera, ribeirão dos Buenos, ribeirão Guaratinguetá, rio Piagui, ribeirão da Limeira e ribeirão do Piquete, na margem esquerda; e do rio Comprido, ribeirão Vidoca, rio Parangaba, ribeirão Olho d'água, ribeirão dos Mudos, ribeirão Caçapava Velha, ribeirão do Punhão, rio Una, ribeirão do Curtume, ribeirão Pirapitingui, ribeirão Tabuão, ribeirão Canas e o rio Bocaina, na margem direita. Os afluentes da margem esquerda, possuem suas nascentes nas elevadas altitudes da Serra da Mantiqueira, podendo atingir 2.000m de altura, enquanto os rios da margem direita possuem suas nascentes em altimetrias mais baixas, podendo atingir 1.200m e 1.300 de altitude. Esta condição reflete a própria assimetria das falhas do grabens, que, conforme apontado por XXX, constitui-se de um hemigraben, tendo a flaha mais expressiva nas vertentes da Serra da Mantiqueira. Exceção feita apenas ao rio Bocaina, cuja nascente encontra-se em 1.800m de altitude, vinda da serra homônima. Estas características revelam-se em uma morfologia, também, assimétrica entre os divisores que delimitam a ZC Taubaté, uma vez que a Serra da Mantiqueira possui elevações maiores do que a Serra da Bocaina nesta porção da bacia (Figura 4.07).

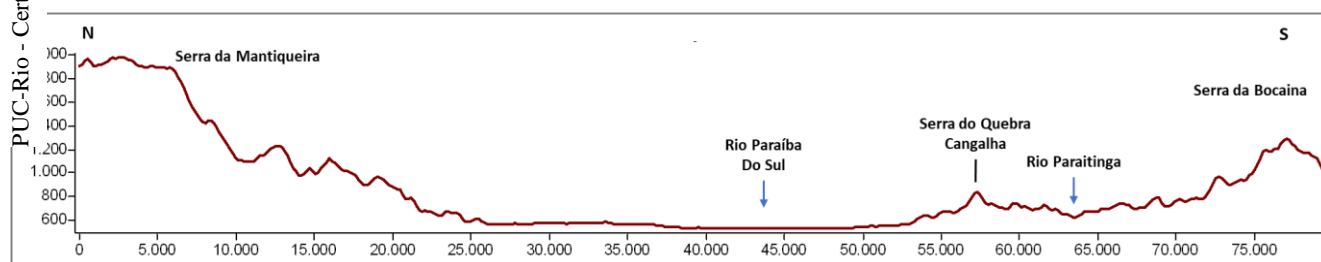


Figura 4.07: Perfil topográfico da Zona de Convergência de Taubaté.

Em relação ao padrão de drenagem desta ZC, destaca-se o padrão radial, contudo, pode-se perceber a ocorrência do padrão paralelo entre os rios adjacentes que se encontram na mesma margem, dado que se trata de um graben de formato alongado. Os rios apresentam baixa angulosidade, drenando sobre as encostas íngremes da Serra da Mantiqueira e da Serra da Bocaina até atingir a depressão topográfica da calha do rio Paraíba do Sul. Vale ressaltar que o rio Paraíba do Sul

entalha os sedimentos eocênios guardados no depocentro do grabens de Taubaté, registrando o processo de entalhe fluvial mais recente.

4.1.2.2. Zona de Convergência de Resende

A zona de Convergência de drenagem de Resende compreende um conjunto de drenagens afluentes do rio Paraíba do Sul que possuem sua confluência associada ao gráben homônimo. Apesar do porte menor que o anterior, este graben também guarda sedimentos da deposição eocênica. Situa-se à jusante do Alto Estrutural de Queluz, que limita o gráben de Resende em sua porção Oeste e a norte do Alto Estrutural Floriano-Barra Mansa (RICOMINNI, 1989), também denominado de Zona de Transferência de Volta Redonda em sua porção leste (VALERIANO & HEILBRON, 1993). A área abrange o município de Resende, sendo delimitado pelas escarpas da Serra da Mantiqueira na porção norte e pela Serra da Bocaina na porção sul (Figura 4.08).

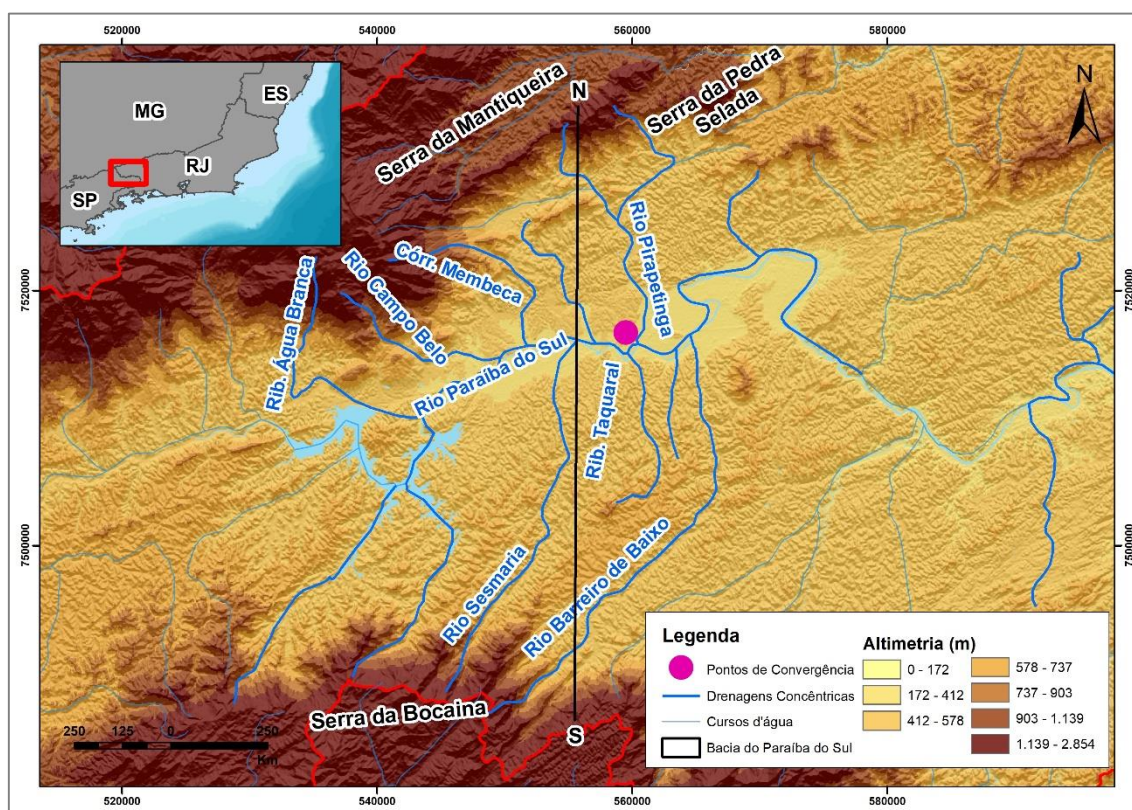


Figura 4.08: Contexto geomorfológico e localização da Zona de Convergência de Resende.

Do ponto de vista topográfico, a ZC encontra-se cortada pela calha principal do rio Paraíba do Sul e apresenta relevo de morfologia suave e baixa amplitude, em um ambiente de colinas com altimetria em torno de 400m. Observa-se nessa morfologia de relevo colinoso, topos convexos e topos tabulares, diferenciando respectivamente, as colinas formadas no substrato cristalino e as colinas que se desenvolveram no processo de dissecação dos sedimentos paleogênicos. Os topos tabulares, diferenciados pelo próprio limite da bacia sedimentar, variam em torno dos 410m, enquanto os topos das colinas em terrenos cristalinos, as cotas sobem para 430-450m. Mais uma vez, a calha do rio Paraíba do Sul entalha em cota altimétrica mais baixa que os sedimentos paleogênicos, a 390m.

Em direção às serras constitui-se um relevo de transição entre 600m e 900m. As regiões serranas podem atingir 2.200m de altitude, como na Serra da Mantiqueira, com o pico culminante do estado fluminense aos 2.791m nas Agulhas Negras. Ao sul, mais distante dos limites do graben eleva-se a Serra da Bocaina, chegando a altitudes também em torno de 2.000m e responsável pelas águas nascentes de diversas drenagens que convergem em direção a esta ZC.. Os afluentes da porção norte, possuem nascentes em altimetrias elevadas, por vezes superior à 2.000m, e drenam a frente escarpada da Serra da Mantiqueira até atingir a confluência com a calha do Paraíba do Sul e, conseqüentemente, a ZC de Resende. Por outro lado, os afluentes da porção sul apresentam as nascentes na Serra da Bocaina em altitudes próximas de 1.500m, drenando sobre a região montanhosa e o ambiente de colinas antes de atingir a ZC de Resende (Figura 4.09).

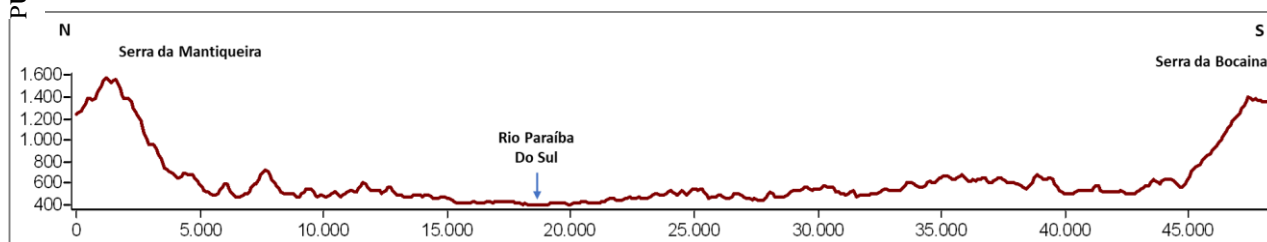


Figura 4.09: Perfil topográfico na Zona de Convergência de Resende. A localização do mesmo poder ser visto na Figura 3.

As drenagens afluentes do rio Paraíba do Sul que drenam para a ZC de Resende são: rio Campo Belo, córrego Membeca, rio Alambari, rio Pirapetinga, ribeirão da Figueira e ribeirão do Deserto da margem esquerda; córrego Pitangueira, rio Sesmaria, ribeirão Raso, Córrego Ponte Alta e rio Barreiro de Baixo da margem

direita. Como dito anteriormente, os afluentes da margem esquerda da ZC de Resende, possuem suas nascentes nas regiões serranas da Serra da Mantiqueira, especificamente na Serra da Pedra Selada. Estas drenagens apresentam orientação geral variando de sul e sudeste em direção à ZC de Resende, porém são ainda visíveis os alinhamentos de determinadas drenagens a estruturas tectônicas relacionadas, inclusive, aos eventos mesozoicos. Os marcantes lineamentos norte-sul na Serra da Mantiqueira desenham drenagens em direção ao seu sopé onde falhas leste-oeste da própria estrutura do graben de Resende, funcionam como calha coletora para a ZC.. Os afluentes da margem direita, por sua vez, com nascentes na Serra da Bocaina apresentam direção de drenagem predominantemente para nordeste, seguindo estruturas de foliação pré-cambrianas, com marcantes pontos de inflexão para norte em direção à calha do Paraíba do Sul dentro da ZC de Resende.

Esses rios ainda apresentam características morfológicas que indicam a ocorrência de um sistema de drenagem endorreico, marcado notadamente pelo padrão radial centrífugo destes rios direcionados para o depocentro do Graben na região de Resende.

4.1.2.3. Zona de Convergência de Volta Redonda

Esta ZC situa-se próximo à cidade de Volta Redonda, estando associada ao graben formado na região pelo tectonismo Cenozoico, integrando o Sistema de Riftes Cenozoicos do Sudeste do Brasil. Constitui uma estreita depressão às margens da calha do rio Paraíba do Sul neste local, com orientação preferencial WSW – ENE, com registro de preenchimento sedimentar (Figura 4.10).

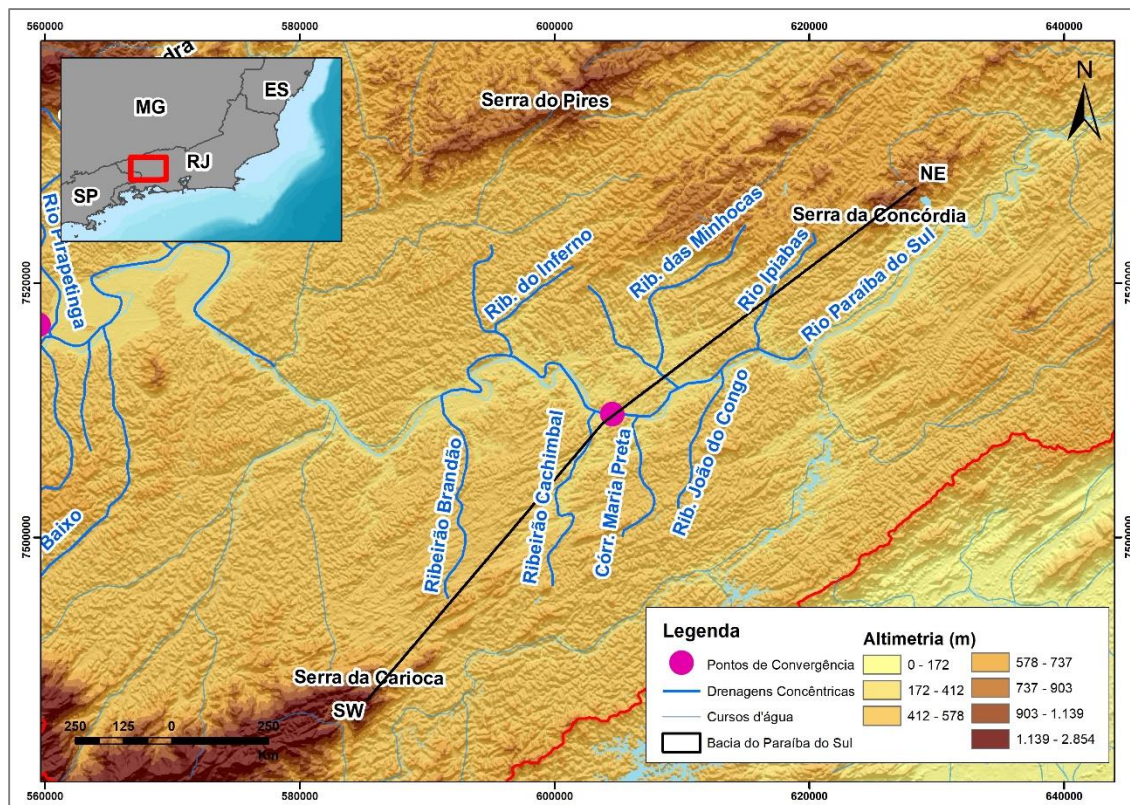


Figura 4.10. Contexto geomorfológico e localização da Zona de Convergência de Volta Redonda.

No entorno da ZC de Volta Redonda, a morfologia do relevo apresenta, de maneira geral, morfologia de colinas dissecadas de baixa amplitude (30-50m) com altitudes variando entre 400m e 500m. Nas colinas predominam encostas côncavas em morfologia de anfiteatro e topos convexos, circundadas por vales fluviais com sedimentação quaternária em abundantes planícies de inundação de pouca extensão, sobretudo no baixo curso dos rios próximos as suas fozes no Rio Paraíba do Sul. Na porção Nordeste, encontram-se morfologias serranas da Serra da Concórdia, com altitudes passando de 1.000m e amplitude de relevo entre os topos e os vales podendo atingir 300m, onde encontram-se as nascentes dos afluentes desta ZC. Nesta serra, as encostas são íngremes e os vales encaixados pela dissecação vertical do sistema de drenagem. Percebendo todo o entrono desta ZC, pode-se dizer que este se caracteriza por uma extensa superfície dissecada de baixa amplitude com a presença de remanescentes planálticos e alinhamentos serranos na porção norte (Figura 4.11).

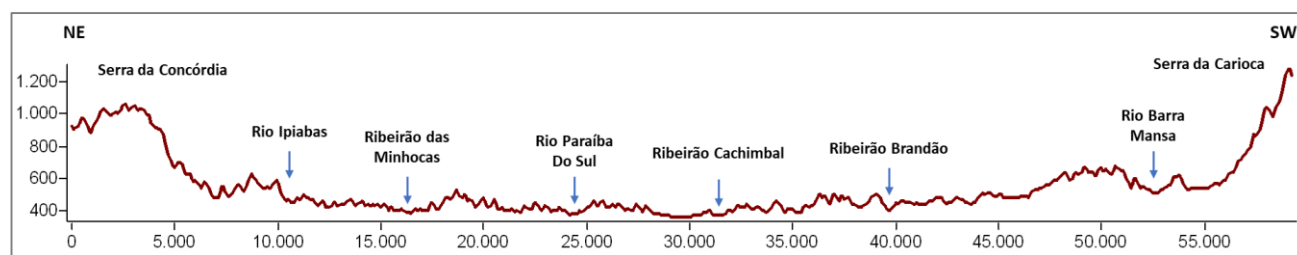


Figura 4.11: Perfil Topográfico na Zona de Convergência de Volta Redonda.

Em relação ao sistema de drenagem, este ambiente é marcado pela convergência das seguintes drenagens: rio Ipiabas, rio Bananal, rio Piraí, ribeirão das Minhocas, ribeirão do Inferno e córrego Boa Esperança da margem esquerda; e ribeirão Brandão, ribeirão Cachimbal, córrego Maria Preta e ribeirão João Congo da margem direita. Ao analisar a morfologia do sistema de drenagem nesta região, foram identificados rios com orientação opostas ao rio Paraíba do Sul e, ao atingir a calha principal do mesmo, são redirecionados. Esta característica é mais evidente nos rios da margem esquerda, como o rio Ipiabas e ribeirão do Inferno, onde predominam orientação de drenagem, preferencialmente, para sudoeste, enquanto o rio Paraíba do Sul, neste trecho, apresenta direção predominante para nordeste. Estas drenagens podem apontar evidências das antigas direções preferenciais da drenagem antes do estabelecimento do sistema hidrográfico do rio Paraíba do Sul, cujas características e direções ainda estão preservadas.

O padrão de drenagem neste ZC é radial centrífuga, o que permitem a suposição de episódios de endorreísmo no planalto sudeste. O suposto momento de endorreísmo pode estar associado a formações dos grábens e altos estruturais do relevo, que individualizaram o Sistema de Riftes Cenozoicos do Sudeste do Brasil (ZALAN *et al.*, 2005). O registro sedimentar do gráben de Volta Redonda não apresenta depósitos de ambiente lacustre, contudo, a Formação Floriano registra um ambiente meândrico de baixa energia, que pode estar associado ao episódio de endorreísmo ou, pelo menos de uma estagnação de fluxos hídricos.

4.1.2.4. Zona de Convergência de Três Rios

A ZC de Três Rios é a feição mais representativa de convergência de drenagem no planalto Sudeste, com a confluência das importantes bacias de

drenagens locais de grande porte como as dos rios s rios Paraíba e Piabanha, convergentes para o Rio Paraíba do Sul, cuja feição dá nome à cidade de Três Rios. Neste trecho, a calha do rio Paraíba do Sul está mais estreita em relação às outras ZCs e não são identificados registros de depósitos sedimentares Cenozoicos, como nos grábens de Taubaté, Resende e Volta Redonda. Apesar disso, Zálán *et al.* (2005) inserem esta região no Sistema de Riftes Cenozoicos do Sudeste do Brasil como o gráben do baixo Paraíba do Sul.

A ZC de Três Rios é composta pelos seguintes eixos de drenagem: rio Paraíba, rio Minerva, córrego da Areia, rio Calçado, rio Piabanha e córrego da Covanca. O sistema de drenagem apresenta um padrão radial. Foram identificados eixos de drenagem nesta região com direções opostas ao rio Paraíba do Sul, como o caso dos rios Minerva e Calçado. Ambos os rios, drenam sobre planaltos preservados cujas drenagens mudam abruptamente de direção ao atingir a calha principal do rio Paraíba do Sul (Figura 4.12).

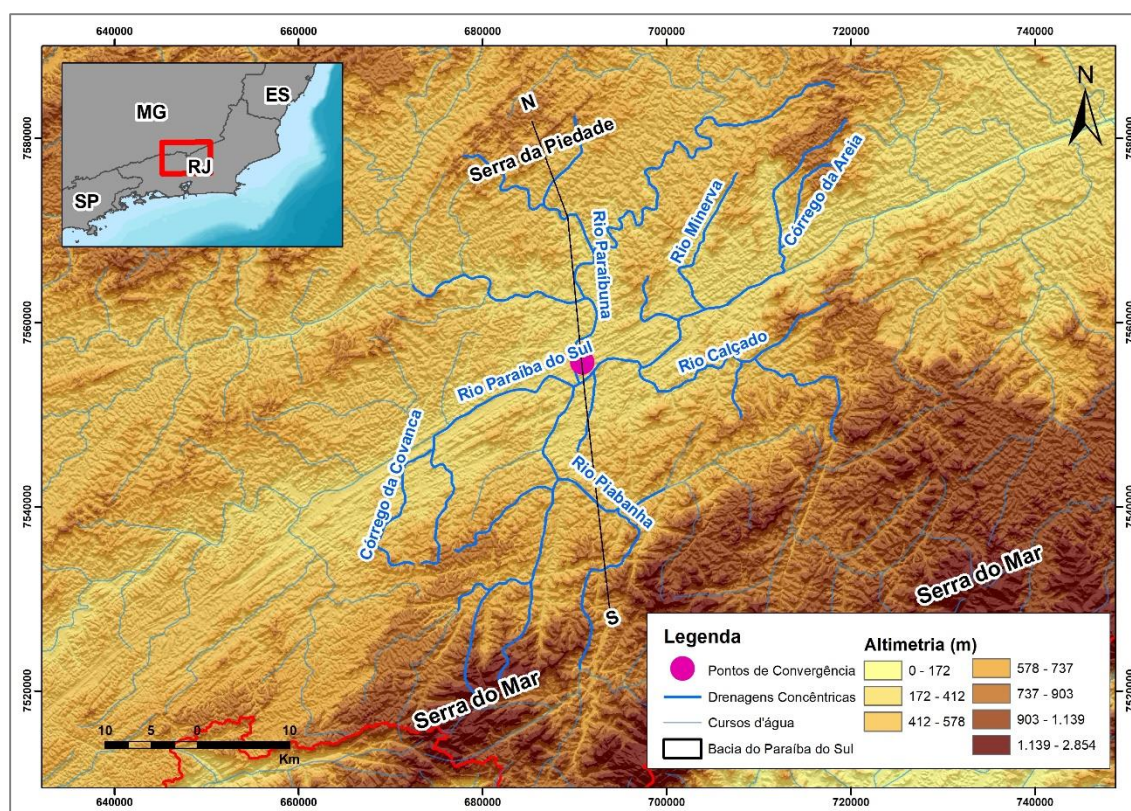


Figura 4.12: Contexto geomorfológico e localização da ZC de Três Rios.

A morfologia do relevo pode ser diferenciada por três compartimentos: o primeiro composto por colinas dissecadas de baixa amplitude situadas próximas da

calha principal do rio Paraíba do Sul. Neste compartimento, a altimetria é de 300m, aproximadamente, e predominam encostas côncavas com topos convexos e planos, com amplitude de relevo de aproximadamente 40m e vales alargados com sedimentação colúvio-aluvionar. O segundo compartimento compreende planalto dissecado de baixa amplitude, com elevação de 500m que marca um patamar topográfico mais elevado em relação ao compartimento de colinas. Este compartimento pode ser observado entre a região norte da ZC de Três Rios e o sul de Juiz de Fora em direção a cidade de Mar de Espanha. O terceiro compartimento topográfico é marcado por morfologias serranas de alta amplitude, associadas à prolongamentos da Serra do Mar ao sul da calha principal do rio Paraíba do Sul. Este trecho é marcado por grandes elevações topográficas, podendo atingir altitudes acima de 1.000, formada pela resistência diferencial das unidades geológicas da região, podendo apresentar morfologias de pães de açúcar (Figura 4.13).

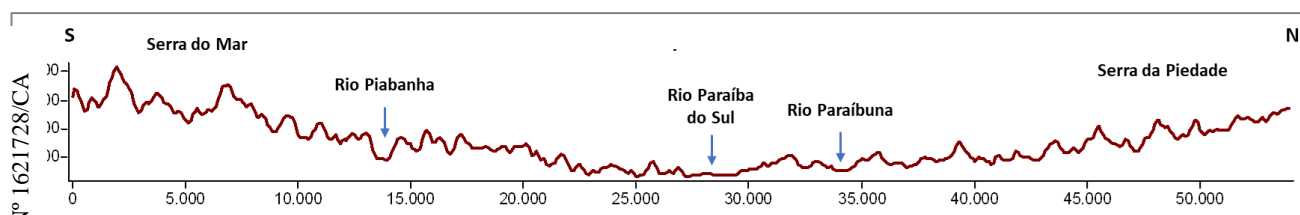


Figura 4.13: Perfil topográfico da região da ZC de Três Rios. A localização do perfil pode ser observada na figura anterior.

Neste sentido, o suposto episódio de endorreísmo em Três Rios pode ser evidenciado pelas convergência dos sistemas de drenagem; pelo padrão de drenagem radial das drenagens do entorno; e pela identificação de drenagens com direção de fluxo opostas ao rio Paraíba do Sul, preservando a estruturação de um sistema hidrográfico anterior ao estabelecimento da BHRPS.

4.1.2.5. Zona de Convergência de Itaocara

A ZC de Itaocara corresponde à convergência de drenagem encontrada mais próxima da foz do rio Paraíba do Sul, próximo da região homônima da feição. A convergência se dá na calha principal do rio Paraíba do Sul, caracterizada por uma depressão topográfica, alongada na direção NE-SW. Esta depressão está associada ao gráben de Itaocara limitada pela Sistema de Falhamento do Rio Pomba (SRFP) na borda nordeste, e por falhas de direção NW, paralelas à SFRP, na borda sudoeste.

Já as bordas noroeste e sudeste estão limitadas pela reativação de estruturas Neoproterozoicas da Faixa Móvel Ribeira (TUPINAMBÁ *et al.*, 2003). O grabén apresenta formato rômbo e é submetido à eventos recorrentes de inundações do rio Paraíba do Sul, preenchida por sedimentos colúvio-aluvionares recentes, não apresentando registro de depósitos sedimentares Cenozoicos.

A morfologia do relevo nesta região é bastante dissecada, com baixa amplitude entre os vales e os topos dos morros. Caracteriza-se por uma extensa área colinosa embutidos com vales alargados e preenchidos por sedimentos quaternários. Em sua maioria, predominam colinas convexas com topo arredondados, com concavidades suaves entre elas e morros mais elevados com morfologia de “pães de açúcar” em litologias mais resistentes.. As variações altimétricas no ambiente colinoso varia entre 50m e 150m, contudo, são observados lineamentos serranos com cristas alinhadas na direção NE-SW. Os ambientes serranos podem ser identificados na porção nordeste e sudoeste da ZC de Itaocara, como os lineamentos da Serra das Flecheiras e da Serra do Gavião, respectivamente. Além disso, na borda sudeste, são observadas lineamentos serranos da Serra do Desengano. As altimetrias nas Serras podem atingir 900m de altitude, e apresentam elevadas amplitudes de relevo, com 800m de variação em alguns trechos. Nas serras, os vales são encaixados nas encostas côncavas delimitados por encostas retílines e convexas íngremes. Na borda oeste da ZC, encontram-se planaltos dissecados da baixa amplitude, como a Serra do Serrote e a Serra do Gavião (Figura 4.14).

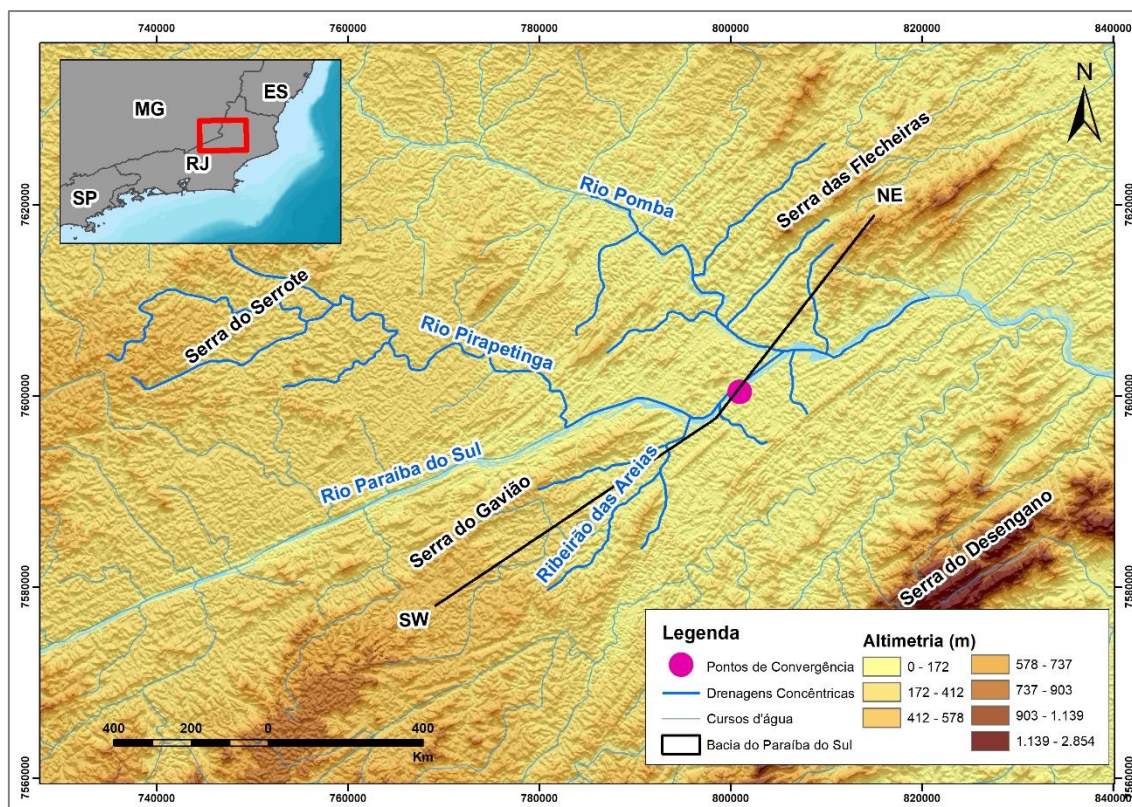


Figura 4.14: Contexto geomorfológico e localização da ZC Itaocara.

A rede de drenagem que constitui a ZC de Itaocara compreende os rios Pomba, Pirapetinga, Paraíba do Sul e ribeirão das Areias e pequenos afluentes destes rios. O rio Pomba possui nascente na Serra da Mantiqueira em altitude de 1.100m aproximadamente, e confluência com o rio Paraíba do Sul aos 70m de altitude, após drenar 270km sobre superfície de colinas dissecadas. As drenagens da Serra das Flecheiras possuem nascentes em 900m de altitude e drenam sobre um ambiente serrano de alta amplitude. A orientação de drenagem destes afluentes é para SW em direção ao canal principal do rio Pomba. A nascente do rio Pirapetinga situa-se em uma situação planáltica na Serra do Serrote à 700m de altitude e sua confluência com o rio Paraíba do Sul encontra-se em 80m e drena sobre uma superfície de baixa amplitude, marcada por morfologia de colinas dissecadas. O ribeirão das Areias possui nascente na região da Serra do Gavião com altitude de 500m e confluência em 100m aproximadamente, drena sobre uma superfície dissecada de baixa amplitude e com orientação preferencial para NE (Figura 4.15).

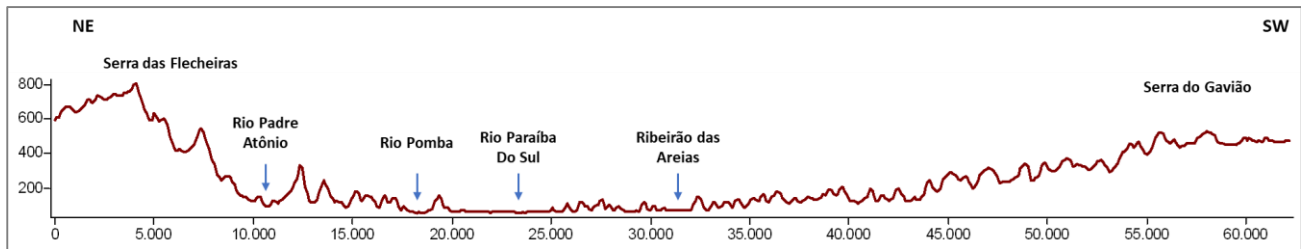


Figura 4.15: Perfil topográfico no entorno da ZC de Itaocara.

O sistema de drenagem da região apresenta forte controle estrutural, como a predominância de direção NE e identificação de cotovelos de drenagem, condicionado pelas estruturas do substrato geológico da Faixa Móvel Ribeira. De maneira geral, predomina o padrão de drenagem treliça, contudo, na zona de convergência, percebe-se a ocorrência de padrão de drenagem radial. Além disso, são identificadas drenagens com direção opostas ao rio Paraíba do Sul, principalmente, os rios cujas nascentes encontram-se na Serra das Flecheiras. Estas, possuem canais principais com orientação preferencial de fluxo para SW em direção à ZC de Itaocara, enquanto o rio Paraíba do Sul drena para NE. Esta característica auxiliou na identificação desta ZC, uma vez que registra drenagens opostas ao canal principal do rio Paraíba do Sul e, com isso, podem indicar antigos rios que sofreram processo de captura fluvial.

4.1.3. NProfile

Conforme dito anteriormente, foram extraídos perfis normalizados dos canais fluviais afluentes do rio Paraíba do Sul, sendo 17 canais da margem esquerda e 16 da margem direita. Para melhor visualização dos afluentes no mapa e na tabela, foi criada uma nomenclatura específica, sendo “E” para margem esquerda e “D” para margem direita e a numeração seguiu a ordem crescente da foz para a cabeceira. Os dados obtidos com os dados dos perfis normalizados objetiva analisar o nível de ajuste dos afluentes do rio Paraíba do Sul ao nível de base e, assim, estabelecer correlações da morfogênese do sistema fluvial do Planalto Sudeste.

A análise dos perfis longitudinais de normalização auxilia no entendimento do grau de dissecação do relevo pelos índices de concavidade apresentados pelas drenagens. Valores elevados do índice de concavidade indicam, em sua maioria, drenagens mais ajustadas ao nível de base local e um perfil mais próximo do

equilíbrio. Já valores mais baixos indicam que as drenagens ainda estão em estágio de ajuste ao nível de base (PEREZ-PENÑA *et al.*, 2017). A Figura 4.06 apresenta a localização das drenagens nas quais foram extraídos os perfis longitudinais de normalização. Estas drenagens foram escolhidas em função da representatividade dos afluentes pertencentes a cada zona de convergência e de cada margem (Figura 4.16).

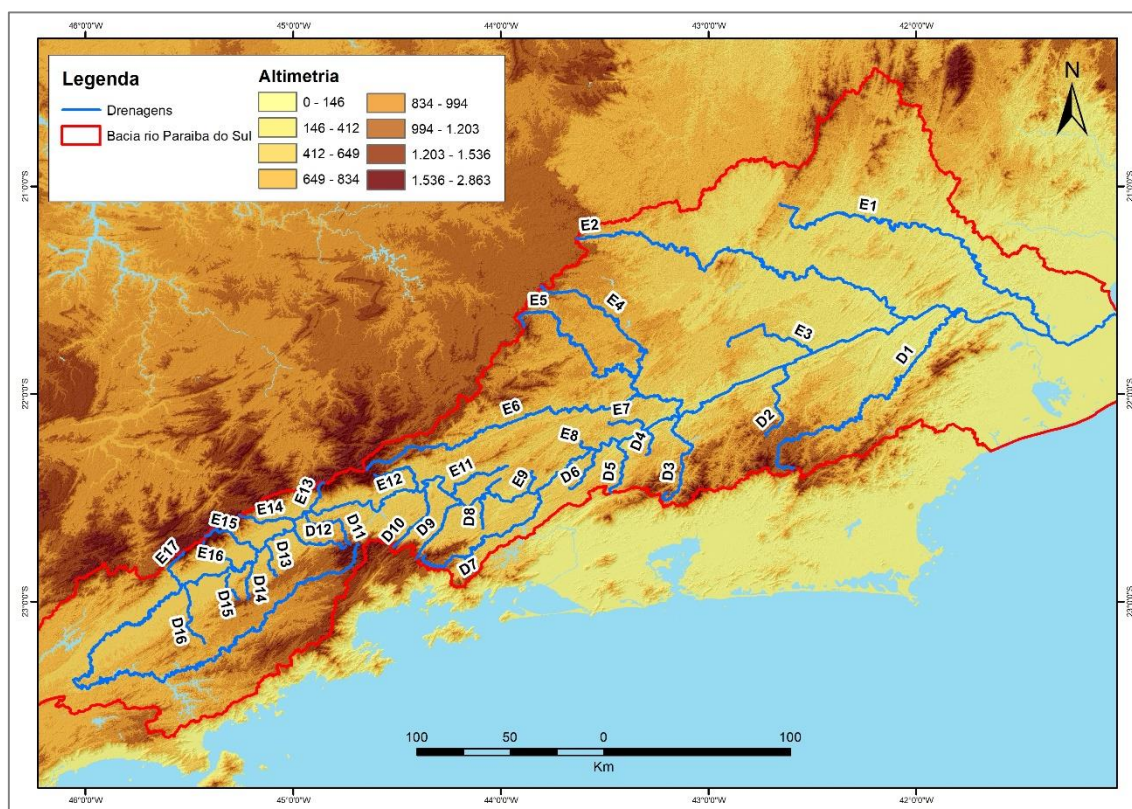


Figura 4.16: Figura de Localização dos rios analisados pela ferramenta NProfile.

De maneira geral, os cursos fluviais tendem a apresentar índices de concavidade mais altos próximos à foz, demonstrando uma diminuição destes conforme os afluentes situam-se mais à montante. Contudo, percebe-se que alguns afluentes do rio Paraíba do Sul, apresentam altas taxas de concavidade mesmo estando localizados distantes da foz (Tabela 1) (Figura 4.17).

Tabela 1: Valores de Índice de Concavidade, Cmax e dL das drenagens afluentes do rio Paraíba do Sul.

ID	Nome	Margem	Concavidade (%)	Cmax	dL	Distância Foz	Extensão (km)
RPS	Rio Paraíba do Sul	-	42,86	0,426	0,059	-	1.162,6
D1	Rio Grande	Direita	58,7	0,458	0,247	97,1	241,5
D2	Rio Paquequer	Direita	38,46	0,37	0,482	196,8	69,4
D3	Rio Piabanha	Direita	39,28	0,388	0,055	259,4	82,9
D4	Córrego Matosinho	Direita	34,48	0,355	0,353	279,1	24,5
D5	Rio do Saco	Direita	34,67	0,416	0,043	293,9	48,0
D6	Rio Alegre	Direita	-12,86			321,5	38,9
D7	Rio Pirai	Direita	67,96	0,598	0,278	356,5	129,2
D8	Ribeirão Brandao	Direita	53,08	0,512	0,125	393,7	25,0
D9	Rio Bananal	Direita	80,72	0,72	0,153	406,7	50,7
D10	Rio Barreiro de Baixo	Direita	80,19	0,761	0,133	444,1	56,0
D11	Ribeirão Itagaçaba	Direita	78,14	0,659	0,137	519,9	50,8
D12	Rio Bocaina	Direita	71,69	0,67	0,231	533,7	49,2
D13	Ribeirão Lorena	Direita	68,9	0,621	0,094	552,8	24,6
D14	Ribeirão dos Motas	Direita	68,97	0,663	0,18	565,5	26,7
D15	Ribeirão Piratingui	Direita	71,88	0,621	0,157	582,1	22,9
D16	Rio Uma	Direita	58,4	0,494	0,2	613,4	48,7
E1	Rio Muriaé	Esquerda	67,75	0,617	0,122	43,8	289,1
E2	Rio Pomba	Esquerda	51,54	0,422	0,047	128,7	314,1
E3	Rio Angu	Esquerda	8,2	0,213	0,553	181,9	70,8
E4	Rio Paraibuna	Esquerda	29,5	0,345	0,063	259,4	194,6
E5	Rio Vermelho	Esquerda	45,88	0,504	0,078	259,4	183,7
E6	Rio Preto	Esquerda	74,49	0,619	0,271	259,4	232,5
E7	Ribeirão Grande	Esquerda	45,33	0,505	0,094	280,8	32,9
E8	Ribeirão Marambaia	Esquerda	25,15	0,262	0,125	315,2	13,2
E9	Rio Ipiabas	Esquerda	38,11	0,389	0,341	361,6	22,2
E10	Ribeirão do Inferno	Esquerda	56,26	0,489	0,337	386,0	15,5
E11	Rio do Turvo	Esquerda	40,43	0,415	0,125	412,8	65,4
E12	Rio Pirapetinga	Esquerda	75,65	0,676	0,231	448,4	43,9
E13	Ribeirão do Brasão	Esquerda	49,43	0,368	0,357	516,8	22,0
E14	Ribeirão Piquete	Esquerda	78,69	0,681	0,196	528,5	40,4
E15	Rio Piagui	Esquerda	37,25	0,474	0,431	558,0	45,8
E16	Ribeirão dos Buenos	Esquerda	70,33	0,663	0,263	579,7	32,6
E17	Rio Piracuma	Esquerda	44,78	0,434	0,42	614,5	29,1

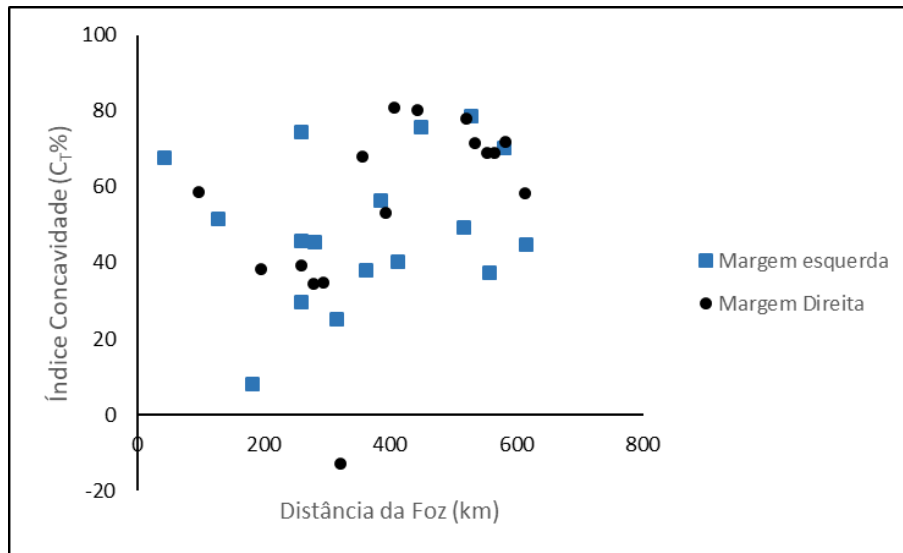


Figura 4.17: Correlação entre os valores de C_T e a distância da foz dos afluentes do rio Paraíba do Sul.

As drenagens afluentes do rio Paraíba do Sul que apresentam os valores mais elevados de CT são, respectivamente: D9 (80,7%), D10 (80,1%), E14 (78,6%) e E12 (75,6%). Já as drenagens que apresentam os menores valores são: D6 (-12,8%) na margem direita e E3 (8,2%) na margem esquerda. Pode-se concluir que não houve diferença significativa entre os valores de CT, C_{max} e dL entre as drenagens situadas em margens opostas. Além disso, os valores de CT não apresentam correlação direta com a distância da foz dos afluentes do rio Paraíba do Sul. Ao analisar os dados da tabela, pode-se dizer que os afluentes mais próximos à foz do rio Paraíba do sul apresentam valores de CT elevados, como apresentam os rios D1 (58,7%), E1 (67,7%). Apesar disso, nota-se que alguns afluentes mais distantes da foz apresentam valores de CT ainda maiores, como no caso dos rios D9, D10 D11 e D15 para a margem direita; e E12, E 14 e E16. Estes dados indicam que afluentes distantes da foz do rio Paraíba do Sul apresentam valores próximos do perfil de ajuste do nível de base, o que não é comum e que pode ser explicado pelo fato dessas drenagens já estarem ajustadas à antigos níveis de base (Figura 4.17). Este nível de base, pode estar associado ao antigo padrão endorreico do sistema fluvial, que foi se ajustando antes da captura do rio Paraíba do Sul e incorporação ao sistema exorreico.

Os perfis normalizados dos afluentes do rio Paraíba do Sul, em sua maioria, apresentam feições côncavas para cima e abaixo da linha normal do perfil, com exceção do rio Angú (D6) que é convexo e negativo em termos de CT (Figuras 4.18 e 4.19). Este comportamento pode ser explicado pela topografia mais elevada no alto curso deste rio o que promove uma ruptura de declive no perfil longitudinal do mesmo. Esta característica também pode explicar a presença de trechos de perfil convexos (acima da linha normalizada) em outros afluentes do rio Paraíba do Sul, como no caso dos rios E3, E9 e E15 (Figuras 4.18 e 4.19). Os valores de CT nestes afluentes são considerados baixos quando comparados com os outros e, além disso, são relativamente menores em extensão.

A análise dos resultados dos perfis normalizados permite inferir que não há correlação direta entre a distância da foz e o índice de CT. Porém, no caso dos rios relativamente distantes da foz do rio Paraíba do Sul com elevados índices de CT - D9, D10 e E12 - há uma associação de suas foz localizarem-se junto a depósitos Eocenic das bacias de Volta Redonda e Resende. Estes depósitos correspondem a materiais fluviais e lacustres no interior de grabens continentais. Neste sentido, pode-se dizer que estes rios estão ajustados a este nível de base local há muito tempo e, por isso, apresentam valores elevados de CT. Esta característica corrobora com a hipótese de evolução da Bacia Hidrográfica do rio Paraíba do Sul ter se estruturado através da incorporação de bacias hidrográficas endorreicas ao sistema atlântico. Bacias hidrográficas essas que permaneceram na paisagem até recentemente, pois caso contrário o perfil normalizado dos cursos fluviais que nela desembocam não iria mais apresentar índices de CT tão elevados. Ou seja, as grandes concavidades tão distantes da foz do rio Paraíba do Sul só se explicam por níveis de base interiores estáveis e que só recentemente foram rompidos. Esta característica é outra evidência de episódios de endorreísmo no Planalto Sudeste que, posteriormente, foram integrados ao sistema exorreico atlântico. Logo, a associação de depósitos sedimentares no interior do planalto sudeste, tais como, Volta Redonda, Resende e Taubaté, e o fenômeno de elevado índice de CT melhor se explica por meio de sistemas endorreicos de drenagem estáveis formados nos grabens tectônicos que, apenas bem posteriormente, foram incorporados ao sistema atlântico pela erosão remontante do rio Paraíba do Sul que as capturou. Além destas bacias, também são conhecidos outros sistemas de grabens na região, como no caso do gráben de

Itaocara (TUPINAMBÁ, 2003) e o do rio dos Bagres no rio Pomba (OLIVEIRA, 2018). A maior parte dos depósitos sedimentares destes grabens podem ter sido erodidos pelo pulso erosivo do rio Paraíba do Sul quando estes foram incorporados ao nível de base atlântico, restando apenas testemunhos a montante de Volta Redonda. Além disso, a alta capacidade do rio Paraíba do Sul em incorporar extensas áreas à montante já foi comprovada na captura do Guararema (AB’SABER, 1957) que representa todo seu mais alto curso e, também, por capturas fluviais ao longo do divisor da Mantiqueira (CHEREM *et al.*, 2012; REZENDE *et al.*, 2013).

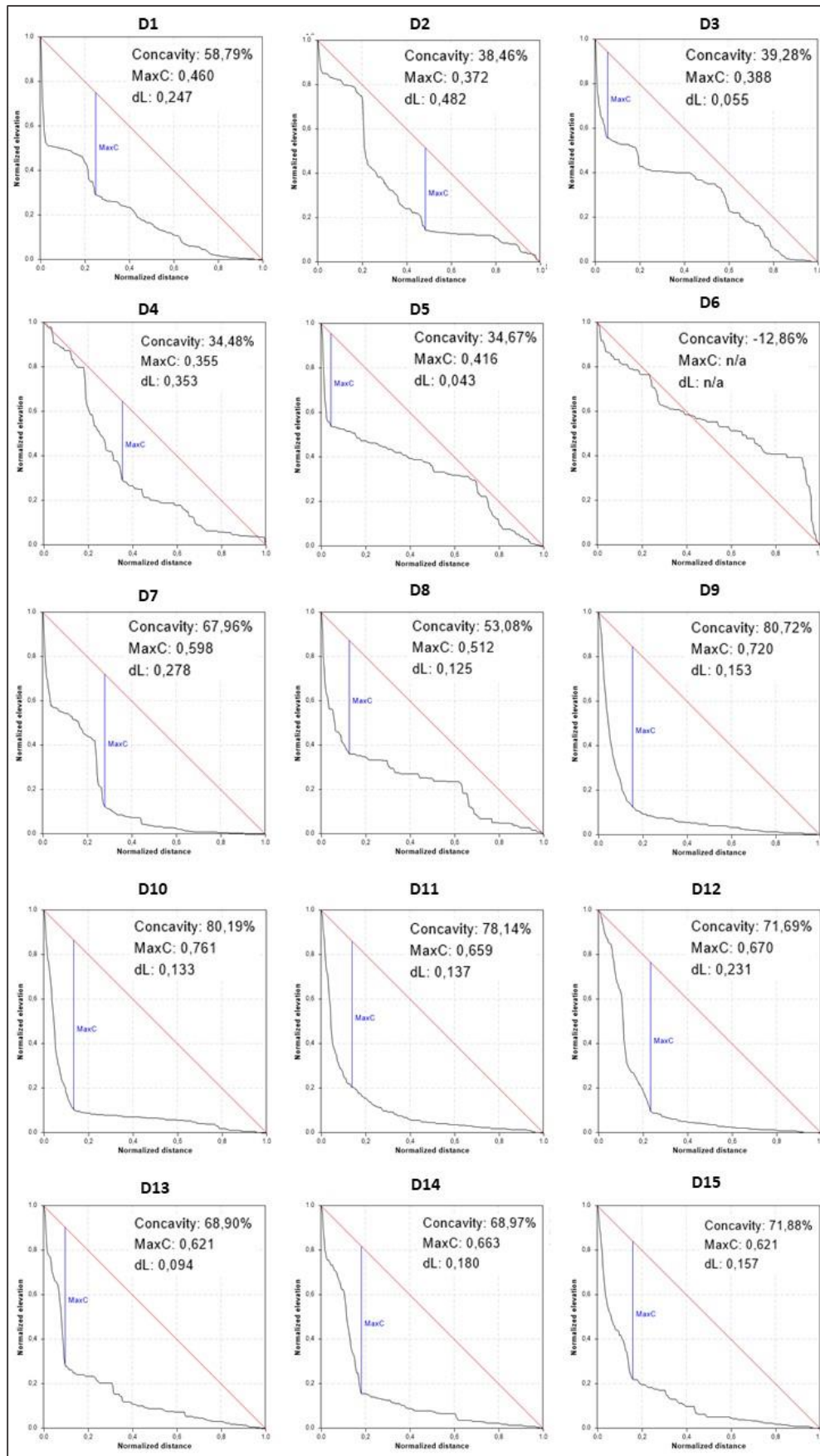


Figura 4.18: Perfis longitudinais normalizados das drenagens da margem direita do rio Paraíba do Sul.

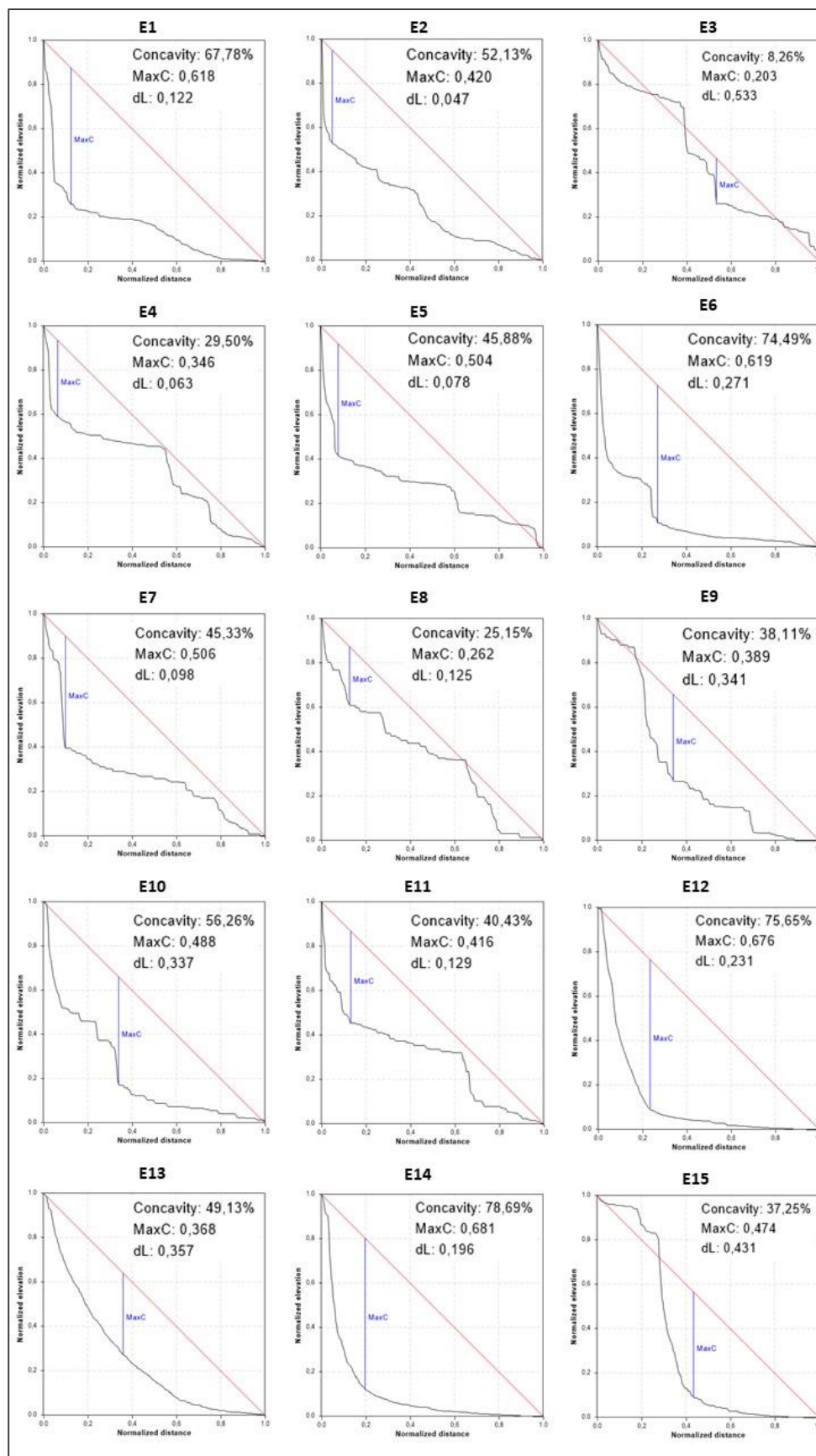


Figura 4.19: Perfis longitudinais normalizados das drenagens da margem esquerda do rio Paraíba do Sul.

4.1.4. Análise dos Mapas Seppômen

A reconstituição da paleotopografia da BHRPS contribui para a reconstituição a paleodrenagem do rio Paraíba do sul e compreensão da evolução da paisagem na região. A elaboração de Mapas seguindo a rotina Seppômen, objetiva, na presente tese, evidenciar depressões topográficas no relevo isoladas por paleodivisores. Neste sentido, a utilização das informações paleotopográficas contribui na análise da morfogênese do sistema fluvial da BHRPS no Planalto Sudeste.

Conforme mencionado anteriormente, foram elaborados mapas Seppômen ou mapa de nivelamento de topos com diferentes tamanhos de células, sendo elas: 5km x 5km (Figura 4.20); 4km x 4km (Figura 4.21); 3km x 3km (Figura 4.22); 2km x 2km (Figura 4.23); 1km x 1km (Figura 4.24). Os mapas com diferentes tamanhos de células possibilitam a reconstrução topográfica da área da BHRPS, permitindo análises em diferentes escalas espaciais e temporais. Tamanhos de células maiores são mais utilizadas para escalas espaciais e temporais maiores, enquanto que células menores são utilizadas para análises mais locais e com reconstrução de tempo mais recente. Para fins de comparação, utilizou-se o traçado atual da drenagem do rio Paraíba do Sul para a confecção do perfil topográfico entre a topografia atual e a paleotopografia da célula de maior representação espacial (5 km x 5 km).

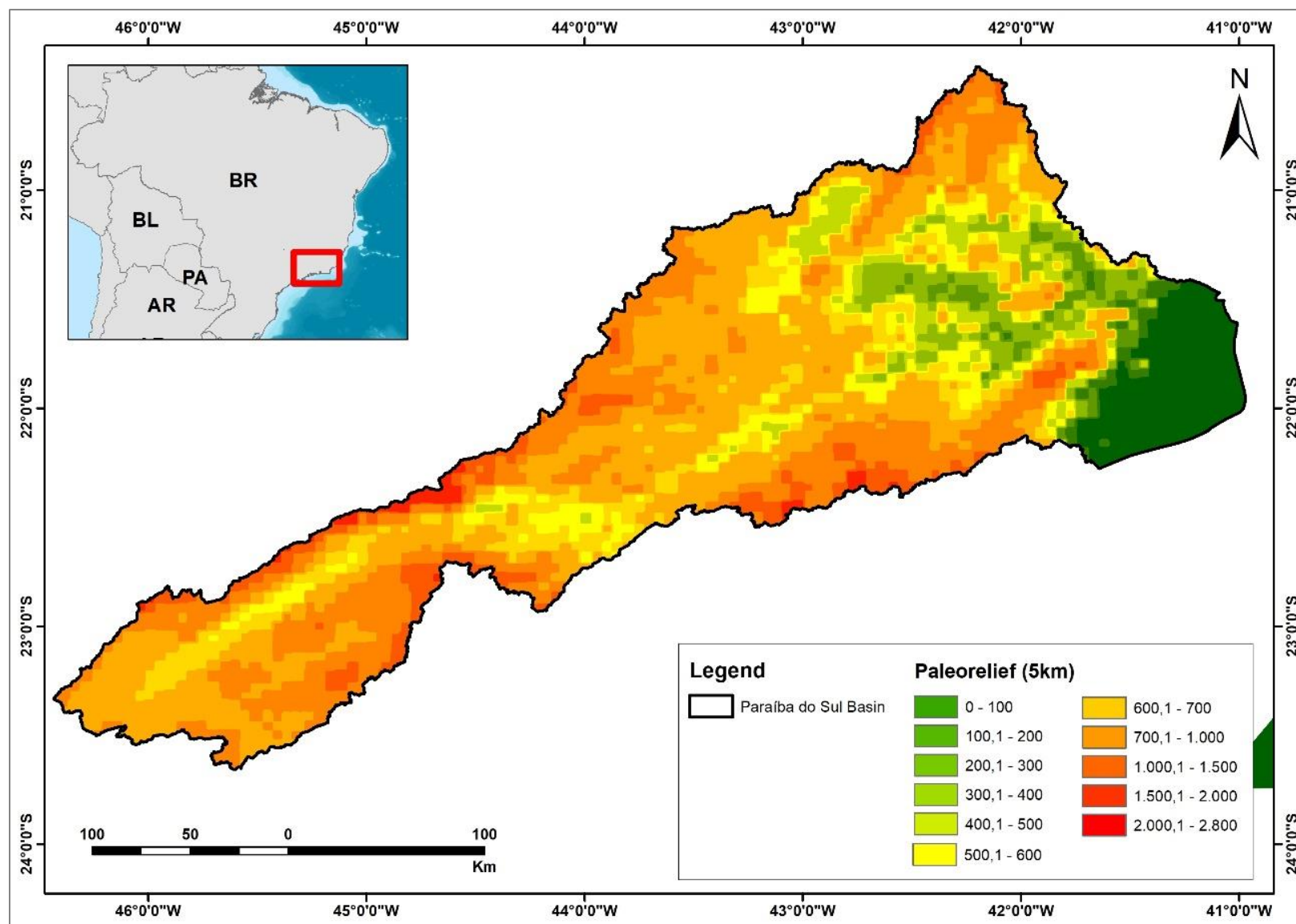


Figura 4.20: Mapa Seppômen da BHRPS com célula 5 x 5 km.

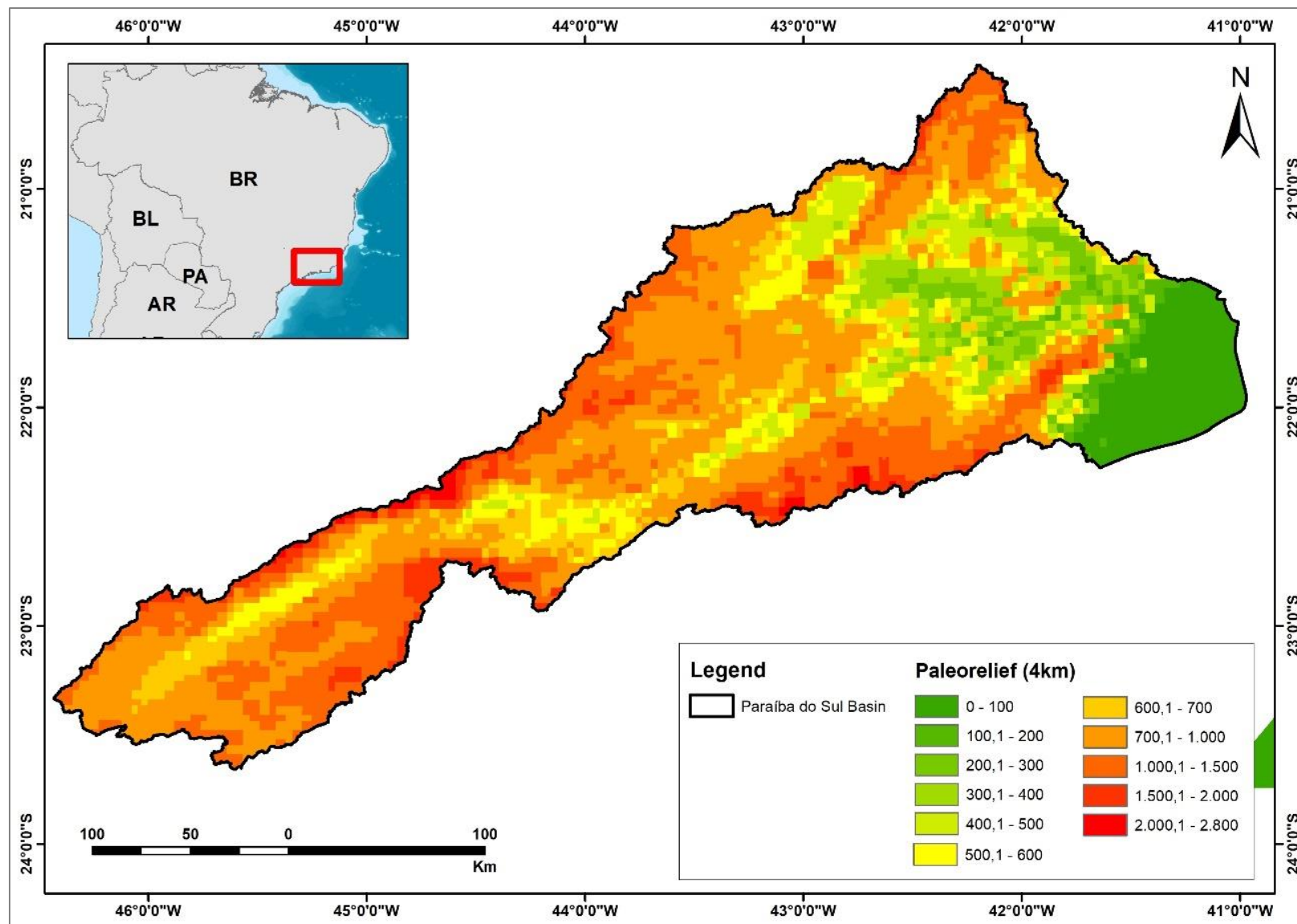


Figura 4.21: Mapa Seppômen da BHRPS com célula 4 x 4 km.

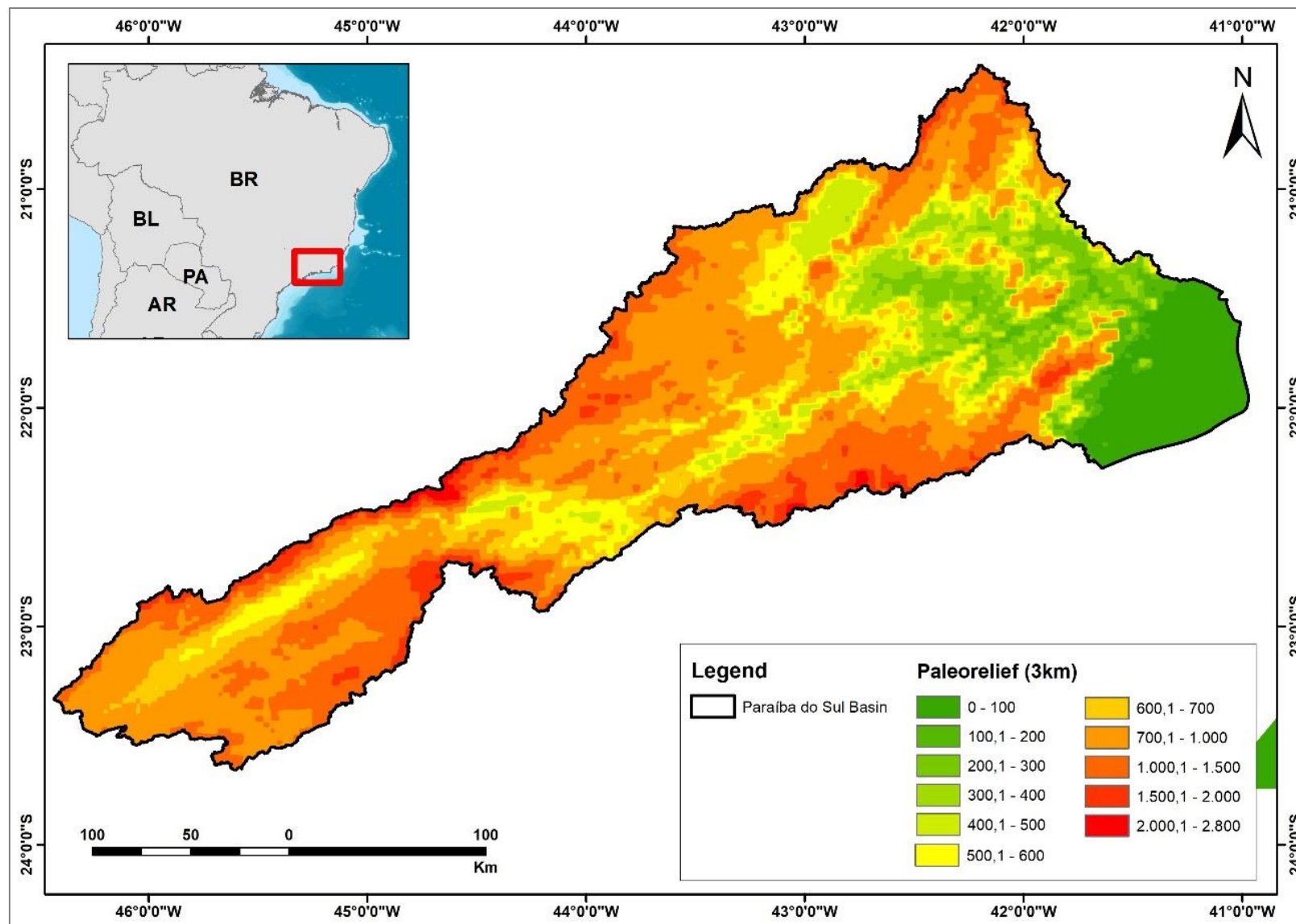


Figura 4.22: Mapa Seppômen da BHRPS com célula 3 x 3 km.

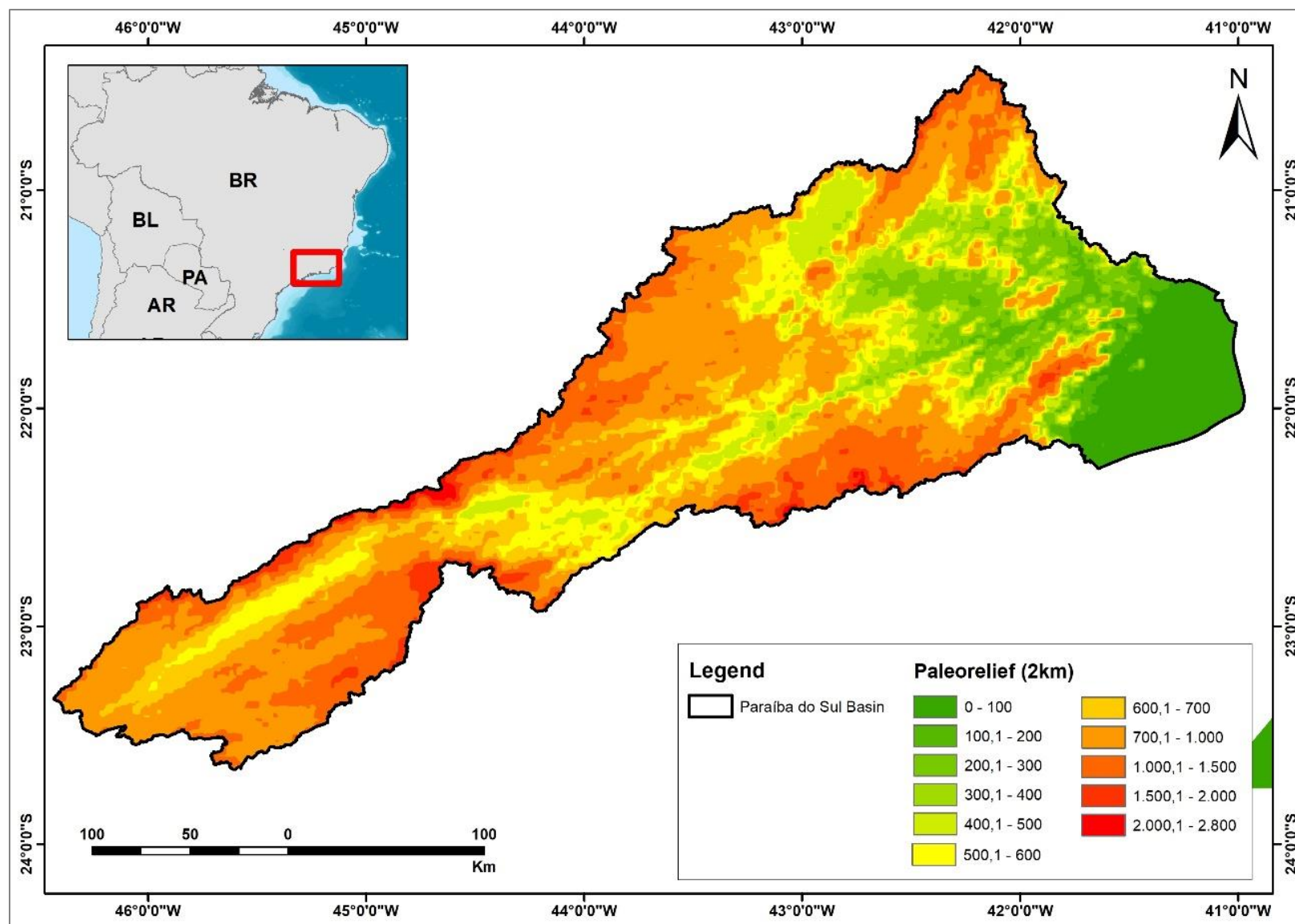


Figura 4.23: Mapa Seppômen da BHRPS com célula 2 x 2 km.

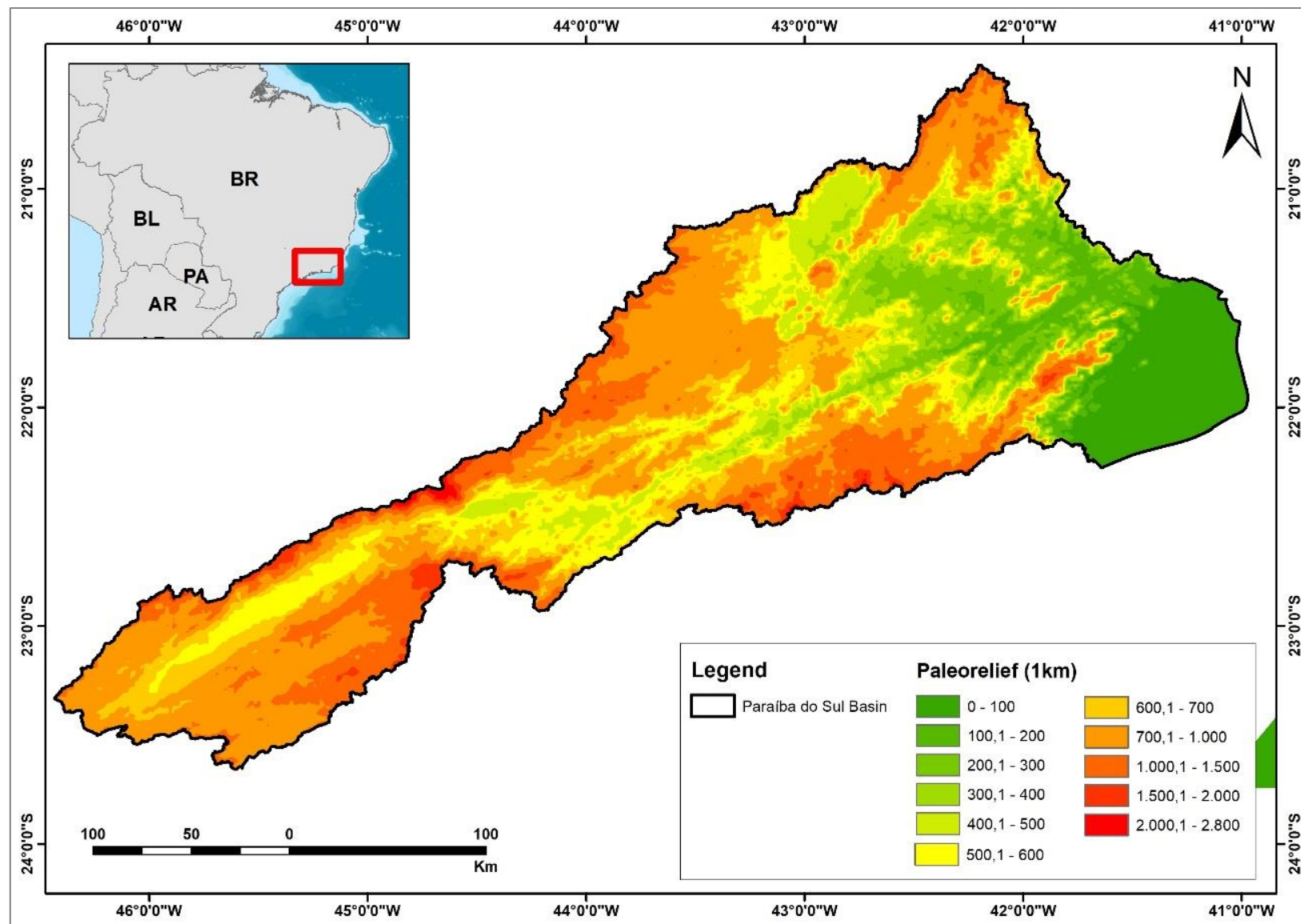


Figura 4.24: Mapa Seppômen da BHRPS com célula 1 x 1 km.

Os resultados dos Mapa Seppômen demonstram uma configuração do relevo mais elevada e remontam à dimensão do planalto Sudeste pré-dissecação do sistema fluvial do rio Paraíba do Sul. Nota-se um planalto mais extenso, com divisores mais elevados e contínuos, além de interflúvios menos íngremes.

Os resultados da reconstituição paleotopográfica demonstram características marcantes que valem ser mencionadas, como a presença de depressões desconexas ao longo da calha principal do rio Paraíba do Sul. Estas depressões são mais visíveis no mapa Seppômen com células de 5km e, conforme as células diminuem o tamanho nos mapas, as depressões passam a ser conectadas. Coincidentemente, as depressões formadas no mapa de célula de 5km, correspondem aos grábens mencionados anteriormente: Taubaté, Resende, Volta Redonda, Três Rios e Itaocara. Além destas, também foi identificada uma depressão fechada na porção nordeste da BHRPS, na nascente do rio Pomba (Figura 4.20). Oliveira (2019) analisou taxas de denudação ao longo deste divisor e identificou a formação de um gráben no rio dos Bagres, afluente do rio Pomba, o que pode explicar a formação de uma depressão nesta porção da bacia. A presença de depressões fechadas ao longo da calha principal do rio Paraíba do Sul é mais uma evidência da formação de bacias endorreicas durante um período no planalto sudeste. Pela idade dos sedimentos encontrados na bacia de Taubaté, Resende e Volta Redonda, acredita-se que este período se deu ao longo do Mioceno, com a formação dos altos estruturais e tipo de sedimentação lacustre das Formações Floriano e Pindamonhangaba.

A diminuição do tamanho das células no Mapas Seppômen elaborados para a BHRPS demonstra o entalhe fluvial e dissecação do planalto sudeste até a morfologia atual (Figuras 4.20, 4.21, 4.22, 4.23 e 4.24). Ao analisar os mapas, pode-se inferir dissecação do planalto sudeste de jusante para montante, com entalhe vertical e alargamento dos vales mais proeminente na foz da BHRPS. Esta característica pode ser explicada pelo pulso erosivo promovido pelo nível de base atlântico no litoral brasileiro. Conforme a dissecação adentra o interior do planalto sudeste, os divisores topográficos que isolavam as depressões topográficas são rebaixados e, conseqüentemente, os grábens são incorporados ao sistema de drenagem do rio Paraíba do Sul. Estas áreas podem ser observadas ao longo da calha principal do rio Paraíba do Sul e com o auxílio dos perfis apresentados na

Figura 4.05, que demonstram a formação de gargantas (gorges) e que correspondem a estrangulamentos topográficos do vale formados pela incisão fluvial em paleodivisores. A partir da incisão fluvial e rebaixamento dos paleodivisores, o sistema fluvial dos grábens no planalto sudeste brasileiro deixam de ser endorreicos e passam a integrar a bacia exorreica atlântica do rio Paraíba do Sul.

A análise do perfil topográfico elaborado para o mapa Seppômen com célula de 5km e a morfologia atual, demonstra a ocorrência de depressões ao longo da calha do rio Paraíba do Sul individualizadas por altos estruturais, como o alto de Queluz (Figura 4.25). A variação topográfica entre o produto cartográfico e o relevo atual atinge cerca de 500m próximo à nascente. Pode-se perceber que as maiores diferenças topográficas ocorrem nas porções mais elevadas, como as áreas próximas às nascentes e nos altos topográficos que delimitam os grábens. O gráfico indica maior dissecação para os grábens de Itaocara e Três Rios que se localizam mais próximos à foz, enquanto que o gráben de Taubaté apresenta a menor dissecação entre os grábens. A ausência de registro sedimentar nestes grábens pode estar associada a maior dissecação dos mesmos. O gráben de Taubaté é a depressão da BHRPS mais distante da foz o que pode explicar a menor dissecação do relevo e do seu registro sedimentar.

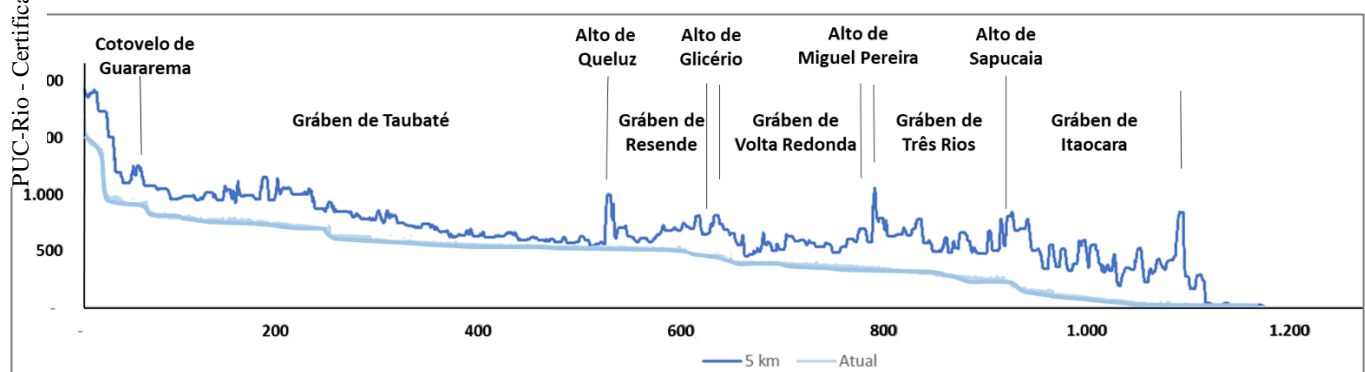


Figura 4.25: Perfil longitudinal do rio Paraíba do Sul conjugado ao perfil topográfico entre o Mapa Seppômen com célula de 5km e a topografia atual.

Estes resultados reforçam a ideia de erosão remontante do planalto sudeste gerado pelo pulso erosivo do nível de base atlântico e incorporação de bacias endorreicas interioranas por meio de capturas fluviais. Sendo o gráben de Taubaté o último sistema endorreico incorporado no sistema de drenagem atlântico do rio Paraíba do Sul.

4.1.5. Swath Profiles

A análise dos perfis topográficos, com os valores máximos e mínimos do relevo, possibilitou inferir o grau de dissecação da paisagem e, com isso, estabelecer áreas com maior ou menor potencial erosivo. Esta análise possibilita identificar a evolução erosiva da bacia através da diferença altimétrica nas áreas próximas ao divisor, tanto para a BHRPS quanto para a bacia adjacente. Neste sentido, foram traçados três perfis topográficos ao longo do divisor do rio Paraíba do Sul na Serra da Mantiqueira, sendo um no divisor com o rio Doce e dois no divisor com o rio Grande (Principal formador do rio Paraná) (Figura 4.26). Este procedimento foi realizado no divisor da Serra da Mantiqueira na borda oeste do RCSB por esta região ter sido muito influenciada pelo tectonismo Meso-Cenozoico. Além disso, o divisor da Serra da Mantiqueira foi selecionado pela possibilidade de comparação dos resultados com outros estudos realizados no mesmo compartimento geomorfológico, como Rezende *et al.* (2013), Cherem *et al.* (2012) e Marques Neto *et al.* (2019). Os autores mencionados analisaram o comportamento geomorfológico do divisor entre as bacias do rio Paraíba do Sul, com as bacias do rio Grande e rio Doce, bem como, analisaram a dissecação e recuo de cabeceira das cristas quartzíticas da Serra da Mantiqueira. Neste sentido, a análise deste divisor pode contribuir para o entendimento da morfogênese do sistema fluvial do rio Paraíba do Sul.

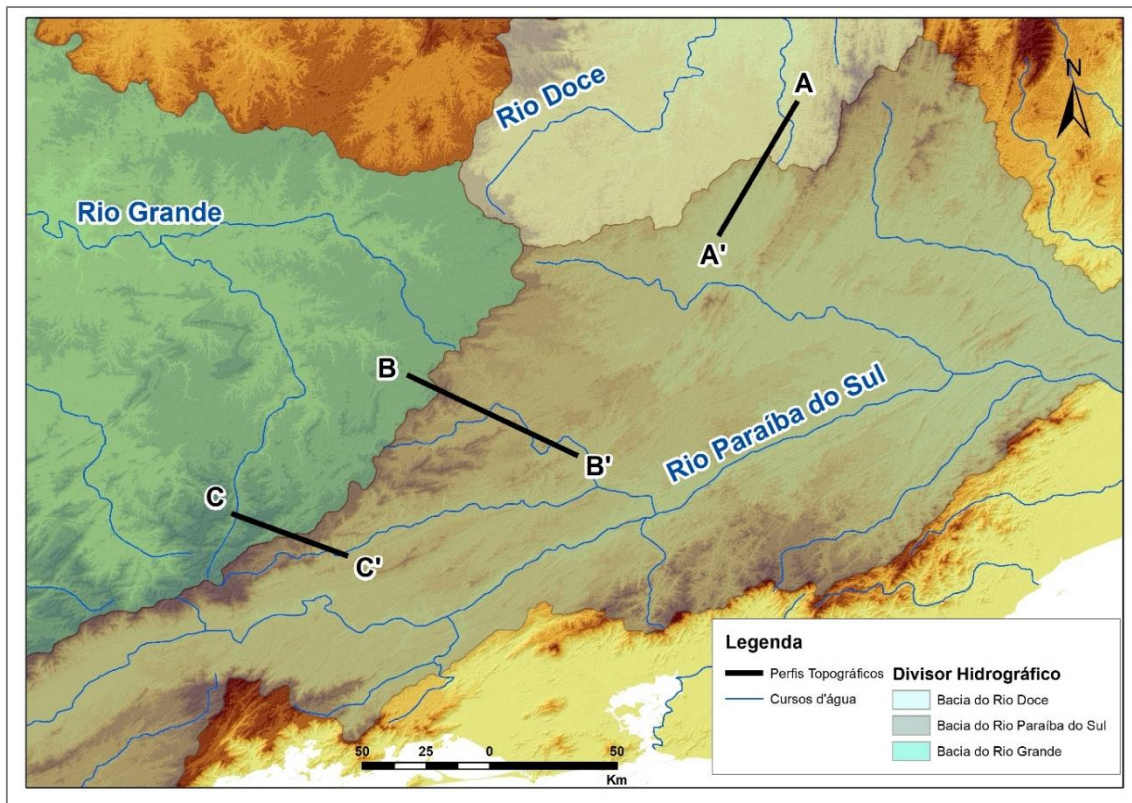


Figura 4.26: Localização geográfica dos perfis topográficos traçados ao longo da Serra da Mantiqueira. Perfil A - A' divisor Paraíba do Sul - Doce; Perfis B - B' e C - C' no divisor Paraíba do Sul - Grande.

O perfil A-A' se situa mais a nordeste em relação aos demais. Situa-se no divisor do rio Pomba com o rio Doce e apresenta drenagens sobre morfologias planálticas na porção do rio Doce, podendo atingir 200m de amplitude, enquanto que as drenagens afluentes do rio Pomba drenam a frente escarpada da Serra da Mantiqueira e o degrau inferior até o rio Paraíba do Sul. A diferença do divisor topográfico entre a porção dos afluentes do rio Doce e os do rio Pomba pode atingir até 400m de altitude e promove a ocorrência de uma morfologia escarpada ao longo do divisor das bacias (Figura 4.27).

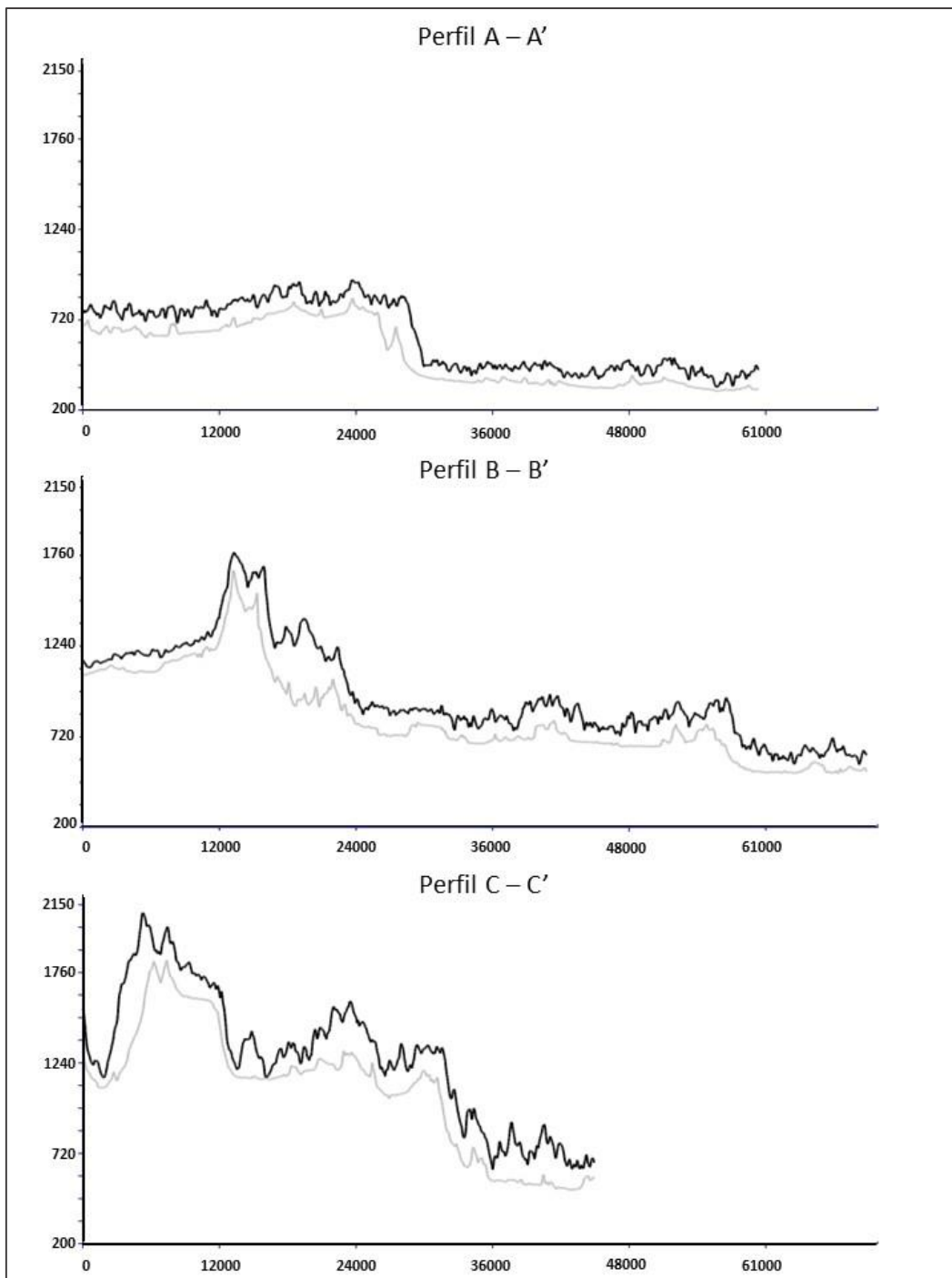


Figura 4.27: *Swath Profiles* elaborados ao longo da Serra da Mantiqueira. Linha preta indica os valores máximos e linha cinza indica valores mínimos de altitude. Perfil A - A' divisor Paraíba do Sul - Doce; Perfis B - B' e C - C' no divisor Paraíba do Sul - Grande.

O perfil B - B' se encontra na Serra da Mantiqueira que constitui o divisor entre o rio Paraibuna (afluente do rio Paraíba do Sul) e do rio das Mortes (afluente do rio Grande). Sua topografia atinge um máximo de 1.700m e um mínimo de 540m

de altitude. As drenagens associadas aos afluentes do rio Grande situam-se no degrau superior, variando entre 1200m e 1.000m, enquanto que os afluentes do rio Paraíba do Sul drenam sobre o degrau inferior entre 700m e 900m de altitude. A amplitude de relevo entre as bacias hidrográficas é de aproximadamente 300m sendo, portanto, menor que no perfil A - A'. Além disso, o piso inferior dos afluentes que drenam a frente escarpada em direção ao RCSB encontra-se em patamar topográfico mais elevado que os afluentes do rio Pomba, como demonstra o perfil A - A'.

Já o perfil C - C' está associado aos afluentes do rio Grande que escoam para o interior do continente e aos do rio Preto que drenam para o piso inferior RCSB. Este perfil apresenta as maiores elevações, podendo atingir 2180m de altitude no compartimento do rio Grande. Porém, os vales das drenagens afluentes ao rio Grande estão situados entre 1.200m e 1.400m de altitude. O mesmo ocorre com os rios que drenam para o rio Preto que apresentam altitudes semelhantes aos da sua bacia opositora.

Neste sentido, pode-se dizer que ocorre um comportamento topográfico nas bacias hidrográficas afluentes do rio Paraíba do Sul, onde a altitude média das mesmas aumenta de nordeste para sudoeste (figuras 4.26 e 4.27). Este comportamento é evidenciado pelos perfis topográficos, no qual pode ser segmentado em: degrau inferior do rio Pomba (300m - 400m); degrau intermediário do rio Paraíba (700m - 900m); e degrau superior do rio Preto (1.100m - 1400m). Deste modo é possível perceber um maior desgaste erosivo na porção nordeste deste divisor, onde o nível topográfico do piso do rio Paraíba do Sul atinge 200m de altitude. Os perfis B-B' e C-C' apresentam altitudes mais elevadas e indicam que o pulso erosivo do rio Paraíba do Sul ainda está avançando sobre estas áreas com bastante intensidade. Esta característica evidencia uma bacia hidrográfica morfologicamente construída graças a uma erosão remontante ainda muito distante de um perfil de equilíbrio. Os afluentes de sua porção jusante estão muito mais ajustados ao perfil do canal principal que os das partes montantes. A intensidade de ocorrência desse fenômeno significa que a evolução da Bacia Hidrográfica do Paraíba do Sul se insere em uma dessas três condições: (1) toda a região foi submetida a um forte pulso neotectônico e a rede de drenagem ainda está se ajustando a este soerguimento generalizado; ou (2) Há uma coincidência na

ocorrência das litoestruturas onde rochas muito resistentes frente à erosão se localizam mais a montante, rochas médias na porção intermediária e frágeis na porção jusante ou; (3) a bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul foi estruturada graças a pulsos energéticos advindos de capturas fluviais que, no caso, incorporam bacias hidrográficas endorreicas, uma após outra, de jusante para montante.

Os resultados combinados de Hiruma *et al.* (2010) e Rezende *et al.* (2013) não coadunam com a primeira opção de uma neotectônica mais ativa no Terciário Superior e no Quaternário. Pelo contrário: apontam para uma tendência de diminuição da atividade tectônica desde o Terciário Superior fato que teria permitido um equilíbrio maior aos perfis fluviais. Paralelamente, a geologia da região não possibilita que uma erosão diferencial controlada pela litoestrutura explique esse comportamento. Deste modo, por eliminação, abre-se perspectiva para a terceira possibilidade: capturas fluviais de bacias endorreicas que estavam estabelecidas no interior dos grabens do RCSB. De fato, os grabens existem na área de estudo (COSTA, 1999; RICCOMINI *et al.*, 2004; SANTOS *et al.*, 2006) e estas são zonas que, em situações de pronunciado rifteamento, no auge da atividade, tendem a impor ocorrência de drenagens endorreicas. Porém, com a estabilização do processo de subsidência, a rede de drenagem endorreica tende a se tornar exorreica. Principalmente em regiões como a área de estudo, ou seja, ainda soerguidas em relação ao nível marinho e submetidas a climas úmidos. Logo, a novidade dos resultados não está na existência de paleobacias endorreicas controladas tectonicamente no RCSB, mas sim no fato de que essas bacias hidrográficas devem ter persistido na paisagem até tempos relativamente recentes (Terciário Superior/Quaternário).

4.1.6. Fator Chi (χ)

Os valores de Chi (χ) representam a diferença de agressividade erosiva entre as cabeceiras de drenagem voltadas para diferentes bacias hidrográficas ao longo de um mesmo interflúvio. Neste parâmetro os valores mais baixos são representados por cores mais frias e quanto menores eles forem, mais agressiva tende a ser bacia hidrográfica na região do interflúvio.

Ao longo da Serra da Mantiqueira as bacias hidrográficas investigadas apresentaram diferenças significativas em seus valores de Chi (χ) sendo possível perceber que, de maneira geral, o nível de base local mais elevado determinou os maiores índices. De fato, foram realizadas três análises de valores de Chi (χ) nas mesmas regiões onde foram traçados os perfis de Swath Profile: divisor rio Pomba e rio Doce; rio Paraibuna e rio Grande; rio Preto e rio Grande (Figura 4.26). Estes valores variaram entre os divisores, sendo essa variação mais significativa para o interflúvio entre o rio Preto e o rio Grande, situado mais ao sudoeste, e a menor entre o rio Pomba e o rio Doce, mais a nordeste. Vale ressaltar que os valores de Chi (χ) para os divisores do rio Pomba e o rio Doce apresentaram valores muito próximos a 1,0. Entretanto, mesmo nesse caso, as vertentes voltadas para o rio Pomba apresentam índices inferiores aos de sua bacia adjacente (Figura 4.28a), pois nela variam entre 0.6 e 1.2, enquanto que para as do rio Doce estão entre 0.8 e 1.4. Entretanto, em um trecho desse interflúvio as vertentes voltadas para a bacia hidrográfica do rio Doce apresentaram valores inferiores de Chi (χ) em relação às do rio Pomba (Figura 4.28a). Isto ocorre justamente onde Cherem *et al.* (2012) identificaram um processo de captura fluvial.

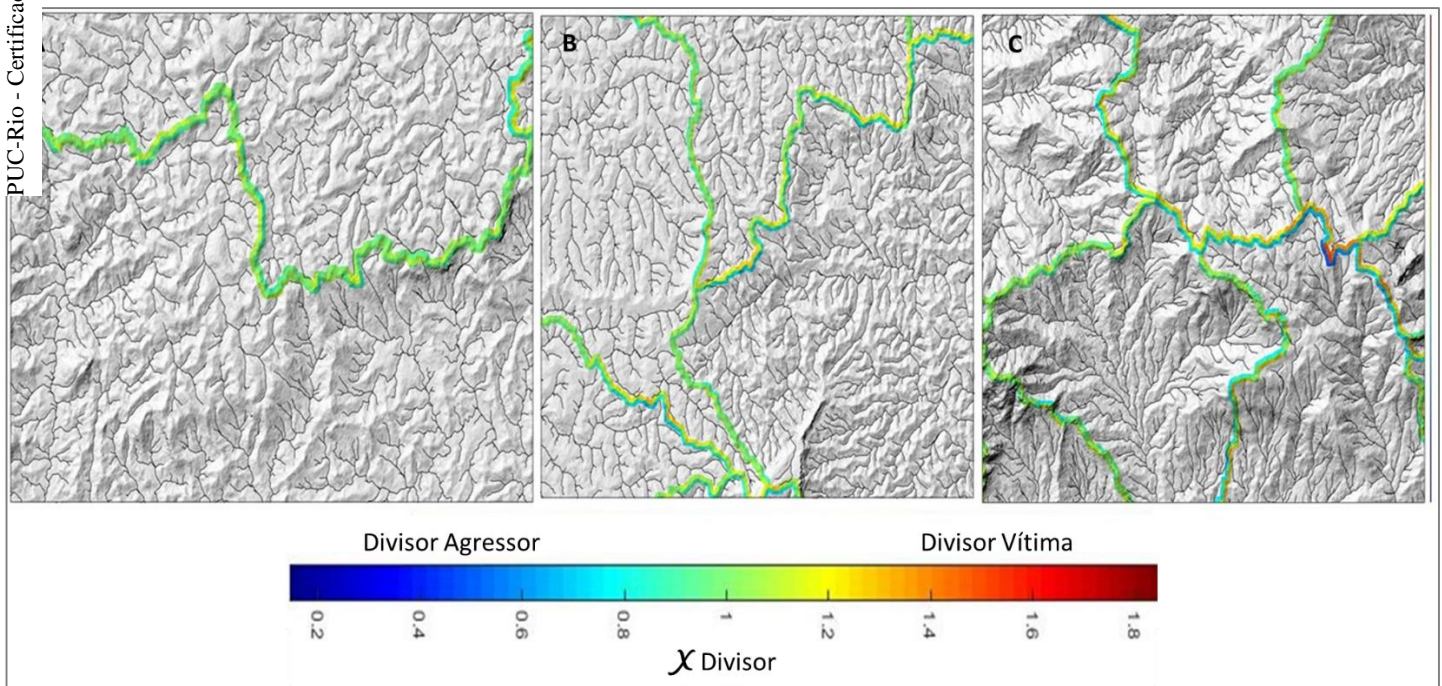


Figura 4.28: Valores de Chi (χ) ao longo do divisor da Serra da Mantiqueira do rio Paraíba do Sul. A localização destas áreas no contexto da BHRPS pode ser visto na Figura 4.16.

Para o interflúvio entre o rio Paraibuna e o Grande a diferença entre os valores de Chi (χ) são maiores se comparados ao caso anterior. Apesar disso, as características são semelhantes, com os menores valores associados ao Paraibuna que é o afluente do rio Paraíba do Sul, onde variam entre 0.4 e 1.0, enquanto que para a bacia do rio Grande circulam entre 1.0 e 1.4 (Figura 4.28b). Já o Chi (χ) no divisor entre o rio Preto e o Grande apresenta as maiores diferenças entre os interflúvios analisados, com as vertentes voltadas para o rio Paraíba do Sul circulando entre 0.2 e 0.8 e as para o rio Grande entre 1.2 e 1.6 (Figura 4.28c).

Em claro acordo com as taxas de denudação mensuradas por Cherem *et al.* (2012) e Salgado *et al.* (2016) para essas mesmas áreas, os resultados de Chi (χ) demonstram um maior potencial erosivo dos afluentes que drenam para o rio Paraíba do Sul em relação às suas bacias adjacentes que fluem para o interior do planalto. A semelhança entre os valores de Chi (χ) para o divisor do rio Pomba e do rio Doce indicam que aquela porção se encontra em estágio mais próximo do equilíbrio. Já os valores de Chi (χ) para os outros dois divisores indicam um maior desequilíbrio, ou seja, o recuo erosivo do interflúvio em favor da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul é muito mais proeminente. Este comportamento é mais evidenciado no divisor mais à montante, ou seja, aquele entre o rio Preto e o rio Grande. Isto confirma os resultados obtidos através da análise do Swath Profile onde é possível perceber que a porção média e montante da área de estudo na Bacia Hidrográfica do rio Paraíba do Sul estão muito mais distantes de um perfil de equilíbrio em termos de erosão do que a do rio Pomba. Pode-se afirmar que o pulso erosivo do rio Paraíba do Sul ocorreu de maneira remontante sobre o planalto sudeste do Brasil e no sentido de nordeste para sudoeste ao longo do divisor da Serra da Mantiqueira. Sendo assim, o pulso erosivo alcançou o interflúvio nordeste antes do divisor do rio Preto na porção sudoeste e, com isso, os valores de Chi (χ) refletem este processo. Na porção nordeste, o processo já estabilizou ao longo do tempo, mas ainda está evidente na porção sudeste por ter atingido esta região mais recentemente. Como já dito, as morfologias dos perfis de Swath Profile contribuem para esta análise, uma vez que a porção nordeste já rebaixou significativamente o

degrau inferior do Paraíba do Sul, enquanto que nas porções mais a sudoeste, ainda podem ser identificados planaltos relictos para serem dissecados.

A evidência da erosão remontante no Planalto Sudeste a partir da porção atlântica para o interior do continente, corrobora a ocorrência de momentos de endorreísmo de drenagem que foram incorporados ao sistema exorreico. Este rearranjo de drenagem ocorreu primeiro na porção da ZC de Itaocara e avançou para o divisor da Serra da Mantiqueira através do rio Pomba. Posteriormente, o recuo erosivo avançou na direção sudoeste ao longo do divisor da Mantiqueira e sobre o Planalto Sudeste, incorporando os sistemas endorreicos de Três Rios, Volta Redonda, Resende e Taubaté. Os resultados de Swath Profiles e de Fator Chi no divisor reforçam esta ideia.

4.2. Análise Divisor Paraná / Paraíba do Sul: O caso da Sub-bacia do Rio Paraíbauna

Neste item, serão apresentados os resultados das análises morfológicas e morfométricas no divisor hidrográfico da Serra da Mantiqueira, cujas elevações separam os rios afluentes da bacia do rio Paraíbauna, que drena a frente escarpada em direção à calha principal do rio Paraíba do Sul, e as drenagens interioranas do reverso da escarpa que correm em direção à bacia do rio Paraná (Figura 4.29). Conforme dito anteriormente, este divisor foi bastante influenciado pela tectônica Meso-Cenozoica que ocorreu no Planalto Sudeste e, com isso, o estudo pormenorizado desta região pode contribuir e corroborar para os apontamentos da presente tese para a morfogênese do sistema fluvial da BHRPS. Ressalta-se que serão analisados parâmetros morfológicos e morfométricos, com o objetivo de identificar evidências de capturas fluviais, migração de divisor e anomalias de drenagem.

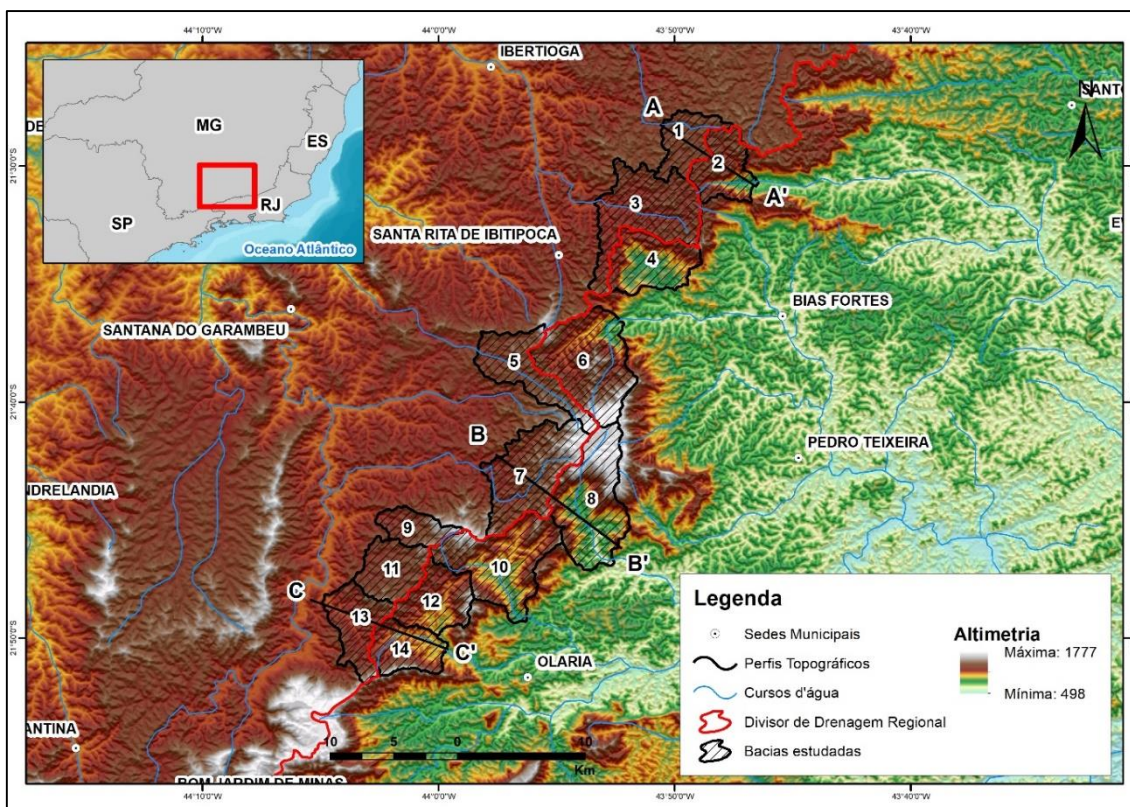


Figura 4.29: Localização geográfica e contexto altimétrico do divisor hidrográfico da Serra da Mantiqueira, no estado de Minas Gerais, e as bacias estudadas. 1. Córrego do Teixeira; 2. Córrego Ponte Funda; 3. Rio das Elvas; 4. Ribeirão dos Almeidas; 5. Ribeirão Bandeira; 6. Rio Vermelho; 7. Ribeirão Conceição; 8. Córrego do Salto; 9. Ribeirão Retiro do Meio; 10. Ribeirão Cata Maior; 11. Ribeirão do Váú; 12. Córrego Fundo; 13. Córrego Ponte Funda; 14. Ribeirão Palmital. As bacias ímpares drenam para o interior do continente, enquanto as bacias pares drenam para o RCSB.

4.2.1. Perfis Topográficos e Longitudinais

Ao analisar os perfis topográficos (figuras 4.30 e 4.31) pode-se afirmar que, para as bacias interioranas, o relevo apresenta baixa amplitude, aproximadamente 200 metros, entre os topos e os fundos de vale. As médias altimétricas não apresentam variações significativas. Em contrapartida, os setores do perfil associadas às bacias que drenam para o RCSB possuem amplitude de relevo considerável, variando entre 1.250m e 750m.

Na porção NW os perfis possuem morfologias típicas de planalto com gradiente de relevo suave e os vales das bacias interioranas situam-se, aproximadamente, à 1.100m de altitude (Figura 4.30). Em direção para SE, os perfis apresentam relevo escarpado no degrau topográfico, próximo aos divisores de

drenagem. A transição para a porção escarpada indica nível de base mais baixo e, por isso, o gradiente topográfico é maior podendo atingir 500m de diferença entre os topos e fundos de vale.

Os divisores topográficos de drenagem situam-se à montante da frente escarpada da Serra da Mantiqueira, incorporando áreas planálticas para as bacias que drenam ainda para o gráben do Paraíba do Sul (Figuras 4.30 e 4.31). Esta configuração, onde a bacia que drena o piso inferior do degrau no relevo incorpora áreas do planalto – piso superior – foi observada em quase todos os estudos que investigaram os grandes divisores hidrográficos do sul e sudeste do Brasil e constituem bons indicativos de capturas fluviais e rearranjos da rede de drenagem (CHEREM *et al.*, 2012; SALGADO *et al.*, 2016; REZENDE *et al.*, 2013; SORDI *et al.*, 2015).

Paralelamente, a análise dos perfis longitudinais dos rios investigados (Figura 4.31) demonstra que para as drenagens situadas no planalto interiorano, o perfil se comporta de maneira uniforme, sem variações altimétricas significativas. Contudo, as bacias afluentes do rio Paraíba, em direção ao RCSB, possuem variações altimétricas significativas, indicando a ocorrência de anomalias de drenagem associadas à knickpoints. Nota-se que as bacias do RCSB apresentam patamares elevados, em altitudes semelhantes às bacias interioranas, em contato direto com rupturas abruptas no perfil longitudinal. Esta característica marca a transição entre patamares elevados e as frentes escarpadas do relevo. O córrego do Salto e o rio Vermelho são as bacias que possuem as maiores rupturas no perfil longitudinal do rio, com aproximadamente 300m e 200m, respectivamente.

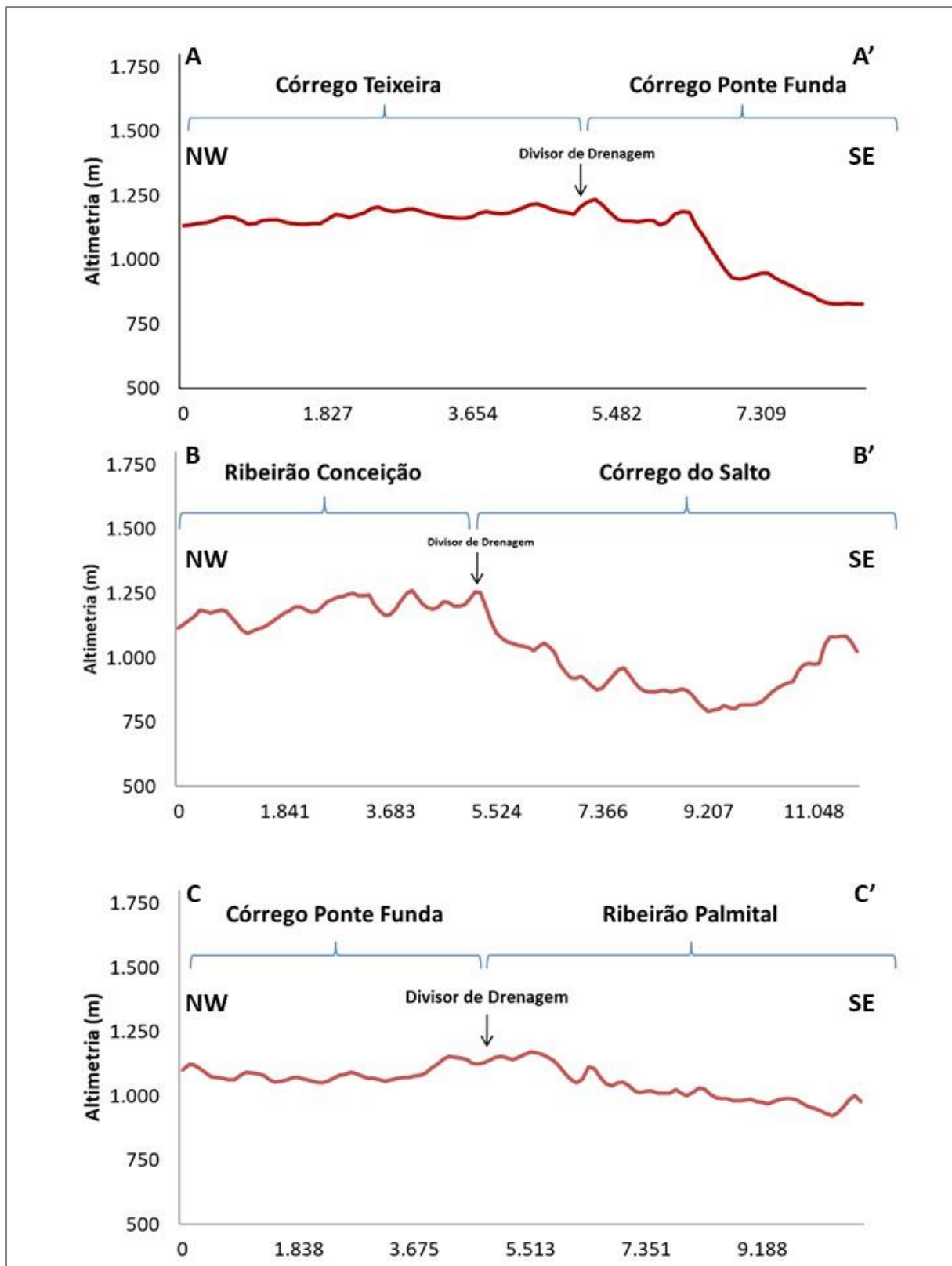


Figura 4.30: Perfis topográficos elaborados na área de estudo. A localização dos perfis pode ser identificada na Figura 4.29.

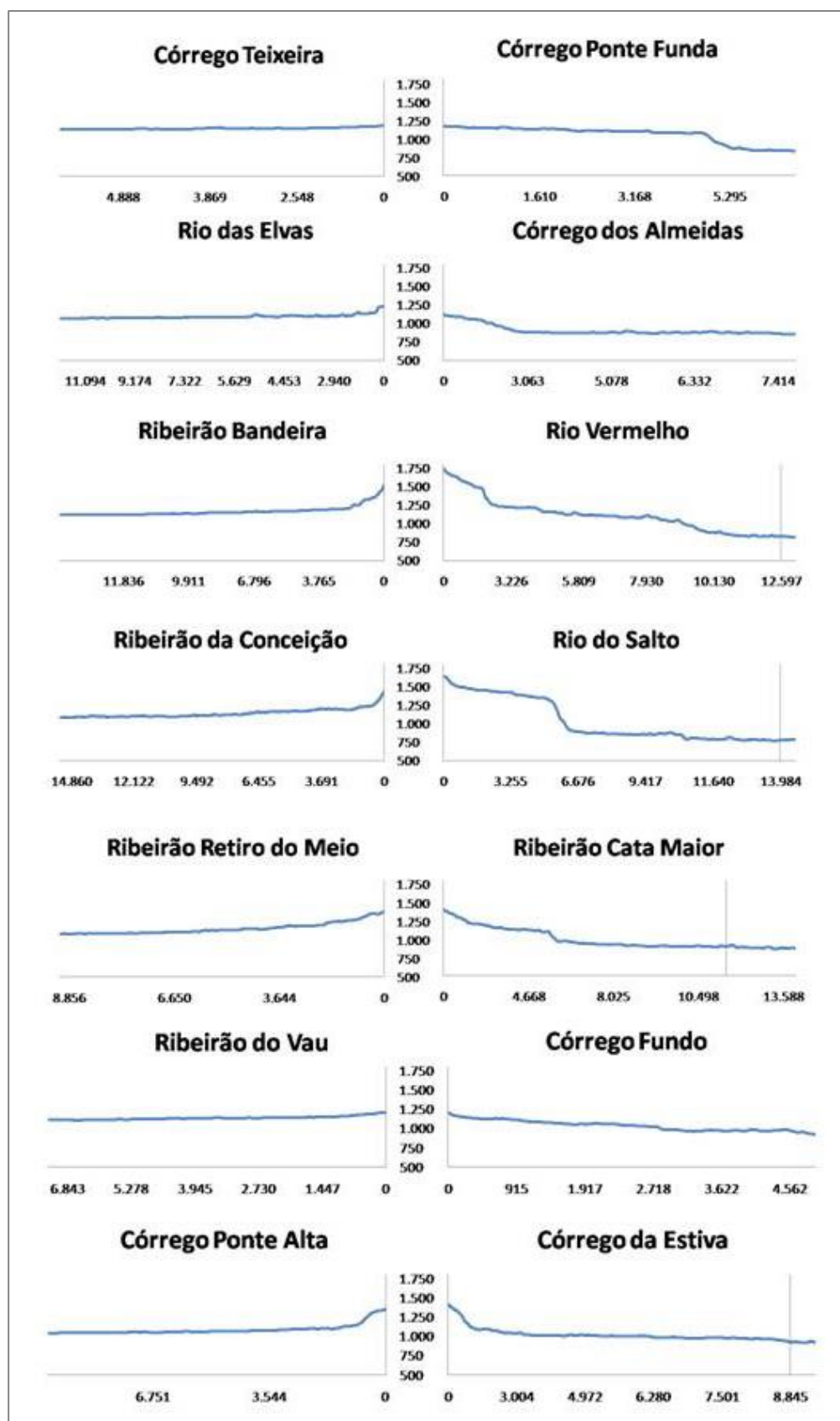


Figura 4.31: Perfis longitudinais dos rios principais das bacias estudadas. Os perfis da parte esquerda estão associados às bacias que drenam para o interior, enquanto os perfis da direita drenam para o RCSB.

Os perfis longitudinais das bacias que drenam para o RCSB possuem níveis de base suspensos, que marcam os degraus topográficos da paisagem e que, em sua maioria, são representados por cachoeiras de elevadas dimensões. A presença de degraus topográficos ou níveis de base indicam mudanças na dinâmica erosiva dos canais de drenagem e marcam a presença de trechos suspensos dos rios. Apesar disso, as bacias do córrego Fundo e o ribeirão Palmital não apresentam morfologias associadas a níveis de base ou knickpoints (Figura 4.31) e, neste trecho, estão no mesmo nível topográfico dos seus pares de bacia que drenam para o planalto interiorano. Esta característica indica que o rio ainda apresenta características de quando era ajustado ao antigo nível de base.

O comportamento dos perfis longitudinais reflete os resultados identificados nos perfis topográficos. As bacias do reverso da Serra da Mantiqueira drenam sobre relevos planálticos e de baixa amplitude altimétrica, com isso, o perfil longitudinal dos rios apresenta, em sua maioria, feição côncava sem rupturas significativas. Já as bacias em direção ao rifte Paraíba do Sul, drenam sobre setores planálticos de baixa amplitude de relevo, até atingirem as frentes escarpadas da Serra da Mantiqueira e cair para o piso inferior do degrau topográfico.

4.2.2. Índice RDE e Densidade de *Knickpoints*

Os resultados obtidos com os índices RDE dos canais de drenagem possibilitaram indicar a ocorrência de anomalias nos perfis longitudinais, consideradas como knickpoints. A formação dos mesmos pode estar relacionada com mudança litológica ou condicionante estrutural e pode ser representado por trechos de corredeiras e cachoeiras ao longo do canal. Na presente tese, objetiva-se analisar áreas com alto índice de RDE como evidência de capturas fluviais, bem como, de porções do relevo que estão sofrendo ajuste ao novo nível de base.

Ao todo, foram identificados 2.462 knickpoints, sendo que aproximadamente 38% encontram-se nas bacias interioranas e 62% situam-se nas bacias que drenam para o gráben do Paraíba do Sul (Figura 4.32). Além disso, pode-se perceber que a densidade de knickpoints é maior nas bacias voltadas para o RCSB do que nas bacias interioranas.

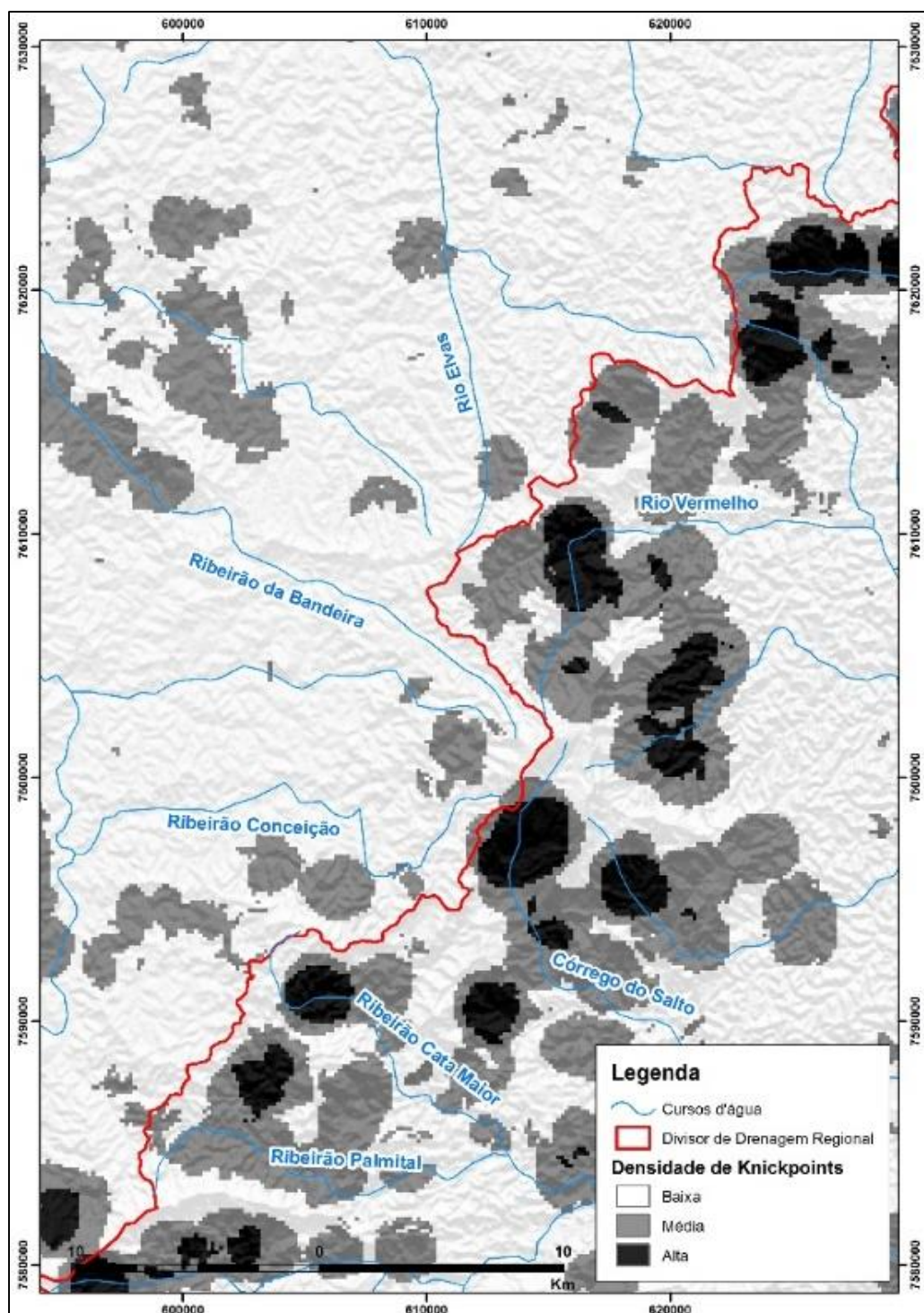


Figura 4.32: Densidade de *knickpoints* identificados na área de estudo por meio da ferramenta *Knickpoint Finder*.

Os knickpoints identificados foram classificados em 1ª ordem e 2ª ordem, associados à corredeiras e cachoeiras, respectivamente. Na área de estudo, predominam knickpoints de 2ª ordem (1.933) associados às rupturas de declive nas escarpas da Serra da Mantiqueira representadas por cachoeiras. Já os knickpoints de primeira ordem, situam-se, prioritariamente, na porção do planalto interiorano,

pois abrangem relevo de menor amplitude altimétrica e perfis longitudinais mais ajustados ao nível de base do rio Grande.

Pode-se perceber que a densidade dos knickpoints é maior próximo ao divisor hidrográfico regional entre as drenagens do rio Paraíbuna e rio Grande (Figura 4.32). A densidade também é maior nas bacias que drenam para o gráben do Paraíba do Sul, principalmente, no contato entre a frente escarpada da Serra da Mantiqueira e os planaltos elevados que foram capturados. Este comportamento foi observado por Sordi *et al.* (2015), ao identificar maior densidade de knickpoints em bacias hidrográficas que drenam para o piso inferior do degrau no relevo na Serra do Mar no estado de Santa Catarina.

4.2.3. Lineamentos Estruturais e Orientação da Rede de Drenagem

Ao longo do divisor da sub-bacia do rio Paraíbuna foram traçados os lineamentos estruturais utilizando-se o software ArcGis 10.1 e gerada roseta de orientação dos mesmos no software OpenStereo 0.1.2 para avaliar o controle estrutural regional. Foram extraídas as orientações dos canais de 1ª e 2ª ordem da área de estudo para correlação com os resultados obtidos dos lineamentos estruturais. A análise destes dados possibilita identificar possíveis controles estruturais no desenvolvimento e orientação dos canais de drenagem na área de estudo.

Os lineamentos estruturais são identificados em toda área de estudo, tendo sua densidade elevada em vários setores da mesma. A maior densidade de lineamentos pode ser encontrada na porção noroeste da área de estudo dentro dos limites da bacia do rio Elvas afluente do rio Grande. Na porção sudeste da área de estudo, também é possível observar elevada concentração de lineamentos estruturais associadas à bacia do rio Paraíbuna (Figura 4.33). Em alguns trechos, a frente escarpada da Serra da Mantiqueira apresenta densidade de lineamentos elevada, principalmente, na bacia do córrego Vermelho e ribeirão Palmital. Ao longo do divisor hidrográfico das bacias do rio Paraíbuna e do rio Grande, apenas a porção norte apresenta densidade de lineamentos elevada.

A orientação preferencial dos lineamentos da área de estudo é N50W seguido pelas direções N40W e N50E, sendo os lineamentos N-S e W-L os menos

representativos. As rosetas de orientação dos lineamentos das bacias hidrográficas do rio Paraíba e do rio Grande são muito semelhantes no que tange às orientações preferenciais. Ambas apresentam a direção N50W como a mais representativa, variando muito pouco nas direções secundárias. Na região hidrográfica do rio Paraíba, a segunda direção mais representativa é N50E, enquanto que as bacias afluentes do rio Grande apresentam a direção N40W (Figura 4.33).

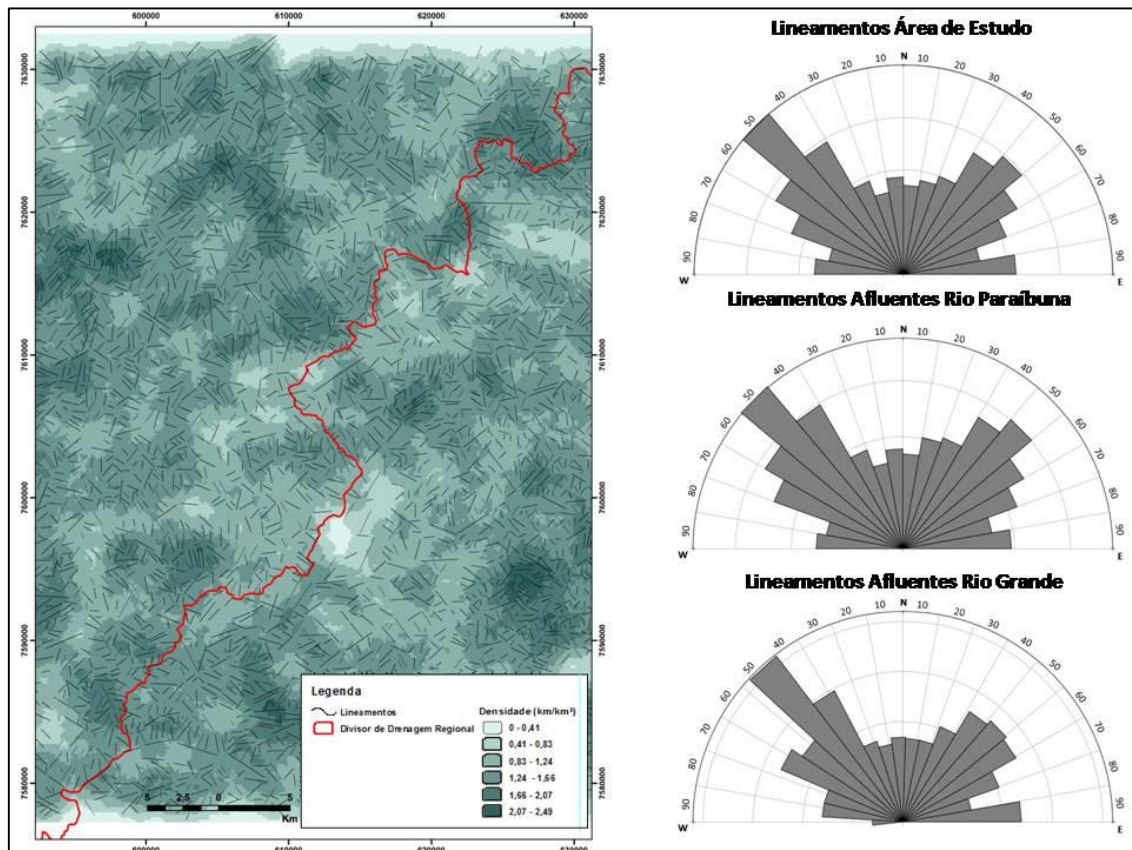


Figura 4.33: Densidade de lineamentos e roseta de orientação da área de estudo.

Na região da Serra da Mantiqueira, outros estudos demonstram o controle estrutural do relevo às zonas de cisalhamento regionais reativadas durante os eventos de rifteamento continental com direção predominante para NE-SW (MARQUES NETO, 2017). Silva (2004) enfatiza que, para a região do Parque Estadual de Ibitipoca, o tectonismo de idade Plio-Pleistocênica exerceu influência estrutural no relevo, com direções NE-SW e E-W de direções preferenciais de lineamento. Ao correlacionar os lineamentos estruturais com os segmentos de drenagem, Neto (2017) identificou que os rios com direções preferenciais para NE-SW estão submetidos ao controle de estruturas reativadas, enquanto que os rios que

drenam na direção NW-SE estão associados a orientação de drenagem invertida a partir do basculamento que soergueu a Mantiqueira.

As rosetas de orientação dos canais de 1ª e 2ª ordem na área de estudo, indicam predomínio de canais para a direção do quadrante NW, contudo, com boa representação de canais voltados para NE (Figura 4.24). Ao analisar os eixos de canais na área de estudo, nota-se a direção N60W como a mais representativa, contudo, as direções N50W e N70W também apresentam valores elevados de frequência. Apesar disso, também se observa frequências representativas para as direções N70E, N80E e N20E (Figura 4.34). Os canais afluentes do rio Paraíba do Sul apresentam orientação preferencial para N50W, seguido pelas direções N70W e N20E. Já os afluentes do rio Grande que drenam sobre o planalto interiorano possuem direção preferencial N20W, além das direções N60W e N30W (Figura 4.34). Neste sentido, pode-se dizer que na área de estudo ocorre controle estrutural na orientação dos canais de drenagem, sendo corroborados pela análise das rosetas de lineamentos e eixos, com direção preferencial para NW. Este comportamento é mais evidenciado nos afluentes do rio Paraíba do Sul, pois possuem a mesma direção predominante que os lineamentos estruturais, N50W.

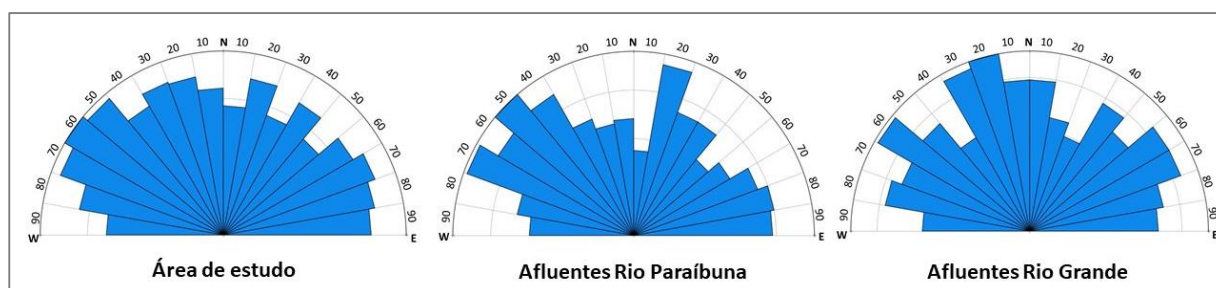


Figura 4.34: Roseta de Orientação dos canais de 1ª e 2ª ordem na área de estudo.

4.2.4. Stream Power Index (SPI)

Em termos morfológicos, as taxas máximas e mínimas de SPI apresentaram mudanças significativas nos valores entre as bacias, contudo, o valor médio das bacias se manteve semelhante (Figura 4.35). Os valores médios variaram entre -0,08 para o rio Elvas e 0,08 para o córrego do Salto. A taxa de SPI mais elevada foi identificada na bacia do Rio Vermelho (8,69), enquanto a bacia do

córrego do Salto apresentou o valor mais baixo (-11,96) (Figura 4.35). Logo, em sua maioria, as bacias que drenam para o RCSB apresentam os valores máximos mais elevados em relação às bacias do planalto interiorano. Para as bacias do RCSB as taxas de SPI máximas variam entre 8,69 e 2,23, e nas bacias do planalto interiorano variam entre 4,65 e 1,03. Os valores mínimos também apresentam esta característica, tendo taxas mínimas mais elevadas para as bacias do RCSB, variando entre -5,55 e -11,96, enquanto que as bacias do planalto interiorano variam entre -2,92 e -7,86 (Figura 4.35). Ao comparar as taxas de SPI entre os pares de bacia apresentados na Figura 4.18, as bacias do RCSB apresentam valores mais elevados do que as bacias interioranas em todos os casos. Este comportamento aponta para um maior potencial erosivo nas bacias que drenam frentes escarpadas do que nas bacias situadas nos planaltos superiores com morfologia mais suave.

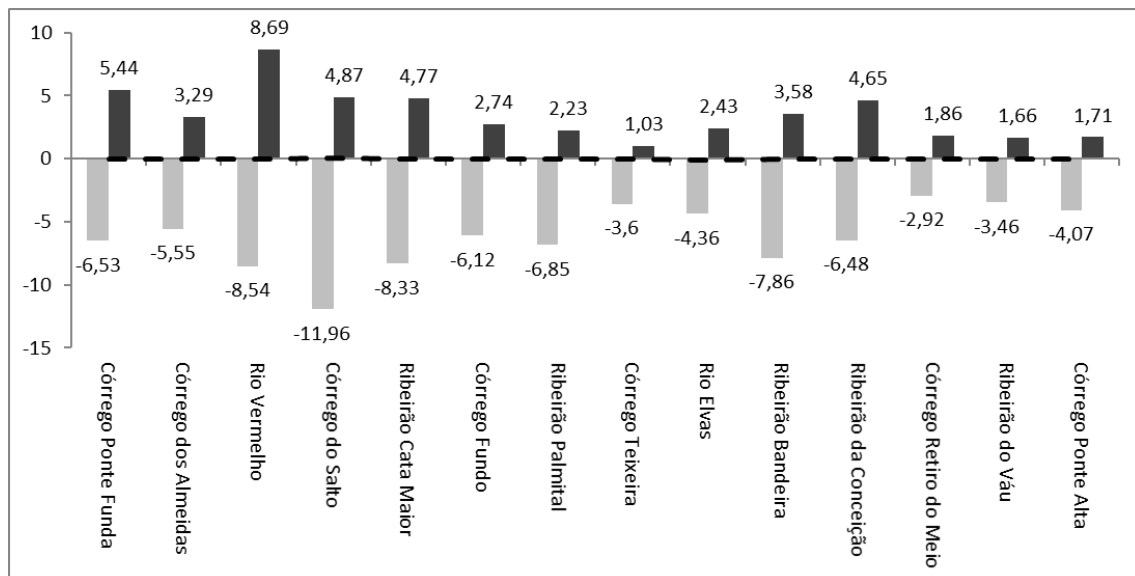


Figura 4.35: Valores de Stream Power Index (SPI) das bacias estudadas. As 7 primeiras bacias da esquerda para direita drenam para o RCSB e as outras 7 drenam para o planalto interiorano. A barra preta indica valores máximos, a barra cinza os valores mínimos e a linha indica os valores médios para cada bacia.

Nota-se uma diminuição dos valores máximos de SPI para as bacias do RCSB de norte para sul, sendo o córrego Fundo e o ribeirão Palmital os valores mais baixos (Figura 4.35). Isto pode ser explicado através dos dados dos perfis longitudinais, uma vez que estes rios não apresentam rupturas significativas ao longo do perfil. Além disso, as cotas altimétricas destas bacias estão muito próximas dos seus pares interioranos, indicando que apesar de estarem associadas

ao nível de base do rifte Paraíba do Sul, ainda apresentam morfologias relacionadas ao planalto interiorano. Logo, deduz-se uma expansão da frente de dissecação nesta região no sentido norte-sul.

4.2.5. Mecanismos de Capturas Fluviais no Divisor Paraná / Paraíba do Sul

A análise da rede de drenagem no divisor de drenagem Paraná / Paraíba do Sul demonstrou feições geomorfológicas típicas de anomalias, tais como cotovelos, e a ocorrência de capturas fluviais. Foram identificados divisores rebaixados entre as bacias analisadas que são caracterizados por divisores topográficos com aspecto plano, bem como, a presença de vales superdimensionados em cotas topográficas elevadas (Figura 4.36). Estas feições indicam processos de reorganização fluvial por meio de capturas de drenagem, que ao capturar rio adjacentes, promovem mudança na direção do segmento do rio, formando um cotovelo, bem como, a formação de um divisor rebaixado e um vale superdimensionado.

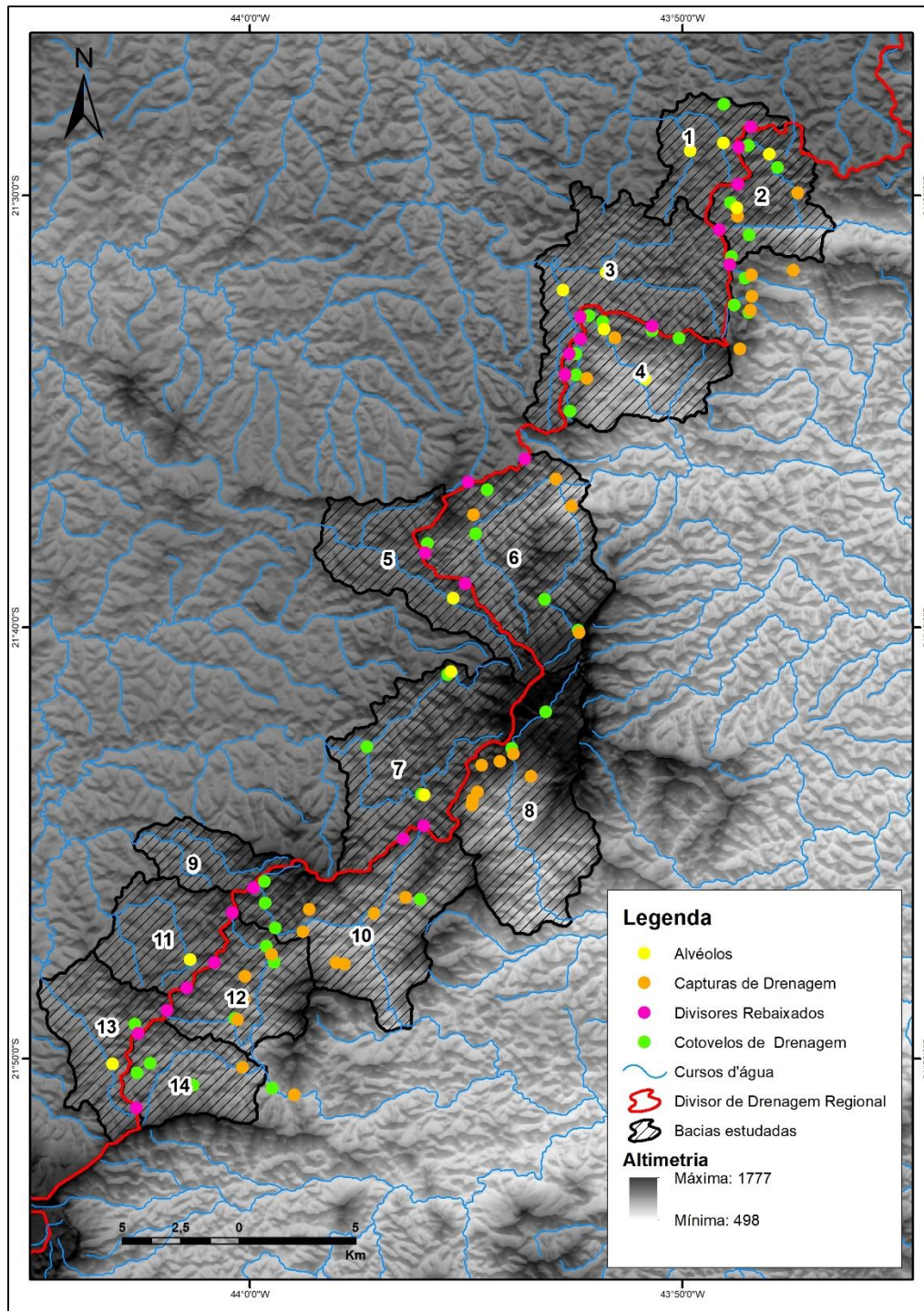


Figura 4.36: Feições morfológicas de reordenamento dos sistemas de drenagem na borda oeste do RCSB. 1. Córrego do Teixeira; 2. Córrego Ponte Funda; 3. Rio das Elvas; 4. Ribeirão dos Almeidas; 5. Ribeirão Bandeira; 6. Rio Vermelho; 7. Ribeirão Conceição; 8. Córrego do Salto; 9. Ribeirão Retiro do Meio; 10. Ribeirão Cata Maior; 11. Ribeirão do Váu; 12. Córrego Fundo; 13. Córrego Ponte Funda; 14. Ribeirão Palmital.

Na área de estudo, foram identificadas anomalias do tipo cotovelos de drenagem, prioritariamente, nas bacias que drenam para o RCSB, assim como, as feições de capturas fluviais (Figura 4.36). Ambas as feições se situam nas áreas próximas às cabeceiras e divisores, inseridas ou próximas, aos planaltos que foram incorporados pelas bacias do RCSB. Foram identificados vales superdimensionados – alvéolos – em todas as bacias, com exceção do ribeirão Retiro do Meio, que drenam para o planalto interiorano e próximos aos divisores com as bacias do RCSB. Já os divisores rebaixados foram identificados ao longo de todo o divisor hidrográfico da área de estudo, onde todos os pares de bacia apresentam esta morfologia em seus divisores (Figura 4.36). A partir da identificação e análise das feições morfológicas, foram delimitadas áreas que possivelmente foram capturadas e incorporadas às bacias afluentes do rio Paraíbuna (Figura 4.37). Estas áreas constituíam as bacias interioranas e foram capturadas pelo maior poder erosivo das bacias que drenam o piso inferior do graben, principalmente pela diferença do nível de base dos rios. Diante disso, pode-se perceber o recuo erosivo que estas bacias exercem sobre a escarpa da Serra da Mantiqueira e, conseqüentemente, capturam setores das bacias interioranas.

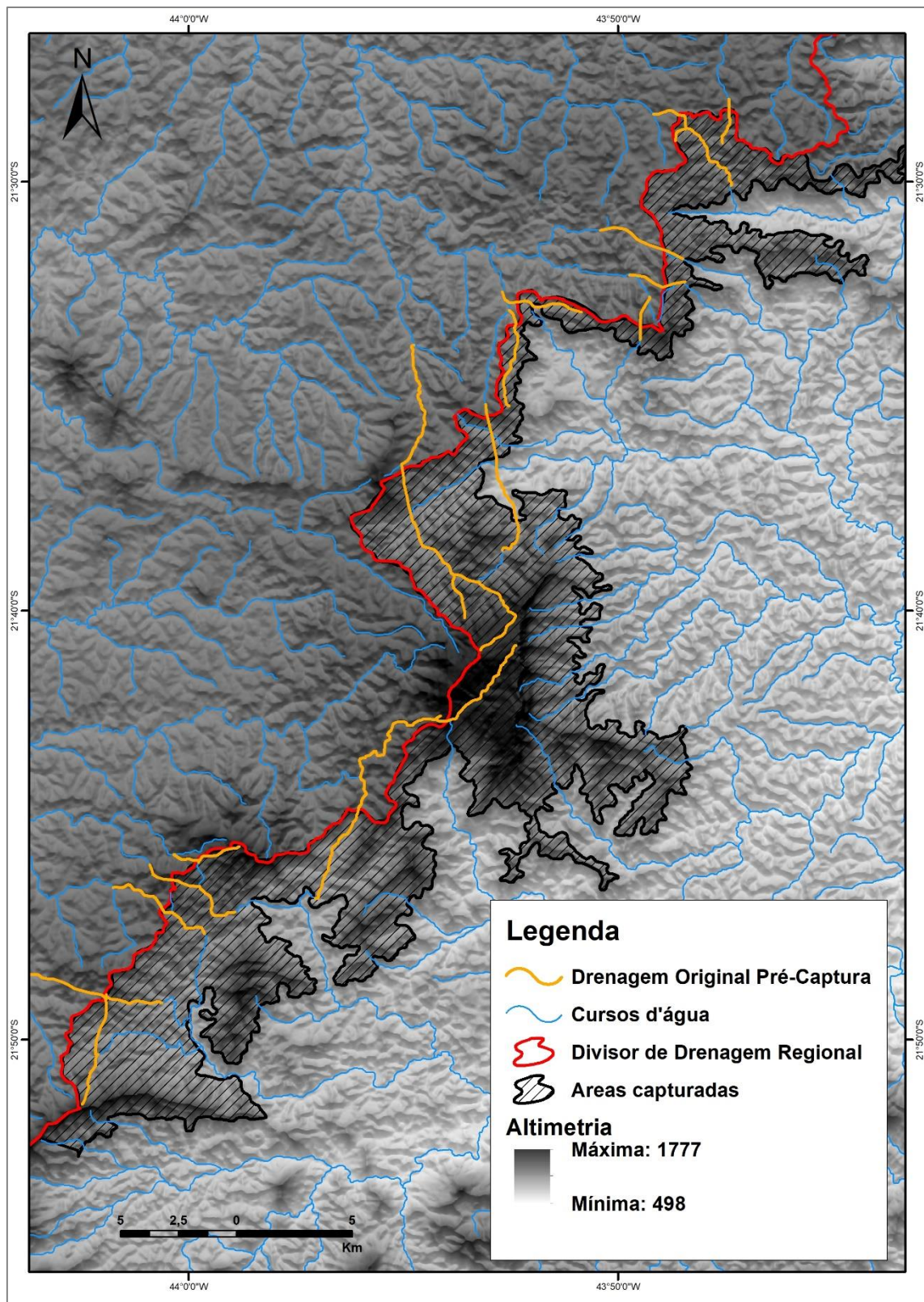


Figura 4.37: Áreas planálticas capturadas pelos rios que drenam para o graben do Paraíba do Sul.

O conjunto de análises acima apresentadas aponta para o fato de que os afluentes da bacia hidrográfica do Rio Paraibuna apresentam maior agressividade no processo de dissecação do relevo do que aqueles que drenam as terras altas da Serra da Mantiqueira em direção ao Rio Grande. Este fato é comprovado não só pelos perfis topográficos (Figuras 4.30 e 4.31), mas também pelos valores de SPI (Figura 4.35), pela quantidade e densidade de knickpoints (Figura 4.32) e pelas feições morfológicas de reordenamento de drenagem identificados na área de estudo (Figura 4.36).

As análises realizadas comprovam ainda que essa maior agressividade faz com que a escarpa e o degrau no relevo que marcam o limite da Bacia Hidrográfica do Paraná com a do Paraíba do Sul, recue em direção ao interior continental na área do limite entre o Rio Grande (principal formador do Rio Paraná) com o Rio Paraibuna. Este recuo explica a razão de partes consideráveis das bacias capturadas pelo rio Paraibuna, ainda apresentarem amplitudes de relevo e morfologia semelhante às aquelas que drenam para o Rio Grande, garantidas ainda pelos knickpoints em forma de cachoeira já voltados para a escarpa da Serra da Mantiqueira.

Desta forma, pode-se supor que a área da sub-bacia do rio Paraibuna possui comportamento erosivo e evolução do divisor hidrográfico muito semelhante ao encontrado nas áreas que lhes são adjacentes e que foram pesquisadas por Cherem *et al.* (2013) e Rezende *et al.* (2013), respectivamente bacias hidrográficas do Rio Pomba e do Rio Preto. Sendo assim, abre-se a necessidade de no futuro se investigar as semelhanças e diferenças entre esses três setores do escarpamento e do degrau no relevo que delimitam as bacias hidrográficas do Paraíba do Sul com Paraná. Afirma-se isso, pois essas semelhanças e diferenças tendem a refletir a evolução geomorfológica resultante da dinâmica tectônica dos blocos que compõe o RCSB, bem como podem ajudar a elucidar elementos da morfogênese deste importante elemento tectônico do sudeste brasileiro e possivelmente uma cronologia de eventos em tempos distintos de acordo com a evolução do pulso erosivo vindo desde a calha do rio Paraíba do Sul.

4.3. Paleodrenagem do Rio Paraíba do Sul

O entendimento, após sucessivas análises morfológicas, recai sobre a evolução do sistema de drenagem do Rio Paraíba do Sul como um sucessivo processo de captura das bacias endorreicas herdadas do processo de rifteamento durante o Cenozoico. Os grabens contidos no sistema fluvial do Rio Paraíba do Sul constituíam àquela época depocentros de descargas fluviais convergentes que, por alguns momentos, mantiveram-se sob a condição lacustre como visto nas colunas estratigráficas das bacias sedimentares de Taubaté, Resende e Volta Redonda, com as fácies lacustres da Formação Tremembé e Formação Floriano, seguida das demais formações de leques e meandros fluviais.

Em uma visão tridimensional da porção fluminense do vale do rio Paraíba do Sul, encontramos, a partir da análise morfológica das drenagens, algumas zonas que demonstram clara convergência das redes de drenagem afluentes para os depocentros dos grabens, mesmo que algumas contrariem a direção do próprio Rio Paraíba do Sul. O mapeamento da rede de drenagem da bacia do rio Paraíba do Sul, no trecho entre as cidades de Taubaté e Itaocara, apresenta diversas áreas de convergência de drenagem, ou seja, locais onde os afluentes do rio Paraíba do Sul tendem a se encontrar, permitindo inclusive uma compartimentalização em suas sub-bacias. Naturalmente, estes grabens constituíam zonas de convergência de drenagens subdivididas pelos altos estruturais (horsts) que separavam os mesmos, podendo ser considerados paleodivisores. Dentre os paleodivisores mais evidentes identificados na presente tese, pode-se destacar: (i) o paleodivisor de Queluz, que separa as bacias de Taubaté e Resende; (ii) o paleodivisor de Miguel Pereira, separando as bacias de Resende e Volta Redonda da bacia de Três Rios; e (iii) o Alto de Sapucaia que separa as bacias de Três Rios e Itaocara. Estes paleodivisores podem estar associados aos altos estruturais formados ao longo da formação do SRCSB, como o alto de Queluz por exemplo.

Como dito, alguns desses depocentros registram evidentes depósitos que datam do Eoceno, como as Bacias Sedimentares de Taubaté, Resende e de Volta Redonda. Nas outras zonas de convergência, Três Rios e Itaocara, não foram mapeados ainda depósitos de idades paleógenas, supostamente porque os mesmos podem ter sido lavados pelo processo erosivo após a captura pelo rio principal Paraíba do Sul, como é o caso das convergências de drenagem de Itaocara, Três

Rios e de Manuel Duarte, esta já no Rio Preto. A figura abaixo tenta ilustrar essa disposição espacial, chamando atenção para os grabens que se mantêm como zonas de convergência de drenagem, entre tais linhas (Figura 4.04).

Esta ilustração propõe uma ideia de como seria a distribuição da drenagem nas épocas que seguiram os eventos tectônicos de estruturação do SRCB. A partir dos divisores das bacias atuais foram delimitados o que seriam os paleodivisores das zonas de convergência de drenagem, como prolongamentos dos altos estruturais. As bacias delimitadas por divisores que corriam dos altos estruturais convergiam para os depocentros dos grabens. Naturalmente, hoje em dia estes divisores foram completamente esculpidos e redesenhados pela expansão da rede de drenagem comandada pelo atual Rio Paraíba do Sul.

Supondo que o resultado das atividades tectônicas seja um sistema de drenagem dividido em zonas de convergência em diversas sub-bacias mantidas por esses divisores, o que se segue é um desenho de bacias convergentes para os pontos mapeados. Neste sentido, o Planalto Sudeste era constituído por sistemas de bacias de drenagens endorreicas que foram incorporadas ao sistema atlântico através de um sistema de capturas do rio Paraíba do Sul. As bacias endorreicas corresponderiam aos grábens e zonas de convergência de drenagem ressaltadas na presente tese, sendo elas: Taubaté, Resende e Volta Redonda, Três Rios e Itaocara.

4.3.1. Do Endorreísmo ao Exorreísmo ou Morfogênese do sistema hidrográfico do Rio Paraíba do Sul

Diante das análises morfológicas e morfométricas, acredita-se que o rio Paraíba do Sul evoluiu a partir de processos de capturas de drenagem por meio de recuo de cabeceiras, impulsionado, principalmente, pelo nível de base atlântico. Contudo, faz-se necessário reconstituir a paleodrenagem pré-captura do pulso erosivo. Neste sentido, a análise morfológica da drenagem e do relevo permitem inferir a formação de bacias endorreicas isoladas que foram capturadas pelo rio Paraíba do Sul até a configuração do sistema de drenagem atual (Figuras 4.38, 4.39, 4.40, 4.41, 4.42 e 4.43).

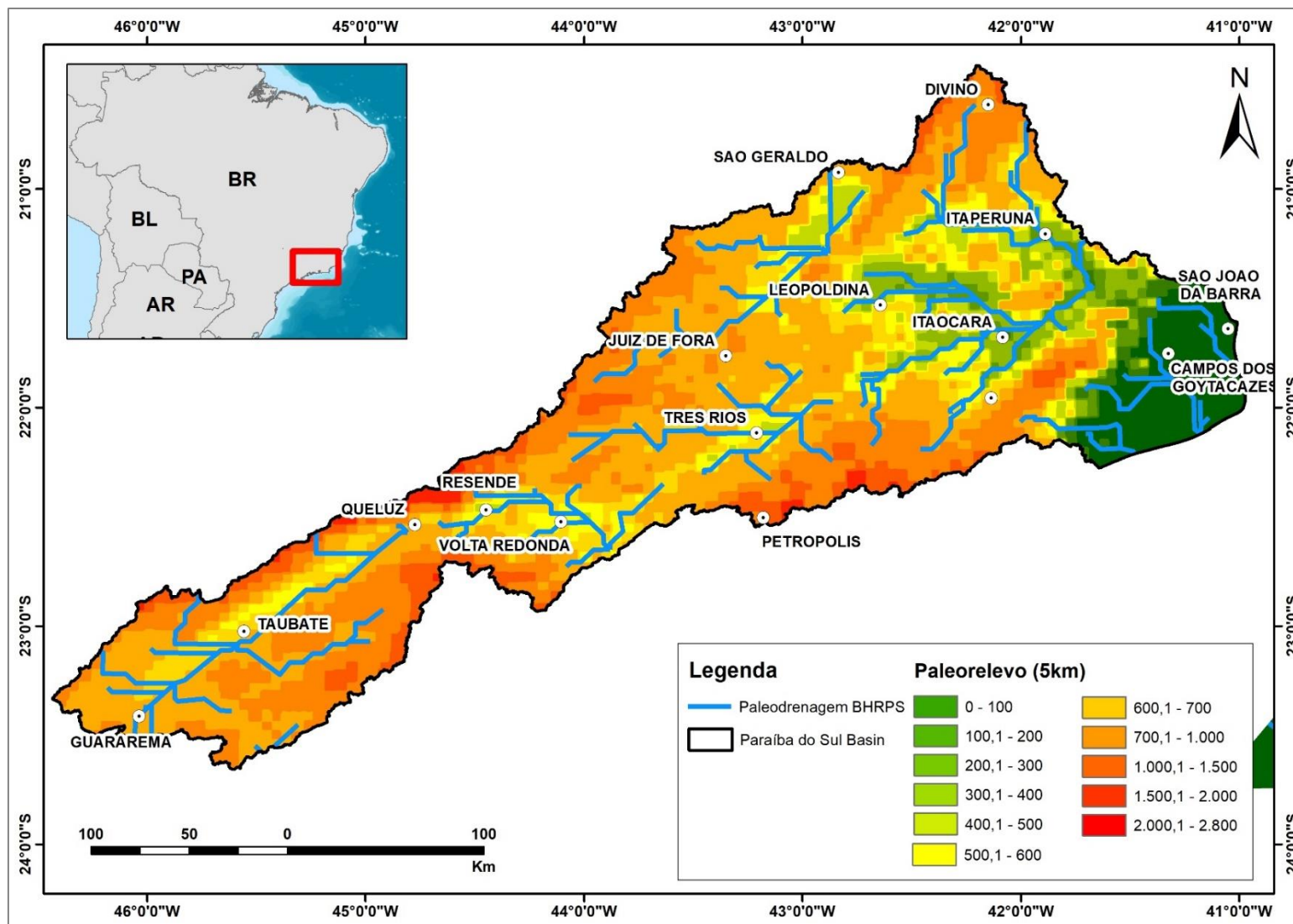


Figura 4.38: Mapa Paleotopográfico e com a paleodrenagem da BHRPS no início da formação do RCSB e formação de bacias endorreicas.

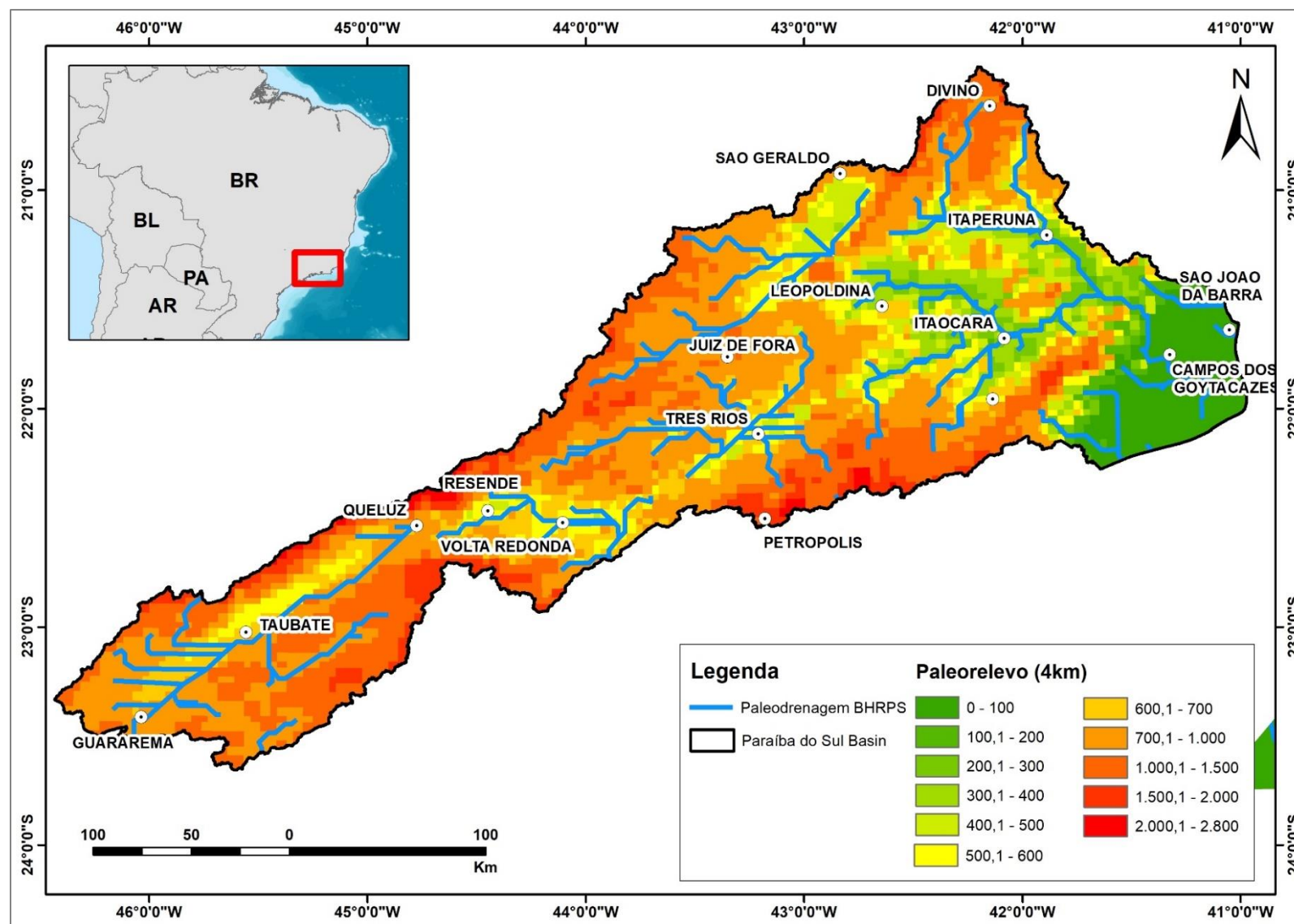


Figura 4.39: Mapa Paleotopográfico e com a paleodrenagem da BHRPS após a formação do RCSB e com a incorporação da bacia endorreica de Itaocara.

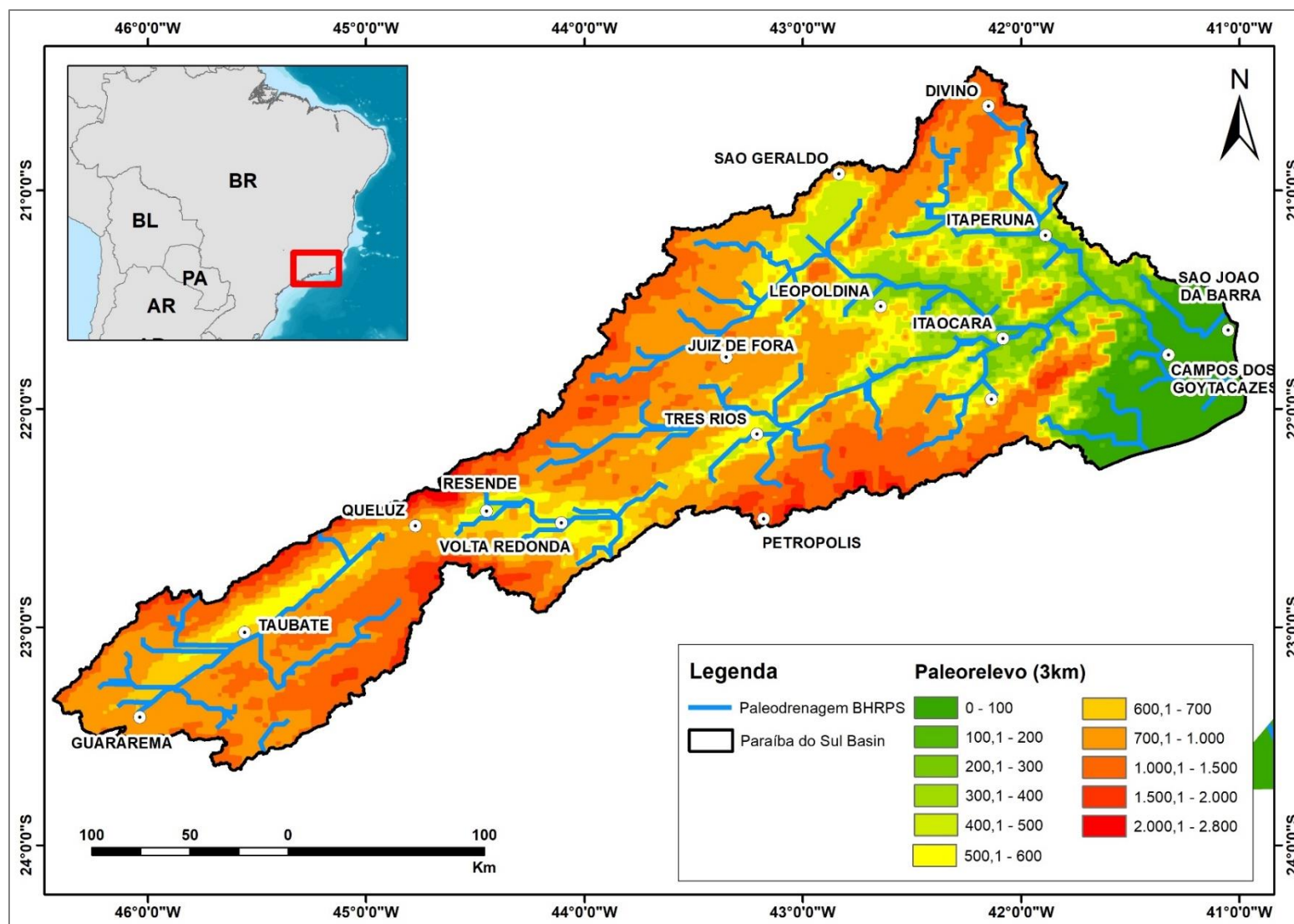


Figura 4.40: Mapa Paleotopográfico e com a paleodrenagem da BHRPS após a formação do RCSB e a incorporação da bacia endorreica de Três Rios através do rebaixamento do paleodivisor de Sapucaia.

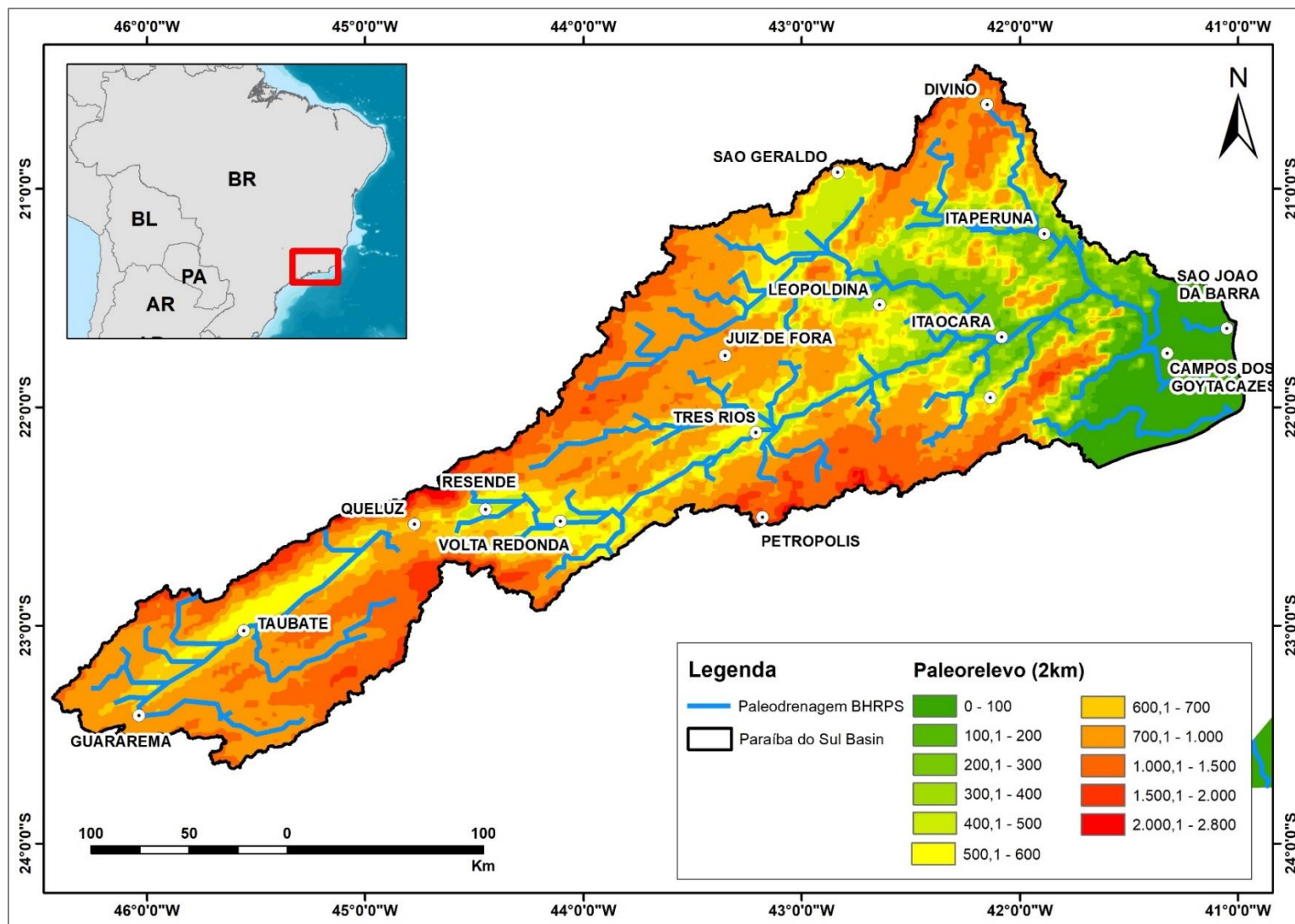


Figura 4.41: Mapa Paleotopográfico e com a paleodrenagem da BHRPS após a formação do RCSB e a incorporação das bacias endorreicas de Volta Redonda e Resende.

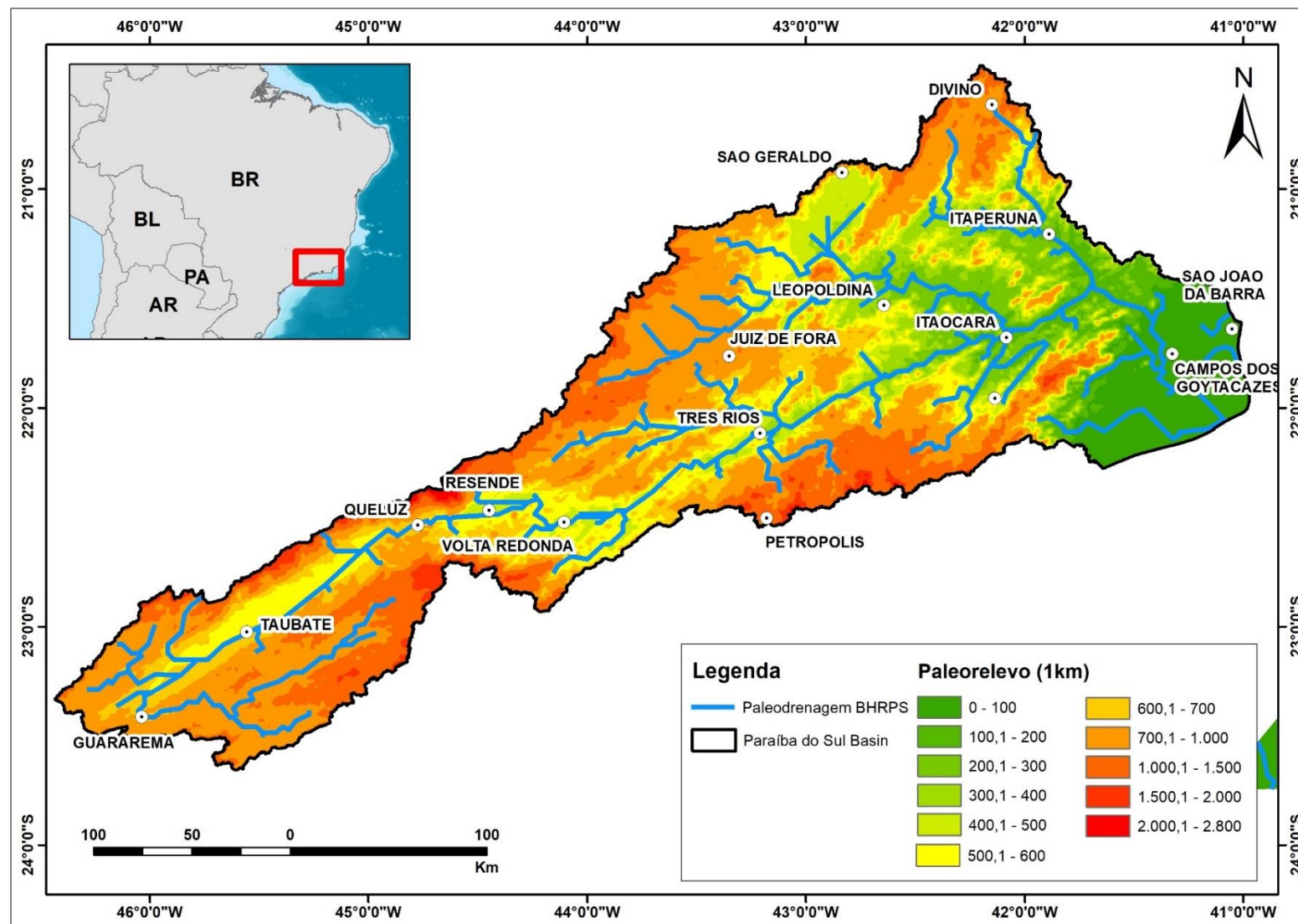


Figura 4.42: Mapa Paleotopográfico e com a paleodrenagem da BHRPS após a formação do RCSB e a incorporação da bacia endorreica de Taubaté pelo rebaixamento do paleodivisor de Queluz.

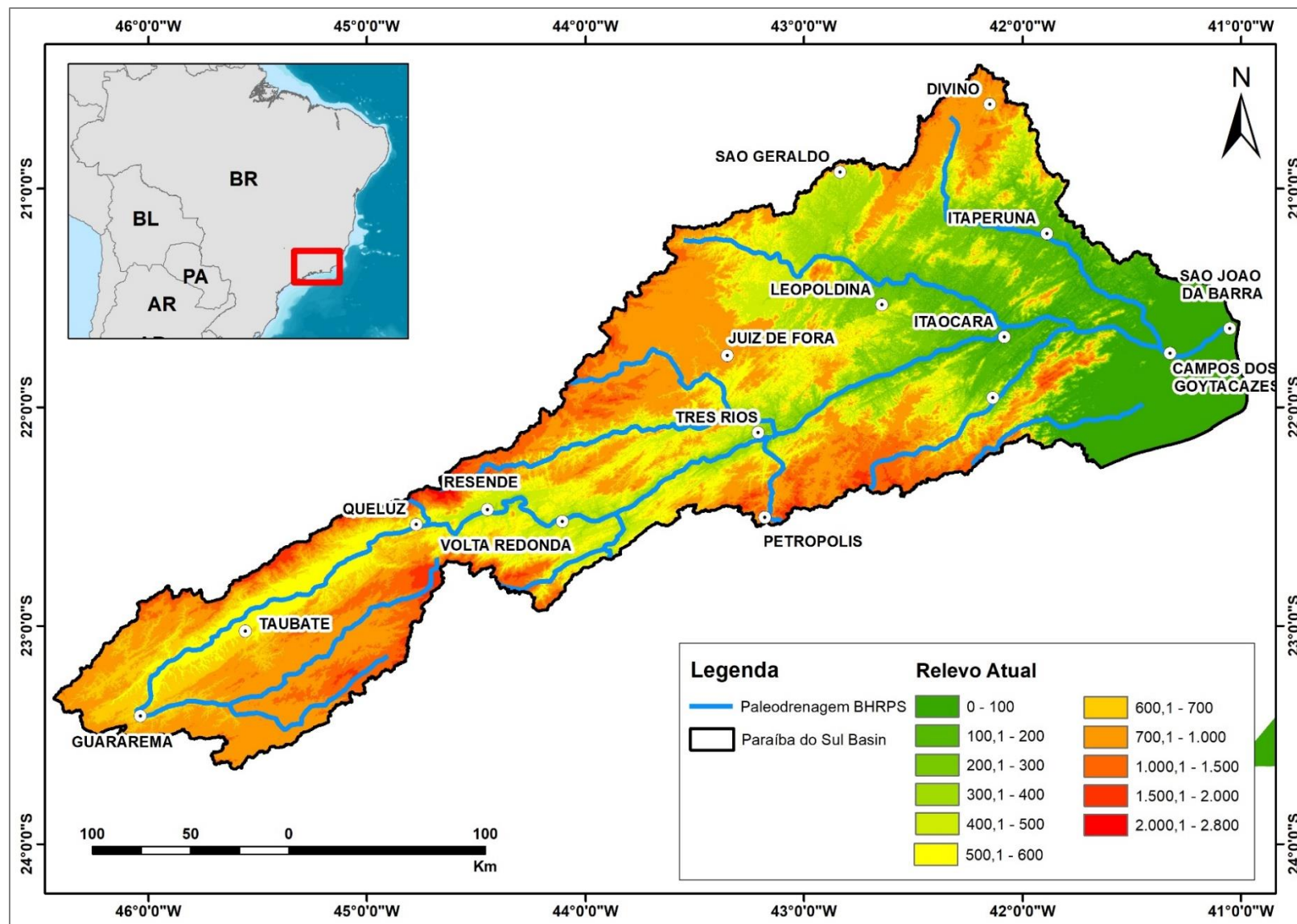


Figura 4.43: Mapa Topográfico e o sistema fluvial da BHRPS atual.

O pulso erosivo do rio Paraíba do Sul, impulsionado pelo nível de base atlântico, condicionou processos de capturas fluviais por recuo de cabeceiras, incorporando as bacias endorreicas que estavam isoladas ao sistema de drenagem. As bacias foram sendo capturadas da foz para as cabeceiras em direção oeste ao longo do planalto sudeste, até a captura do rio Tietê pelo rio Paraíba do Sul evidenciado pelo cotovelo de Guararema (AB'SABER, 1957). Riccomini *et al.* (2010) dataram a captura e formação do cotovelo de Guararema do Mioceno, através do estudo de paleocorrentes, contudo, os autores enfatizam que esta captura pode ter ocorrido antes da formação do sistema de drenagem do rio Paraíba do Sul, sendo esta, capturada por drenagens do grabén de Taubaté. O abatimento do bloco e formação do grabén de Taubaté teria rebaixado o nível de base local e aumentado o potencial erosivo das drenagens daquela região que passaram a erodir o bloco soerguido pelo Alto de Queluz e capturar a drenagem à montante do cotovelo (Riccomini *et al.*, 2010). Esta característica também foi observada por Ab'Saber (1957), indicando que o cotovelo de Guararema teria sido formado antes da consolidação do atual sistema fluvial do rio Paraíba do Sul. Neste sentido, pode-se afirmar que a formação e consolidação da atual morfologia do sistema de drenagem do rio Paraíba do Sul se deu posteriormente ao Mioceno.

Este processo ocorreu de maneira remontante ao longo da calha do rio Paraíba do Sul e se expandiu para o planalto Sudeste. Este processo é evidenciado pelas feições morfológicas do relevo, como a diferença altimétrica dos perfis analisados, indicando maior dissecação do relevo de norte para sul. Ao longo do divisor do rio Paraíba do Sul na Serra da Mantiqueira, percebe-se maior amplitude de relevo na sub-bacia do rio Pombo que se situa na porção norte. Enquanto as sub-bacias do rio Paraíba e do rio Preto apresentam menor amplitude de relevo e níveis topográficos mais elevados (Figura 4.27). Esta característica também pode ter influência da tectônica Meso-Cenozoica de basculamento dos blocos ao longo do escarpamento da Mantiqueira.

Além disso, a ausência de depósitos sedimentares cenozoicos nas zonas de convergências pode ser explicada pelo aumento do processo erosivo através da incorporação das bacias endorreicas ao sistema atlântico. Os registros sedimentares encontrados na bacia, como a bacia de Volta Redonda, encontram-se à 350km à montante da foz, indicando a evolução remontante do pulso erosivo do Paraíba do

Sul. Acredita-se que os registros sedimentares das bacias à jusante de Volta Redonda foram erodidos e não são mais encontrados na superfície.

A ocorrência dos vales estreitos em forma de "gargantas", indicam os locais de conexão entre as bacias endorreicas e o adjacente constitui o antigo divisor entre as mesmas. Em alguns trechos, os vales já foram alargados ao longo da calha do rio Paraíba do Sul, contudo, alguns permanecem com morfologias bem definidas, como o estreito de Sapucaia (SARTI, 2008).

Logo após a consolidação do RCSB, a bacia do rio Paraíba do Sul estava restrita a porção leste do continente, na frente da Serra do Mar nas proximidades da cidade de Campos com divisores situados na Serra de São Pedro (Figura 4.28). Após romper este primeiro divisor, foi incorporada a primeira bacia endorreica, cujas drenagens do rio Pirapetinga, rio Pomba e ribeirão das Areias convergem para a localidade de Itaocara (Figura 4.39). O pulso erosivo do rio Paraíba do Sul promoveu capturas fluviais incorporando novas bacias endorreicas, desta vez a porção de Além Paraíba, na qual convergiam o rio Paquequer, rio Angu, dentre outros. O divisor topográfico deste momento, situa-se na Serra da Prata, próximo município de Sapucaia. Neste período, o rio Pomba também avança sobre o relevo até às proximidades norte de Leopoldina (MG) na Serra da Boa Vista (Figura 4.39). Posteriormente, o rio Paraíba do Sul promove captura fluvial na cabeceira e dá origem ao estreito de Sapucaia (SARTI, 2008), incorporando a bacia endorreica de Três Rios, neste mesmo período, o rio Pomba rompe o divisor na porção norte de Leopoldina e aumenta o potencial erosivo remontante de suas drenagens (Figura 4.40). Após este momento, o rio Paraíba do Sul incorporou as bacias endorreicas de Volta Redonda e Resende, com divisores próximo à cidade de Queluz, no Alto Estrutural de Queluz. (Figura 4.41). Por fim, o rio Paraíba do Sul rebaixa o divisor do alto de Queluz e incorpora o alto curso do rio Paraíba do Sul que ficava restrito à bacia sedimentar de Taubaté e consolida a configuração do sistema de drenagem atual associado ao nível atlântico (Figura 4.42 e 4.43).

Cabe ressaltar que o rebaixamento dos paleodivisores podem não ter ocorrido na ordem proposta acima, uma vez que a área estudada carece de dados geocronológicos para tal afirmação. Conforme mencionado anteriormente, Ab'Saber (1957) e Riccomini *et al.* (2010) afirmam que a captura de Guararema ocorreu no Mioceno, entretanto, o sistema fluvial da BHRPS não estava

consolidada como é hoje. Neste sentido, ressalta-se a necessidade de trabalhos geocronológicos para a datação das capturas fluviais ao longo do rio Paraíba do Sul para ordenar a morfogênese do sistema de drenagem do Planalto Sudeste com maior precisão cronológica.

5. Considerações Finais

Ao final da pesquisa foi possível concluir que o sistema fluvial da Bacia Hidrográfica do rio Paraíba do Sul possui uma complexa história evolutiva, herdada pela interação de esforços tectônicos e processos geomorfológicos sobre o relevo. Sua paleodrenagem era formada por sistemas fluviais endorreicos que convergiam na direção das depressões do relevo formadas com a consolidação do RCSB. Estas depressões são evidenciadas pelos grábens ao longo do RCSB, sendo eles: Taubaté, Resende, Volta Redonda, Três Rios e Itaocara. A ocorrência desse paleoendorreísmo é evidenciada pelo ainda existente conjunto de drenagens concêntricas que convergem para estes grábens e não raro se dirigem para o rio Paraíba do Sul em sentido oposto ao dele. A presença de gorges ao longo da calha principal do rio Paraíba do Sul indicam a localização dos paleodivisores que isolavam os sistemas de drenagens endorreicos uns dos outros.

Posteriormente, a evolução do sistema de drenagem da área de estudo se deu por meio de erosão remontante a partir de capturas fluviais sobre o planalto sudeste brasileiro, assim como proposto por Freitas (2007). Estes mecanismos de erosão remontante e capturas fluviais dissecaram os paleodivisores e criaram vagas erosivas que incorporaram, uma a uma, os sistemas fluviais endorreicos do RCSB ao Oceano Atlântico. O sistema de capturas e o pulso erosivo do rio Paraíba do Sul atingiu o divisor da Serra da Mantiqueira inicialmente a norte, através do rio Pombo, e avançou sobre o planalto sudeste incorporando sistemas de drenagem endorreicos por meio de capturas de drenagem até configurar o sistema de drenagem atual. Esta conclusão é baseada em mais dois conjuntos de evidências: (1) zonas de convergência de drenagem e presença de drenagens inversas à calha principal do rio Paraíba do Sul; (2) perfis topográficos e valores de Chi (X) indicando estabilidade de divisor a nordeste e grande agressividade na porção sudoeste; (3) elevados valores de CT para drenagens distantes da foz associados aos depósitos sedimentares Eocenos e; (4) a reconstituição topográfica através dos mapas Seppômen indica a ocorrência de depressões fechadas ao longo da área de estudo. Paralelamente, a análise dos mapas em sequência pelo tamanho das células demonstra a dissecação do planalto de jusante para montante.

A análise do divisor hidrográfico da Serra da Mantiqueira na sub-bacia do rio Paraíba evidenciou os processos de capturas fluviais e erosão remontante do

rio Paraíba do Sul no Planalto Sudeste, conforme evidenciado por Cherem *et al.* (2012), Rezende *et al.* (2015) e Salgado *et al.* (2016). Os perfis topográficos e longitudinais indicam que as bacias hidrográficas interioranas estão ajustadas aos níveis de base mais altos, tendo assim um relevo mais suave de baixa amplitude e sem rupturas abruptas nos eixos de drenagem. Já as bacias hidrográficas afluentes do rio Paraíba, voltadas para o RCSB, apresentam gradientes topográficos mais acentuados e relevo mais dissecado com muitas rupturas. Estas características indicam morfologias de planaltos capturados pela frente erosiva das bacias voltadas ao RCSB, fazendo com que essas áreas reorganizem seu sistema de drenagem para bacias adjacentes.

Soma-se a isso, os dados do índice RDE que indicam maior densidade de knickpoints nas bacias do RCSB e, com isso, atribui maior controle litológico e/ou estrutural na evolução do relevo. As taxas de SPI demonstraram maior potencial erosivo dos canais voltados para o RCSB, bem como, uma provável expansão da frente de dissecação nesta região no sentido de norte para sul. Os cotovelos, os vales superdimensionados e as demais morfologias típicas de captura fluvial, indicam, indubitavelmente, que consideráveis áreas do planalto interior que drenavam para o Rio Grande foram capturadas por cursos fluviais que descem o degrau no relevo e se dirigem para o Rio Paraíba do Sul. Sendo assim, os resultados apresentados, demonstram, assim como Cherem *et al.* (2012) e Rezende *et al.* (2015), que a rede de drenagem do rio Paraíba do Sul se expandiu sobre a do rio Grande através de mecanismos de pirataria fluvial. Logo, a morfogênese do relevo na borda oeste do RCSB se deu a partir da reorganização da rede de drenagem em função da mudança de nível de base imposto pelo processo de incorporação de bacias hidrográficas endorreicas ao sistema que fluí em direção ao Oceano Atlântico. Isto induziu um input erosivo e iniciou o processo de dissecação ainda em andamento do antigo planalto por meio de erosão remontante e capturas fluviais.

Em suma: a Bacia Hidrográfica do rio Paraíba do Sul não existia até recentemente e somente quando a atividade tectônica no RCSB diminuiu de intensidade, ela se organizou e entrou em fase de ajuste erosivo e expansão. Este aparente contrassenso ocorreu em razão de que foi somente com a diminuição da atividade tectônica que o pulso erosivo do rio Paraíba do Sul pode, por erosão remontante, capturar uma série de bacias endorreicas que se localizavam à montante

sobre os grábens. Este processo fez com que os cursos fluviais que antes tinham seus níveis de base no interior desses grábens ganhassem energia e permitiu um input erosivo remontante com a consequente captura de áreas da Serra da Mantiqueira que antes drenavam em direção ao rio Grande.

Por fim, ressalta-se a necessidade de novos estudos com a utilização de dados cronológicos para calcular a idade das capturas das bacias endorreicas e, consequentemente, da organização do sistema fluvial do rio Paraíba do Sul.

6. Referências bibliográficas

AB'SABER, A. N. **O problema das conexões antigas e da separação da drenagem do Paraíba e do Tietê**. Geomorfologia 26. São Paulo, Instituto de Geografia da USP, p. 38-49. 1957.

AB'SABER, A. N. O Sítio Urbano da cidade de São Paulo. In: Aroldo de Azevedo (org): **A cidade de São Paulo: estudo de geografia urbana**. São Paulo. Companhia Editora Nacional. Coleção Brasileira, vol. 14, p. 169 – 243. 1958.

AB'SABER, A. N. **Os Domínios de Natureza no Brasil: Potencialidades Paisagísticas**. São Paulo: Ateliê Editorial, 2003.

AGEVAP. **Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do rio Paraíba do Sul**. Fundação COPPETEC, Resende. pp. 147. 2007.

ALMEIDA FILHO, R.; MIRANDA, F. P. de & BEISL, C. H. Evidência de uma mega captura fluvial no Rio Negro (Amazônia) revelada em modelo de elevação digital da SRTM. **Anais do XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Goiânia, INPE, p. 1701-1707. 2005.

ALMEIDA, F. F. M. & CARNEIRO, C. D. Origem e evolução da Serra do Mar. **Revista Brasileira de Geociências**, nº 28(2), pp. 135-150. 1998.

ALMEIDA, F. F. M.; HASUI, Y.; BRITO-NEVES, B. B.; FUCK, R. A. Brazilian Structural Provinces: an introduction. **Earth-Science Rev.**, 17: 1-29. 1981.

AMADOR, E. S. Estratigrafia e Sedimentação na Bacia de Resende - RJ. Rio de Janeiro, 260p. **Dissertação de Mestrado**, Departamento de Geologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro. 1975.

ANTÓN, L., MUÑOZ-MARTÍN, A., DE VICENTE, G. Quantifying the erosional impact of a continental-scale drainage capture in the Duero Basin, northwest Iberia. **Quaternary Research**, 91 (2), 457–471. 2018. Disponível em<<https://doi.org/10.1017/qua.2018.38>>. Acesso em: janeiro de 2020.

ANTÓN, L., RODÉS, A., DE VICENTE, G., PALLÀS, R., GARCIA-CASTELLANOS, D., STUART, F.M., BRAUCHER, R., BOURLÈS, D. Quantification of fluvial incision in the Duero Basin (NW Iberia) from longitudinal profile analysis and terrestrial cosmogenic nuclide concentrations. **Geomorphology** 165, 50–61. 2012.

ARMOND, N. B. Dinâmica Climática, Excepcionalidades e Vulnerabilidade: Contribuições para uma classificação geográfica do clima do estado do Rio de Janeiro. **Tese de doutorado**. Departamento de Geografia, UNESP. 170 pp. 2018.

ASMUS, H. E. & FERRARI, A. L. **Hipótese sobre a causa do tectonismo Cenozóico na região sudeste do Brasil.** *Projeto REMAC*, 4, p.75-88. 1978.

AVELAR, A. S. & COELHO NETTO, A. L. Fraturas e o desenvolvimento de unidades côncavas no médio vale do rio Paraíba do Sul. **Revista Brasileira de Geociências**, Rio de Janeiro, v. 22, n. 2. 1992.

AYAZ, S.; & DHALI, M. K. Longitudinal profiles and geomorphic indices analysis on tectonic evidence of fluvial form, process and landform deformation of Eastern Himalayan Rivers, India. **Geology, Ecology, and Landscapes**. 2019.

BAK, P. **How nature works, the science of self-organized criticality.** Oxford University Press, p. 212. 1997.

BEHLING, H. & HOOGHMISTRA, H. Neotropical savanna environments in space and time: Late Quaternary interhemispheric comparisons. In: MARKGRAF V (Ed), **Interhemispheric Climate Linkages**, Academic Press, p. 307-323. 2001.

BEHLING, H. South and Southeast Brazilian grasslands during Late Quaternary times: a synthesis. **Palaeogeograph, Palaeoclimatology and Palaeoecology**, 177:19–27. 2002.

BERGER, Z.; AGHASSY, J. **Near-surface groundwater and evolution of structurally controlled streams in soft sediments.** Groundwater as a Geomorphic Agent, Allen & Unwin, London. p. 59-77. 1984.

BIERMAN, P. R.; CAFFEE, M. Slow Rates of Rock Surface Erosion and Sediment Production Across the Namib Desert and Escarpment, Southern Africa. **American Journal of Science**, vol. 301. April / May p. 326 – 358. 2001.

BIGARELLA, J. J. The Barreiras Group in Northeastern Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, Rio de Janeiro, v. 47 (Suplemento), p. 365-393, 1975.

BIGARELLA, J. J. Variações climáticas no quaternário e suas implicações no revestimento florístico do Paraná. **Boletim Paranaense de Geografia**, n. 10/15, p. 211-231, 1964.

BISHOP, P. Drainage rearrangement by river capture, beheading and diversion. **Progress in Physical Geography**, v.19, n.4, p.449-473.1995.

BISHOP, P. Horizontal stability of the Australian continental drainage divide in South Central New South Wales during the Cainozoic. **Australian Journal of Earth Sciences** 33, 295-307. 1986.

BRÊDA, T. C.; RAMOS, R. R. C. MELLO, C. L. Análise Petrográfica de Arenitos da Formação Resende (Bacia de Resende, RJ). **Geociências**, v. 32, n. 4, p.659-676. 2013.

BRICALLI, L. L. Procedimentos Metodológicos e Técnicas em Geomorfologia Tectônica. **Espaço Aberto**, PPGG - UFRJ, V. 6, N.1, p. 75-110. 2016.

BURBANK, D. W. Rates of erosion and their implication for exhumation. **Mineralogical Magazine**, vol. 66(1), pp. 25 – 52. 2002.

BURBANK, D. W., ANDERSON, R. S. **Tectonic Geomorphology**, 2nd ed. Blackwell Science, Oxford. 2013.

CALVACHE, M. L. & VISEIRAS, C. Long-term control mechanisms of Stream piracy processes in southeasth Spain. **Earth Surface Process and Landform**, 22, p. 93 – 105. 1997.

CAMOLEZI, B. A.; FORTES, E.; MANIERI, D. D. Controle Estrutural da Rede de Drenagem com base na correlação de dados Morfométricos e Morfoestruturais: O Caso da Bacia do Ribeirão São Pedro – Paraná. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 13, nº 2. 2012.

CASTANHEIRA, M. V. S., FREITAS, M. M. Rebaixamento do nível de base regional no médio vale do rio Paraíba do Sul e evidências dos processos de captura de drenagem In: **Anais do XI Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada**. São Paulo: EdUsp, 2005.

CHEN, C. Y. & YU, F. C. Morphometric analysis of debris flow and their source area using GIS. **Geomorphology** 129, p. 387-397. 2011.

CHEREM, L. F. S.; VARAJÃO, C. A. C.; BRAUCHER, R.; BOURLÉS, D.; SALGADO, A. A.; VARAJÃO, A. C. Long-term evolution of denudational escarpments in southeastern Brazil. **Geomorphology**. v. 173-4. p. 118-27. 2012.

CHEREM, L. F. S.; VARAJÃO, C. A. C.; MAGALHÃES JÚNIOR, 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, p. 299-308, 2013.

CHORLEY, R. J. Geomorphology and general systems theory. **U.S. Geological Survey**. Prof. Paper, n. 500-B, p. 1-10. 1962.

CHRISTOFOLETTI, A. **Capturas fluviais**. Enciclopédia Mirador Internacional. São Paulo, vol. 5, p. 2.049-2.051. 1975.

CHRISTOFOLETTI, A. **Considerações sobre o nível de base, rupturas de declive, capturas fluviais e morfogênese do perfil longitudinal**. Geografia, 2 (4), p. 81-102. 1977.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. São Paulo: Ed. Universidade, 149p. 1974.

COELHO NETTO, A. L. Evolução de Cabeceiras de Drenagem no Médio Vale do Rio Paraíba do Sul (SP/RJ): a Formação e o Crescimento da Rede de Canais sob Controle Estrutural. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, Ano 4, Nº 2 69-100. 2003.

COELHO NETTO, A. L. Hidrologia de Encostas na Interface com a Geomorfologia. In: GUERRA, A. J. T. e CUNHA, S. B. (Org.). **Geomorfologia: Uma Atualização de Bases e Conceitos**; Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, pp. 93-148. 1994.

COSTA, A. O.; SALGADO, C. M.; DINALI, Y. T. Caracterização da precipitação no médio vale do rio Paraíba do Sul Fluminense (RJ). **Revista Geonorte**, v. 2, n. 5, p. 1000– 1013, 2012.

COSTA, R. D. Determinação dos campos de tensão cenozóicos na região sul de Minas Gerais. **Tese de Doutorado**. Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 135 p. 1999.

COUTO, E. V.; FORTES, E.; SORDI, M. V.; MARQUES, M. J.; CAMOLEZI, B. A. Seppômens maps for geomorphic developments analysis: the case of Parana Plateau border, Faxinal, State of Parana, Brazil. **Acta Scientiarum Technology**, v. 34, n. 1, p. 71-18, 2012.

CUNHA, P. P.; MARTINS, A. A.; GOMES, A.; STOKES, M.; CABRAL, J.; LOPES, F. C.; PEREIRA, D.; VICENTE, G.; BUYLAERT, J.; MURRAY, A. S.; ANTÓN, L. Mechanisms and age estimates of continental-scale endorheic to exorheic drainage transition: Douro River, Western Iberia. **Global and Planetary Change**, 181, 102985. 2019.

DANIELSON, T. Utilizing a High Resolution Digital Elevation Model (DEM) to Develop a Stream Power Index (SPI) for the Gilmore Creek Watershed in Winona County, Minnesota. **Papers in Resource Analysis**. Volume 15, 11 pp. Saint Mary's University of Minnesota University Central Services Press. 2013.

DANTAS, M. E. Controles naturais e antropogênicos na sedimentação fluvial, espacialmente não uniforme, na bacia do rio Bananal (SP/RJ): Médio Vale do rio Paraíba do Sul. **Dissertação de Mestrado**, Departamento de Geografia, UFRJ. 1995.

DAVIS, W.M. **The geographical cycle**. Geography Journal, n.14, p. 481-504. 1899.

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

DORSAZ, J.; GIRONÁS, J.; ESCAURIAZA, C.; RINALDO, A. The geomorphometry of endorheic drainage basins: implications for interpreting and modelling their evolution. **Earth Surface Processes and Landforms**, Vol. 38, 1881–1896. 2013.

EIRADO SILVA, L. G.; DANTAS, M. E. & COELHO NETTO, A. L. 'Condicionantes litoestruturais na formação de níveis de base locais ("*knickpoints*") e implicações geomorfológicas no Médio Vale do rio Paraíba do Sul'. In: **III Simpósio de Geologia do Sudeste** - Rio de Janeiro/RJ - Atas, P. 96-102, 1993.

ETCHEBEHERE, M. L. C., SAAD, A. R., FULFARO, V. J., PERINOTTO, J. A. J. Aplicação do Índice "Relação Declividade-Extensão – RDE" na Bacia do Rio do Peixe (SP) para detecção de deformações neotectônicas. **Revista do Instituto de Geociências (USP)** 4 (2): 43–56. 2004.

FEKTE, K. & VOJTKO, R. Neotectonic activity of the Pravno fault in the area of the Žiar Mts. **Acta Geologica Slovaca**, 5(2), 117 – 127. 2013.

FERNANDES, F. L. & CHANG, H. K. Modelagem gravimétrica da Bacia de Taubaté – Vale do Rio Paraíba do Sul, leste do Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Geofísica**, 19(2): 131–144. 2001.

FOLHES, M. T.; FISCH, G. Caracterização climática e estudo de tendências nas séries temporais de temperatura do ar e precipitação em Taubaté (SP). **Revista Ambiente e Água**, Taubaté, v. 1, n. 1, p. 61-71, 2006.

FREITAS, M. M. Evolução da Paisagem Geomorfológica. In: **Paisagem, Espaço e Sustentabilidades: uma perspectiva multidimensional da geografia**. Rio de Janeiro: Editora PUC Rio, p. 91-128. 2007.

GALLEN, S. F.; WEGMANN, K. W. Exploring the origins of modern topographic relief in the southern Appalachians: An excursion through the transient landscape of the Cullasaja River basin, North Carolina. **The Geological Society of America**. Field Guide 39. 2015.

GALZKI, J.C., A.S. BIRR, AND D.J. MULLA. Identifying critical agricultural areas with three-meter LiDAR elevation data for precision conservation. **Journal of Soil and Water Conservation**, 66(6):423 - 430. 2011.

GARCIA-CASTELLANOS, D. & CLOETINGH, D. Modeling the Interaction between Lithospheric and Surface Processes in Foreland Basins, edited, pp. 152-181. 2012.

GARCIA-CASTELLANOS, D. & LARRASOÑA, J. C. Quantifying the post-tectonic topographic evolution of closed basins: The Ebro basin (northeast Iberia). **Geology**, june. 2015.

GILBERT, G.K, **Report on the geology of the Henry Mountains**. Washington D.C.: U.S. Government Printing Office, 1877.

GILCHRIST, A. R.; SUMMERFIELD, M. A. Tectonic models of passive margin evolution and their implications for theories of long-term landscape development. In: **Process Models and Theoretical Geomorphology**. Editado por: M.J. Kirkby. Jonh Wiley & Sons Ltd.: 55-84, 1994.

GONTIJO, A. H. F. Morfometria do Médio Vale do Rio Paraíba do Sul: região da Serra da Bocaina, Estados de São Paulo e Rio de Janeiro. 259f. **Tese (Doutorado)** – Instituto de Geociências e Ciências Exatas – Universidade Estadual Paulista, Rio Claro. 1999.

GROHMANN, C. H.; RICCOMINI, C.; CHAMANI, M. A. C. Regional scale analysis of landform configuration with base-level (isobase) maps. **Hydrology and Earth System Sciences**, 15, 1493–1504, 2011.

GUERRA, A.T. **Dicionário geológico-geomorfológico**. 5.ed. Rio de Janeiro: IBGE, 439p. 1993.

HACK, J. T. Interpretation of erosional topography in Humid Temperate regions. **American Journal of Science**, 188, p 80-97. 1960.

HACK, J.T. Stream-Profile Analysis and Stream-Gradient Index. **US Geol. Surv. J. Res.** 1 (4), 421–429. 1973.

HEILBRON, M. & MACHADO, N. Timing of terrane accretion in the Neoproterozoic-Eopaleozoic Ribeira orogen (SE Brazil). **Precambrian Research**, 125: 87-112. 2003.

HEILBRON, M., PEDROSA-SOARES, A.C., CAMPOS NETO, M.C., SILVA, L.C., TROUW, R.A.J.; JANASI, V.A., Província Magntiqueira. In: MANTESSO-NETO, V. BARTORELLI, A., CARNEIRO, C.D.R. e BRITO-NEVES, B.B., Orgs. **Geologia do Continente Sul-Americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida**. São Paulo, Ed.Beca, p.203-236. 2004.

HEILBRON, M.; EIRADO, L. G.; ALMEIDA, J. (Org.). **Mapa geológico e de recursos minerais do estado do Rio de Janeiro**. Belo Horizonte: CPRM. 1 mapa. Escala 1:400.000. Programa geologia do Brasil. Mapas geológicos estaduais. 2016.

HEILBRON, M.; MOHRIAK, W.; VALERIANO, C.M.; MILANI, E.; ALMEIDA J.C.H.; TUPINAMBÁ, M. From collision to extension: the roots of the south-eastern continental margin of Brazil. In: TALWANI & MOHRIAK (eds). **Atlantic Rifts and Continental Margins**. American Geophysical Union, Geophysical Monograph Series, 115:1-34. 2000.

HERGARTEN, S.; ROBL, J.; STÜWE, K. Extracting topographic swath profiles across curved geomorphic features. **EarthSurf.Dyn.** 2, 97–104. 2014.

HIGGINS, J. A.; SCHRAG, D. P. Beyond methane: Towards a theory for the Paleocene–Eocene Thermal Maximum. **Earth and Planetary Science Letters**, 245, pp. 523 – 537. 2006.

HIRUMA S. T., RICCOMINI C., MODENESI-GAUTTIERI M. C., HACKSPACHER P. C., HADLER NETO J. C., FRANCO-MAGALHÃES, A. O. Denudation history of the Bocaina Plateau, Serra do Mar, southeastern Brazil: Relationships to Gondwana breakup and passive margin development. **Gondwana Research**, 18 (4):674-687. 2010.

HOWARD, A. D. Geomorphological systems-equilibrium and dynamics. **American Journal Science**, v.263, p.302-312. 1965.

INGLIS, G. N., FARNSWORTH, A., LUNT, D., FOSTER, G. L., HOLLIS, C. J., PAGANI, M., JARDINE, P. E., PEARSON, P. N., MARKWICK, P., GALSWORTHY, A. M. J., RAYNHAM, L., TAYLOR, K. W. R., PANCOST, R. D., Descent toward the icehouse: Eocene sea surface cooling inferred from GDGT distributions. **Paleoceanography** 30 (7), 1000–1020. 2015.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Banco de dados de informações Ambientais**. 2019. Disponível em:<<https://bdiaweb.ibge.gov.br/>>. Acesso em: janeiro de 2020.

KHIEHL, J. T.; SHIELDS, C. A.; SNYDER, M. A.; ZACHOS, J. C.; ROTHSTEIN, M. Greenhouse and orbital-forced climate extremes during the early Eocene. **Phil. Trans. R. Soc. A** **376**: 20170085. 2018. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2017.0085>>. Acesso em: janeiro de 2020.

LAITY J. **Deserts and Desert Environments**. Wiley-Blackwell: Chichester. 2008.

LEEDER, M. R. Denudation, Vertical Crustal Movements and Sedimentary Basin Infill. **Geologische Rundschau**, 80(2): 441-458, 1991.

LEOPOLD, L. B.; WOLMAN, M. G.; MILLER, J.P. Fluvial Processes. In **Geomorphology**. San Francisco. W. H. Freeman Co, 1964. p. 522.

LIMA, A. P. M. O Papel do Voçorocamento no Processo de Evolução da Paisagem Geomorfológica no Vale do Paraíba. **Dissertação de Mestrado**. Departamento de Geografia e Meio Ambiente, PUC-Rio. 2019.

LIMA, A. P.; PAIXAO, R. W.; Freitas, M. M. Considerações iniciais sobre condicionantes geológicos em processos erosivos incisivos em Barra do Piraí. In: **XII Simpósio Nacional de Geomorfologia - SINAGEO**, Crato. Paisagem e Geodiversidade: A Valorização do Patrimônio Geomorfológico Brasileiro. 2018.

LIMA, M. I. C. **Análise de Drenagem e seu Significado Geológico-Geomorfológico**. Belém: 2006. Cd-Rom.

LIMA, M. R. & MELO, M. S. Palinologia de depósitos rudáceos da região de Itatiaia, Bacia de Resende - RJ. **Geonomos**, 2(1):12-21. 1994.

LITTLER, K.; T. WESTERHOLD, A. J.; DRURY, D.; LIEBRAND, L.; LISIECKI, AND H. PÄLIKE. Astronomical time keeping of Earth history: An invaluable contribution of scientific ocean drilling. **Oceanography** 32(1):72–76. 2019. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2019.122>

MARENGO, J., ALVES, L. M. Tendências hidrológicas da bacia do rio Paraíba do Sul, **Revista Brasileira de Meteorologia**, 20, 215-226. 2005.

MARENT, B. R.; SALGADO, A. A. R.; SANTOS, L. J. C. Modelos de evolução do relevo de margens passivas em regiões com grande escarpamento. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.14, n.2, (Abr-Jun) p.235-240, 2013.

MARENT, B. R.; VALADÃO, R. C.; MANFRÉ, L. A.; NÓBREGA, R. A. A. Espacialidade e evolução da incisão de vales fluviais a partir da dissecação do relevo nos degraus escalonados do sudeste de Minas Gerais – Brasil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.19, n.4, (Out-Dez), pp.709-719. 2018.

MARQUES NETO, R. O Horst da Mantiqueira Meridional: Proposta de Compartimentação Morfoestrutural para sua porção Mineira. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, São Paulo, v.18, n.3, (Jul-Set) p.561-577, 2017.

MARQUES NETO, R.; MOREIRA, J. A.; SILVA, F. P. Evolução de escarpamentos em margens rifte: uma discussão sobre soerguimento e desnudação na Mantiqueira Meridional a partir de mapas paleotopográficos e parâmetros geomorfométricos. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, São Paulo, v.20, n.4, (Out-Dez) p.877-890, 2019.

MEIS, M. R. M. & MOURA, J. R. S. Upper Quaternary Sedimentation and Hillslope Evolution: SE Brazilian Palteau. **American Journal of Science**, 284: 241-254. 1984.

MEIS, M. R.; MIRANDA, L. H. G. & FERNANDES, N. F. Desnívelamento de altitude como parâmetro para a compartimentação do relevo: bacia do médio-baixo Paraíba do Sul. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA**, 32, 1982, Salvador. *Anais*. Salvador: SBG. 4:1489-1509. 1982.

MELO, M. L. D.; MARENGO, J. A. Simulações do clima do Holoceno médio na América do Sul com o modelo de circulação geral da atmosfera do CPTEC. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.23, n.2, 191-205, 2008.

MELO, M. S.; RICCOMINI, C.; ALMEIDA, F. F. M. & HASUI, Y. Sedimentação e Tectônica da Bacia de Resende - RJ. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 57, n.4, p.467-479. 1985.

MENDES, L. D. A cronologia da evolução da paisagem no contexto dos avanços das geociências e a geomorfologia tectônica da margem continental do sudeste do Brasil. **Revista de Geografia** (Recife) V. 35, No. 4. 2018.

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

MILLIMAN, J.D.; SYVITSKI, P.M. Geomorphic/Tectonic Control of Sediment Discharge to the Ocean: The Importance of Small Mountainous Rivers. **The Journal of Geology**, v.100, p.525-544, 1992.

MOHRIAK, W. U. Recursos energéticos associados à ativação tectônica mesozóico-cenozóica da América do Sul. In: V. Mantesso – Neto, A. Bartorelli, C.D.R. Carneiro and B. B. Brito-Neves (eds.), **Geologia do continente sul-americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida**, cap. XVIII, p. 293 – 318. 2004.

MOORE, I.D., GRAYSON, R., LADSON, A. Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications. *Hydrol. Process.* 5 (1), 3–30. 1991.

MORO, R. S. & BICUDO, C. E. M. Flutuações climáticas no Pleistoceno tardio na Lagoa Dourada, Estado do Paraná, Brasil. **Acta Limnologica Brasiliensia** 10: 47-58. 1998.

MOTOKI, A. G.; PETRAKIS, H.; SICHEL, S. E.; CARDOSO, C. E.; MELO, R. C.; SOARES, R.; MOTOKI, K. F. Origem dos relevos do maciço sienítico do Mendanha, RJ, com base nas análises geomorfológicas e sua relação com a hipótese do vulcão de Nova Iguaçu. **Geociências**, v. 27, n. 1, p. 97-113, 2008.

MOTTA, M.; EIRADO, L. G. TUPINAMBÁ, M.; ALMEIDA, J. Landform Mosaic resulting from the Cretaceous and Cenozoic Tectonic Evolution of Southeastern Brazil. In: Regional Conference on Geomorphology. In: **Regional Conference on Geomorphology**, Rio de Janeiro. 1999.

MOURA, J. R. S. & Mello C. L. Classificação aloestratigráfica do Quaternário Superior na região de Bananal (SP/RJ). São Paulo. **Revista Brasileira de Geociências**, 21 (3): 236-254. 1991.

MOURA, J. R. S.; PEIXOTO, M. N. O. & SILVA, T. M. Geometria do relevo e estratigrafia do Quaternário como base a tipologia de cabeceiras de drenagem em anfiteatro, médio vale do rio Paraíba do Sul. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, 21(3): 255-265. 1991.

NICHOLS, G. Fluvial systems in desiccating endorheic basins. In **Sedimentary Processes, Environments and Basins: A Tribute to Peter Friend**, Nichols G, Williams E, Paola C (eds). Blackwell Publishing: Oxford; 569–589. 2007.

NICHOLS, G. J. Sedimentation and base level in an endorheic basin: the early Miocene of the Ebro Basin, Spain. **Boletín Geológico y Minero**, 115 (3): 427- 438. 2004.

OLIVEIRA, D. **Capturas fluviais como evidências da evolução do relevo: Uma revisão bibliográfica**. Revista do Departamento de Geografia, 20, 37-50. 2010.

OLIVEIRA, M. A. T. Processos erosivos e preservação de áreas de risco de erosão por voçorocas. IN: GUERRA, A. J. T.; SILVA, A.S.; BOTELHO, R. G. M. **Erosão e conservação dos solos**. Rio de Janeiro: Bertrand, p. 57-99. 1999.

OLLIER, C. D. **Tectonics and landforms**. Geomorphology texts, Longman Inc., London, p.57-161. 1981.

PAISANI, J.C.; CALEGARI, M.R.; PONTELLI, M.E.; PESSENDA, L.C.R.; CÔRREA, A.C.B.; PAISANI, S.D.L.; RAITZ, E. O papel das mudanças climáticas do Quaternário Superior na dinâmica evolutiva de paleovale de segunda ordem (Sul do Brasil). **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 14, n. 1, p.103 -116, 2013.

PAIXÃO, R. W. Evolução da Paisagem Geomorfológica da Bacia do Rio Grande, RJ: Dinâmicas de Dissecção e Evidências de Captura. **Dissertação de Mestrado**, Departamento de Geografia e Meio Ambiente, PUC. Rio de Janeiro. 150 pp. 2015.

PAIXÃO, R. W.; SILVA, S. E. L. ; SOUZA, R. A. ; FREITAS, M. M. . Caracterização geomorfológica da bacia do rio Quilombo, RJ: esboço das influências geológicas e geomorfológicas no sistema de drenagem. In: Archimedez Perez Filho; Raul Reis Amorim. (Org.). **Os Desafios da Geografia Física na Fronteira do Conhecimento**. 1ed.Campinas: 2018, v. 1, p. 6263-6273. 2018.

PASA, V. Estudo da conexão entre as drenagens do Médio Paraíba do Sul e do Alto Tietê: o caso do cotovelo de Guararema - SP, Brasil. **Dissertação de Mestrado**, Departamento de Geografia, Universidade de São Paulo. 110 p. 2013.

PELECH, A. S. Paleorrelevo Pleistocênico e estimativas de dissecção vertical e volumétrica para o Holoceno em uma pequena bacia hidrográfica - médio vale do rio Paraíba do Sul (RJ). **Quaternary and Environmental Geosciences**, 07(1-2): 6 – 13. 2016.

PENCK, W. **Morphological analysis of landforms**. Macmillan, London. 1953.

PÉREZ-PEÑA, J. V.; AL-AWABDEH, M.; AZAÑÓN, J. M.; GALVE, J. P.; BOOTH-REA, G.; NOTTI, D. *SwathProfiler* and *NProfiler*: Two new ArcGIS Add-ins for the automatic extraction of swath and normalized river profiles. **Computers & Geosciences** 104, 135–150. 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2016.08.008>

PERRON, J.; ROYDEN, L. An integral approach to bedrock river profile analysis. *Earth Surf. Process. Landf.* 38:570–576. 2013.

PINET, P.; SORIAU, M. Continental Erosion and Large-Scale Relief. **Tectonics**, 7(3): 563-582, 1988.

QUEIROZ, G.L.; SALAMUNI, E.; NASCIMENTO, E.R. Knickpoint Finder: A software tool that improves neotectonic analysis. **Computers & Geosciences**, v. 76, p. 80-87, 2014.

RAMOS, R. R. C. Estratigrafia da sucessão sedimentar terciária da bacia de Resende, entre Resende e Quatis (RJ), com ênfase na caracterização das litofácies, ciclicidade e paleocorrentes. Rio de Janeiro, 208 p. **Dissertação de Mestrado**, Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, UFRJ. 1997.

RAMOS, R. R. C.; MELLO, C. L. & SANSON, M. S. R. Revisão Estratigráfica da Bacia de Resende, Rift Continental do Sudeste do Brasil, Estado do Rio de Janeiro. **Geociências**, 25 (1): 59-69. 2006.

RAMPANELLI, A., SAAD, A., ARAUJO NETO, E., CASADO, F., ETCHEBEHERE, M. Recursos naturais da Bacia Sedimentar de Taubaté como fator de desenvolvimento sócio-econômico: um estudo aplicado aos municípios de Taubaté e Tremembé, estado de São Paulo. **Geociências**, Brasil, 30, mar. 2011.

REZENDE, E. C.; SALGADO, A. A. R.; SILVA, J. R.; BOURLÈS, D.; BRAUCHER, R.; LÉANNI, L. Fatores Controladores da Evolução do Relevo no Flanco NNW do Rift Continental do Sudeste do Brasil: Uma Análise Baseada na Mensuração dos Processos Denudacionais de Longo-termo. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.14, n.2, (Abr-Jun) p.221-234, 2013.

RICCOMINI, C. O. **Rift continental do sudeste do Brasil**. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo. 256 p. 1989.

RICCOMINI, C.; GROHMANN, C. H.; SANT'ANNA, L. G.; HIRUMA, S. T. A Captura das Cabeceiras do Rio Tietê pelo Rio Paraíba do Sul. In: MONDENSEI-GAUTTIERI, M. C.; BARTORELLI, A. CARNEIRO, C. R. LISBOA, M. B. A. L. **A Obra de Aziz Nacib Ab'Sáber**. São Paulo: Beca-BALL edições, 2010.

RICCOMINI, C.; SANT'ANNA, L. G.; FERRARI, A. L. Evolução geológica do Rift Continental do Sudeste do Brasil. In: MANTESSO-NETO, V.; BARTORELLI, A.; CARNEIRO, C. D. R.; BRITO NEVES, B. B. (Org.). **Geologia do Continente Sul-Americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida**. São Paulo: Beca, p. 383-405. 2004.

SALAMUNI, E.; NASCIMENTO, E. R.; SILVA, P. A. H.; QUEIROZ, G. L. SILVA, G. Knickpoint Finder: ferramenta para a busca de geossítios de relevante interesse para o geoturismo. **Boletim Paranaense de Geociências**, v. 70, p. 200 – 208. 2013.

SALGADO, A.A.R., REZENDE, E.A., BOURLÈS, D., BRAUCHER, R., DA SILVA, J.R., GARCIA, R.A., Relief evolution of the continental rift of Southeast Brazil revealed by in situ produced ^{10}Be concentrations in river-borne sediments. **Journal of South America Earth Science**. 67:89–99. 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jsames.2016.02.002>>. Acesso em: janeiro de 2020.

SALGADO, A.R., MARENT, B.R., CHEREM, L.F.S., BOURLÈS, D., SANTOS, L.J.C., BRAUCHER, R., BARRETO, H.N. Denudation and retreat of the Serra do Mar escarpment in southern Brazil derived from in situ-produced ^{10}Be concentration in river sediment. **Earth Surface Processes and Landforms**, 39, 311-319. 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/esp.3448>>. Acesso em: janeiro de 2020.

SANT'ANNA NETO, J. L. Decálogo da climatologia do sudeste brasileiro. **Revista Brasileira de Climatologia**, v.1, n°1, p.43-60. 2005.

SANTOS M., HASUI Y., MORALES N., LADEIRA F.S.B. A Bacia Terciária de Aiuruoca: contribuição para o entendimento da evolução cenozóica do Sul de Minas Gerais. In: **7º Simpósio do Cretáceo no Brasil e 1º Simpósio do Terciário do Brasil**. Serra Negra, *Boletim*, 114. 2006.

SARTI, T. P. Condicionantes litológicos e estruturais na evolução da rede de drenagem, Sapucaia-RJ, médio vale do Rio Paraíba do Sul. **Dissertação de Mestrado**. Faculdade de Geologia, UERJ. 95 pp. 2008.

SARTI, T. P., CASTANHEIRA, M. V. E. S., FREITAS, M. M., NINA, I. P., OLIVEIRA, C. M. R., DART, R. O. Capturas de drenagem e processos erosivos no médio vale do rio Paraíba do Sul In: **Anais do V Simpósio Nacional de Geomorfologia e I Encontro Sul-Americano de Geomorfologia**. 2004.

SARTI, T. P., FREITAS, M. M. Processos erosivos no médio vale do rio Paraíba do Sul RJ/MG: o efeito do rebaixamento do nível de base. In: **Anais do XI Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada**. 2005.

SILVA, S. M. da. Carstificação em rochas siliciclásticas: estudo de caso da Serra do Ibitipoca, MG. **Dissertação (Mestrado em Geologia)** – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Belo Horizonte, Belo Horizonte. 143f. 2004.

SILVA, T. M. A Estruturação Geomorfológica do Planalto Atlântico no Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 265p., **Tese de Doutorado**, Departamento de Geografia, UFRJ. 2002.

SILVA, T. M. Evolução Geomorfológica e Sedimentação de Canais Erosivos Holocênicos no Médio Vale do Rio Paraíba do Sul. Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, **Dissertação de Mestrado**, 165p. 1991.

SILVA, T. M.; MONTEIRO, H.S.; CRUZ, M.A.; MOURA, J.R.S. Anomalias de drenagem e evolução da paisagem no médio vale do rio Paraíba do Sul (RJ/SP). **Anuário do Instituto de Geociências**, Rio de Janeiro, v. 29, p. 210-224. 2006.

SILVA, T. M.; SANTOS, B. P. **Sistemas de Drenagem e Evolução da Paisagem**. Revista Geogr. Acadêmica v.4, n.1, 5-19. 2010.

SILVA, T. P. Modelo Geológico-Geomorfológico de Evolução da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul. **Tese de Doutorado**, Departamento de Geologia, UFRJ. 166 p. 2012.

SORDI, M. V. de, SALGADO, A. A. R., SIAME, L. BOURLÈS, D., PAISANI J. C., LEANNI, L. BRAUCHER, R., COUTO, E. VÍTOR do, ASTER TEAM. Implications of drainage rearrangement for passive margin escarpment evolution in Southern Brazil. **Geomorphology**. 306: 155-169. 2018. Disponível em<doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.01.007>. Acesso em: janeiro de 2020.

SORDI, M. V., SALGADO, A. A. R., PAISANI, J. C. Evolução do relevo em áreas de tríplex divisor de águas regional - o caso do Planalto de Santa Catarina: análise da rede hidrográfica. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, 16 (3):435–447. 2015.

SOUZA, D. H.; STUART, F. M.; RODÉS, A.; PUPIM, F. N. HACKSPACHER, P. C. Controls on the erosion of the continental margin of southeast Brazil from cosmogenic ^{10}Be in river sediments. **Geomorphology**, volume 330, April, pp. 163-176. 2019.

SOUZA, R. A.; SILVA, S. E. L.; PAIXÃO, R. W.; FREITAS, M. M.; A Ocorrência dos *Knickpoints* e sua Relação com a Litoestrutura do Substrato Geológico na Evolução da Rede de Drenagem no Médio Vale do Paraíba do Sul. In: Archimedeiz Perez Filho; Raul Reis Amorim. (Org.). **Os Desafios da Geografia Física na Fronteira do Conhecimento**. 1ed.Campinas: Instituto de Geociências da UNICAMP, v. 1, p. 6470-6475. 2018.

STOKES, M., MATHER, A., RODES, A., KEARSEY, S., LEWIN, S. Anatomy, Age and Origin of an Intramontane Top Basin Surface (Sorbas Basin, Betic Cordillera, SE Spain). **Quaternary** 1, 15. 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/quat1020015>>. Acesso em: janeiro de 2020.

STRUTH, L.; GARCIA-CASTELLANOS, D.; VIAPLANA-MUSZAS, M. VERGÉS, J. Drainage network dynamics and knickpoint evolution in the Ebro and Duero basins: From endorheism to exorheism. **Geomorphology**, 327. 554 – 571. 2019.

STRUTH, L.; GARCIA-CASTELLANOS, D.; VIAPLANA-MUSZAS, M. VERGÉS, J. Drainage network dynamics and knickpoint evolution in the Ebro and Duero basins: From endorheism to exorheism. **Geomorphology**, 327. 554 – 571. 2019.

STUTENBECKER, L.; COSTA, A. SCHLUNEGGER, F. Lithological control on the landscape form of the upper Rhône Basin, Central Swiss Alps. **Earth Surface Dynamics**, 4, 253–272. 2016.

SUMMERFIELD, M. A. **Global Geomorphology: An introduction to the Study of Landforms**. Longman Scientific & Technical. p. 537. 1991.

THOMAZ-FILHO, A.; MIZUSAKI, A.M.P.; MILANI, E. J.; CESERO, P. DE. Rifting and Magmatism Associated with the South América and África Break Up. **Revista Brasileira de Geociências**, 30(1):017-019. 2000.

TUPINAMBÁ, M.; SILVA, L. G.; HEILBRON, M. O graben de Itaocara, Rio de Janeiro, sudeste do Brasil. In: **IX Simposio Nacional de estudos tectônicos/III International Symposium on Tectonics**, Búzios. Boletim de resumos. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Geologia. pp. 305-306. 2003.

VACHERAT, A.; BONNET, S.; MOUTHEREAU, F. Drainage reorganization and divide migration induced by the excavation of the Ebro basin (NE Spain). **Earth Surface Dynamics**, 6, 369–387. 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.5194/esurf-6-369-2018>>. Acesso em: janeiro de 2020.

VALERIANO, C. M. & HEILBRON, M. A zona de transtensão de Volta Redonda e sua implicação na junção entre os riftes do Vale do Rio Paraíba e o da Guanabara. In: **III Simpósio de Geologia do Sudeste. Rio de Janeiro**, Atas. Rio de Janeiro, Outubro/1993. SBG, Núcleos Rio de Janeiro/São Paulo, p.9-16. 1993.

VALERIANO, M. M.; ROSSETTI, D. F. Topodata: Brazilian full coverage refinement of SRTM data. **Applied Geography**, v. 32, p.300-309, 2012.

WILLETT, S. D.; MCCOY, S. W.; PERRON, J. T.; GOREN, L.; CHEN, C. Y. Dynamic reorganization of river basins. **Science** 343, 248765. 2014.

ZALÁN, P. V.; OLIVEIRA, J. A. B. Origem e evolução estrutural do Sistema de Riftes Cenozóicos do Sudeste do Brasil. **Boletim de Geociências Petrobras**, Rio de Janeiro, v. 13, n. 2, p. 269-300, maio/nov. 2005.

ZHANG, H. Y.; SHI, Z. H.; GUO, M. H. Linking watershed geomorphic characteristics to sediment yield: Evidence from the Loess Plateau of China. **Geomorphology** 234, p. 19-27. 2015.

7. Apêndices



www.ugb.org.br
ISSN 2236-5664

Revista Brasileira de Geomorfologia

v. 20, nº 1 (2019)

<http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v20i1.1498>



MORFOGÊNESE DO DIVISOR HIDROGRÁFICO PARANÁ/PARAÍBA DO SUL: O CASO DA SUB-BACIA DO PARAÍBUNA

MORPHOGENESIS OF THE PARANÁ/PARAÍBA DO SUL HYDROGRAPHIC DIVIDER: THE CASE OF THE PARAÍBUNA SUB-BASIN

Rodrigo Wagner Paixão

*Departamento de Geografia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro
Rua Marquês de São Vicente, 225, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. CEP: 22451-900. Brasil
E-mail: rodrigowpp1@gmail.com*

André Augusto Rodrigues Salgado

*Departamento de Geografia, Universidade Federal de Minas Gerais
Av. Antônio Carlos, 6627, Belo Horizonte, Minas Gerais. CEP 31270-901. Brasil
E-mail: geosalgado@yahoo.com.br*

Marcelo Motta de Freitas

*Departamento de Geografia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro
Rua Marquês de São Vicente, 225, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. CEP: 22451-900. Brasil
E-mail: marcelomotta@puc-rio.br*

Informações sobre o Artigo

Recebido (Received):
16/08/2018
Aceito (Accepted):
08/11/2018

Palavras-chave:

Morfogênese; Capturas fluviais;
rio Paraíba.

Keywords:

Morphogenesis; river capture;
Paraíba river.

Resumo:

O presente artigo tem como objetivo analisar a morfogênese do relevo da borda oeste do Rift Continental do Sudeste do Brasil (RCSB) no divisor hidrográfico Paraná / Paraíba do Sul, localizado na Serra da Mantiqueira. Para tanto, serão realizadas análises morfológicas e morfométricas do relevo em bacias hidrográficas que drenam tanto para o interior do continente sobre o planalto no reverso da Serra da Mantiqueira – Bacia Hidrográfica do Rio Grande - quanto para bacias que drenam a frente escarpada da serra em direção ao Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba. Utilizou-se como base para a realização do trabalho o levantamento de informações bibliográficas, análises em ambiente SIG, trabalhos de campo e elaboração de mapas. A análise dos perfis topográficos e longitudinais dos rios indicam a existência de morfologias de relevo planáltico para bacias que drenam a frente escarpada da Serra da Mantiqueira. A amplitude de relevo nas bacias que drenam o planalto interiorano é mais baixa que as bacias que drenam para o RCSB, variando entre 200m e 500m respectivamente. A densidade de *knickpoints* é maior nas bacias que drenam para o RCSB o que pode ser comprovado pela presença de rupturas no perfil longitudinal dos rios. Os lineamentos estruturais apresentaram orientação preferencial para N50W e N40W, este comportamento também pode ser observado entre as bacias interioranas e do graben do Paraíba do Sul quando analisadas separadamente. A orientação dos canais de drenagem de

1ª e 2ª ordem indicou forte controle estrutural nos rios, uma vez que as orientações preferencias identificadas foram para o quadrante NW, principalmente para os canais associados à sub-bacia do rio Paraíba do Sul que apresentou N50W como a direção mais representativa. Em termos morfométricos, as taxas máximas e mínimas de SPI apresentaram mudanças significativas nos valores entre as bacias, contudo, o valor médio das bacias se manteve semelhante. De maneira geral, as bacias que drenam para o RCSB apresentam os valores máximos mais elevados em relação às bacias do planalto interiorano. Este comportamento aponta para um maior potencial erosivo nas bacias que drenam frentes escarpadas do que nas bacias situadas nos planaltos superiores com morfologia mais suave. A análise da rede de drenagem demonstrou feições geomorfológicas típicas de anomalias, tais como cotovelos, e capturas fluviais principalmente, nas bacias afluentes da sub-bacia do rio Paraíba do Sul. Estas feições indicam processos de reorganização fluvial por meio de capturas de drenagem, que ao capturar rio adjacentes, promovem mudança na direção do segmento do rio, formando um cotovelo, bem como, a formação de um divisor rebaixado e um vale superdimensionado. O conjunto de análises aponta para o fato de que os afluentes da bacia hidrográfica do Rio Paraíba do Sul apresentam maior agressividade no processo de dissecação do relevo do que aqueles que drenam as terras altas da Serra da Mantiqueira em direção ao Rio Grande.

Abstract:

The present article aims to analyze the morphogenesis of the western border of the Continental Rift of Southeastern Brazil (RCSB) in the Paraná / Paraíba do Sul hydrographic divisor, located in the Serra da Mantiqueira. For that, morphological and morphometric analyzes of the relief will be carried out in watersheds that drain both into the interior of the continent on the plateau on the back of the Serra da Mantiqueira - Rio Grande Basin - as well as for basins that drain the steep front of the mountain towards the Paraíba do Sul River Basin. The collection of bibliographic information, GIS analysis, field work and mapping were used as the basis for the work. The analysis of the topographic longitudinal profiles of the rivers indicates the existence of planar relief morphologies for basins that drain the steep front of the Mantiqueira Range. Moreover, the relief amplitude in the basins draining the interior plateau is lower than the drainage basins for the RCSB, varying between 200m and 500m respectively. The density of knickpoints is greater in the basins that drain into the RCSB, which can be evidenced by the presence of abrupt breaks in the longitudinal profile of the rivers. The structural lineaments presented preferential orientation for N50W and N40W, this behavior can also be observed between the interior and graben basins of Paraíba do Sul when analyzed separately. The orientation of the 1st and 2nd order drainage channels indicated a strong structural control in the rivers, since the orientation preferences identified were for the NW quadrant, mainly for the channels associated to the sub-basin of the Paraíba do Sul river that presented N50W as the most representative direction. In morphometric terms, the maximum and minimum SPI rates presented significant changes in the values between the basins, however, the average value of the basins remained similar. In general, the drainage basins for the RCSB show the highest maximum values in relation to the basins of the interior plateau. This behavior indicates a greater erosive potential in the basins that drain steep fronts than in the basins located in the upper plateaus with a softer morphology. The analysis of the drainage network showed typical geomorphological features of anomalies, such as elbows, and fluvial catches, mainly in the affluent basins of the Paraíba do Sul sub-basin. These features indicate processes of river reorganization by means of drainage catches, which when capturing adjacent rivers, promote a change in the direction of the river segment, forming an elbow, as well as the formation of a recessed divider and an oversized valley. The set of analyzes points to the fact that the tributaries of the Paraíba do Sul River basin present greater aggression in the relief dissection process than those that drain the highlands of the Serra da Mantiqueira towards Rio Grande.

Introdução

No sul e sudeste do Brasil, os principais divisores hidrográficos são geralmente constituídos por um relevo em forma de degrau onde as terras altas drenam em direção a uma bacia hidrográfica e a escarpa e o

piso inferior drenam em direção a outra (CHEREM *et al.*, 2012, 2013; SALGADO *et al.*, 2012, 2016). Estes divisores em forma de degrau no relevo constituem áreas onde ocorrem feições de reorganização da rede de drenagem, bem como, processos de capturas fluviais (SUMMERFIELD, 1991; BISHOP, 1995; SALGADO

et al., 2012; CHEREM *et al.*, 2013; REZENDE *et al.*, 2013; SORDI *et al.*, 2015). Estes processos ocorrem graças à erosão diferencial e recuo de cabeceiras controlados por níveis de base, onde as bacias que apresentam cota altimétrica mais baixas de nível de base, possuem potencial erosivo maior (CHRISTOFOLETTI, 1977; BISHOP, 1955; OLIVEIRA, 2010; SILVA & MOURA, 2010; MARENT *et al.*, 2013). Neste sentido, no sul e sudeste do Brasil, as bacias hidrográficas que drenam as frentes escarpadas voltadas para o piso inferior de relevos em degrau tendem a apresentar taxas de denudação maior que bacias planálticas interioranas que ocupam o piso superior (CHEREM *et al.*, 2012; SALGADO *et al.*, 2014, 2016; REZENDE *et al.*, 2013; SORDI *et al.*, 2018).

No Brasil, o relevo da região sudeste é resultado de esforços tectônicos compressivos durante o Neoproterozoico e distensivos durante o Paleógeno sobre o qual atuaram os fatores exógenos que moldaram a superfície e que tiveram sua ação condicionados por estruturas geológicas herdadas destes eventos e pela resistência litológica (HEILBRON *et al.*, 2000; FERRARI, 2001; RICOMINNI *et al.*, 2004; RICOMINNI *et al.*, 2010). Os esforços distensivos da passagem do Mesozoico para o Cenozoico promoveram a formação do Rift Continental do Sudeste do Brasil (RCSB) ou do Sistemas de Riftes Cenozoicos do Sudeste do Brasil (ASMUS & FERRARI, 1978; RICOMINNI *et al.* 2010; ZALÁN *et al.*, 2005). A formação do RCSB implicou na formação de escarpas morfológicas no sudeste brasileiro e, consequentemente, alterou a organização e a dinâmica hidrológica e erosiva dos sistemas de drenagem pelo rebaixamento do nível de base regional (SILVA *et al.*, 2001). Diante disso, acredita-se que o rio Paraíba do Sul, ao drenar o piso do graben, promoveu capturas de drenagens ao longo do planalto sudeste brasileiro por meio de recuo de cabeceira, proporcionado, principalmente, pelo fato de possuir nível de base mais baixo que as bacias hidrográficas circunvizinhas e, graças a isso, maior potencial erosivo (AB'SABER, 1957; OLIVEIRA, 2010; CHEREM *et al.*, 2013; REZENDE *et al.*, 2015; SALGADO *et al.*, 2016).

Neste sentido, o presente estudo tem por objetivo analisar a morfogênese do relevo da borda oeste do Rift Continental do Sudeste do Brasil (RCSB) no divisor hidrográfico localizado na Serra da Mantiqueira que

separa as bacias hidrográficas do Paraná (Rio Grande) com a do Paraíba do Sul (Sub-bacia do Paraíbauna). Para tanto, serão realizadas análises morfológicas e morfométricas do relevo em bacias hidrográficas que drenam tanto para o interior do continente sobre o planalto no reverso da Serra da Mantiqueira – Bacia Hidrográfica do Rio Grande - quanto para bacias que drenam a frente escarpada da serra em direção ao RCSB - Bacia Hidrográfica do Rio Paraíbauna. Essas análises objetivam levantar evidências de reorganização dos sistemas de drenagem, bem como, evidenciar parâmetros morfométricos que contribuem no entendimento da morfogênese do relevo em divisores hidrográficos regionais.

Área de Estudo

A área analisada situa-se na borda oeste do RCSB, no estado de Minas Gerais, e abrange os municípios de Ibertioga, Antônio Carlos, Bias Fortes, Santa Rita de Ibitipoca, Lima Duarte, Olaria e Santana do Garambéu. A Serra da Mantiqueira constitui um imponente escarpamento regional e marca o limite oeste do Rift Continental do Sudeste do Brasil e do gráben do rio Paraíba do Sul. Constitui, também, o divisor topográfico entre as bacias hidrográficas que drenam para o rio Paraíbauna no gráben continental e as bacias afluentes do rio Grande no planalto mineiro (Figura 1). Na área de estudo, a frente escarpada da Serra da Mantiqueira apresenta lineamento preferencial NE-SW, com algumas variações.

Em termos geológicos, a área de estudo está inserida na Província Mantiqueira que representa uma entidade geotectônica originada durante a Orogênese Brasileira/Pan-Africana no Neoproterozoico, cuja estabilização desempenhou importante papel na aglutinação deste setor do Gondwana (HEILBRON *et al.* 2004). Esta evolução orogênica, considerada por Heilbron *et al.* (2004) como a mais nova no cenário das colagens brasileiras/pan-africanas do segmento crustal considerado, foi responsável pela deformação, metamorfismo, magmatismo e articulação dos diversos terrenos. A área de estudo situa-se a sul do Cráton de São Francisco e no Terreno Ocidental da Faixa Móvel Ribeira e as unidades geológicas representam ortognaisses Paleoproterozoicos do Complexo Mantiqueira, metassedimentos Neoproterozoicos da Megassequência Andrelândia, como os quartzitos, e granitos isotrópicos (COMIG, 2014) (Figura 2).

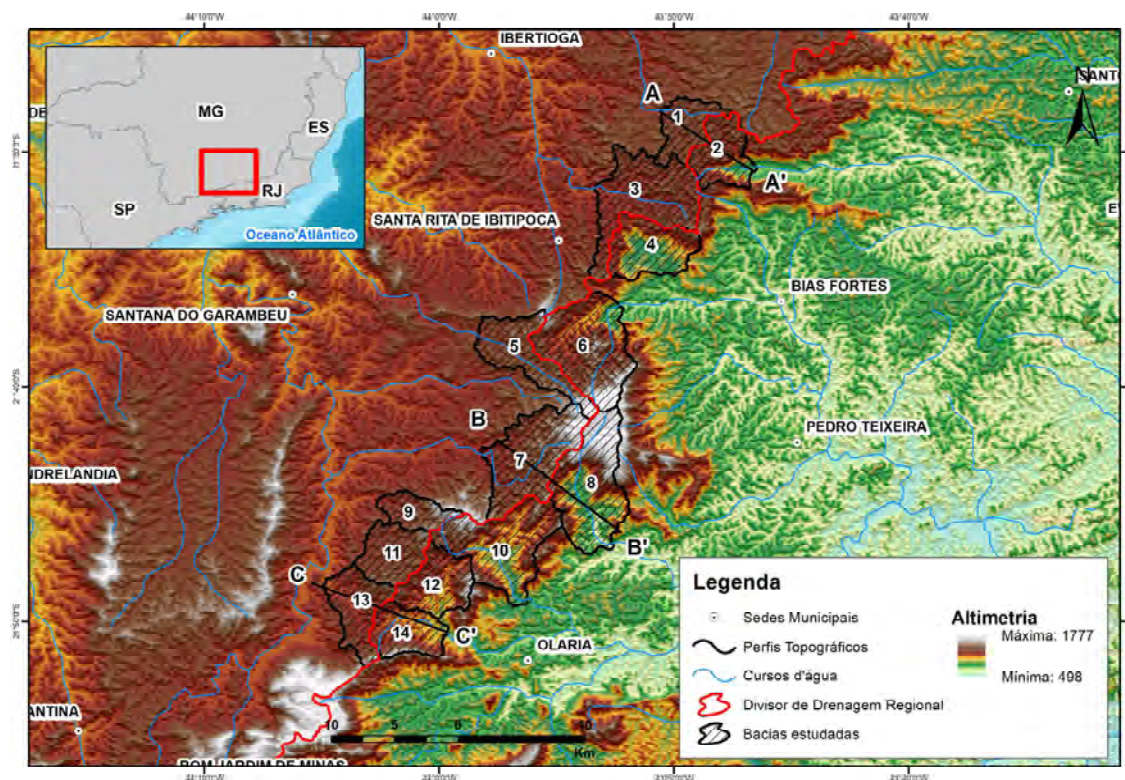


Figura 1 - Localização da área de estudo na borda oeste do RCSB, no estado de Minas Gerais, e as bacias estudadas. 1. Córrego do Teixeira; 2. Córrego Ponte Funda; 3. Rio das Elvas; 4. Ribeirão dos Almeidas; 5. Ribeirão Bandeira; 6. Rio Vermelho; 7. Ribeirão Conceição; 8. Córrego do Salto; 9. Ribeirão Retiro do Meio; 10. Ribeirão Cata Maior; 11. Ribeirão do Vau; 12. Córrego Fundo; 13. Córrego Ponte da; 14. Ribeirão Palmital. As bacias ímpares drenam para o interior do continente, enquanto as bacias pares drenam para o RCSB.

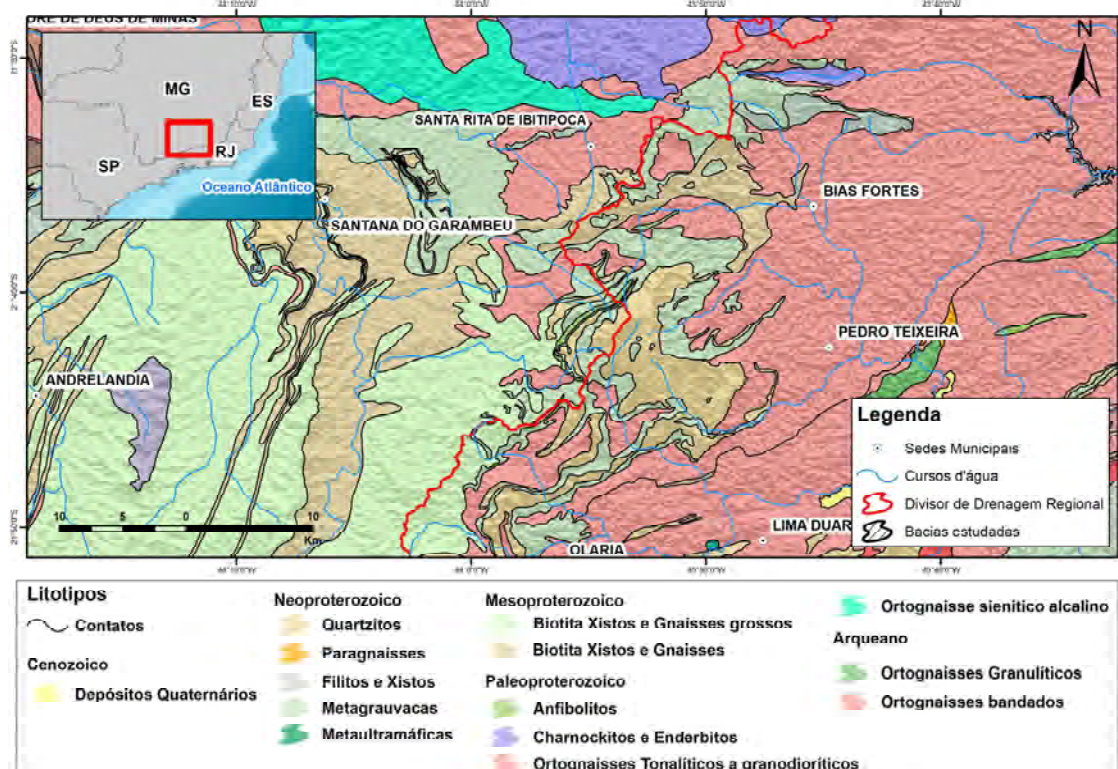


Figura 2 - Contexto Geológico da área de estudo. Fonte: COMIG, 2014.

Devido à sua geologia complexa, o relevo apresenta feições geomorfológicas distintas, influenciadas pelas estruturas geológicas e pela erosão diferencial dos litotipos da região. O relevo compreende o alinhamento escarpado e montanhoso da Serra da Mantiqueira, circundado por modelado de relevo mais suave, representados por morros ondulados e forte ondulados (BENTO & RODRIGUES, 2013). Pode-se perceber

que os conjuntos compostos pelos resistentes quartzitos correspondem aos picos mais elevados, podendo atingir 1.784 metros de altitude, como o Pico da Lombada, fato que evidencia o controle geológico na morfogênese do relevo (figuras 1 e 2). O alinhamento escarpado é bastante marcante na área de estudo e delimita a transição de relevo do planalto elevado no reverso da Mantiqueira para as colinas e morros da frente escarpada (Figura 3).

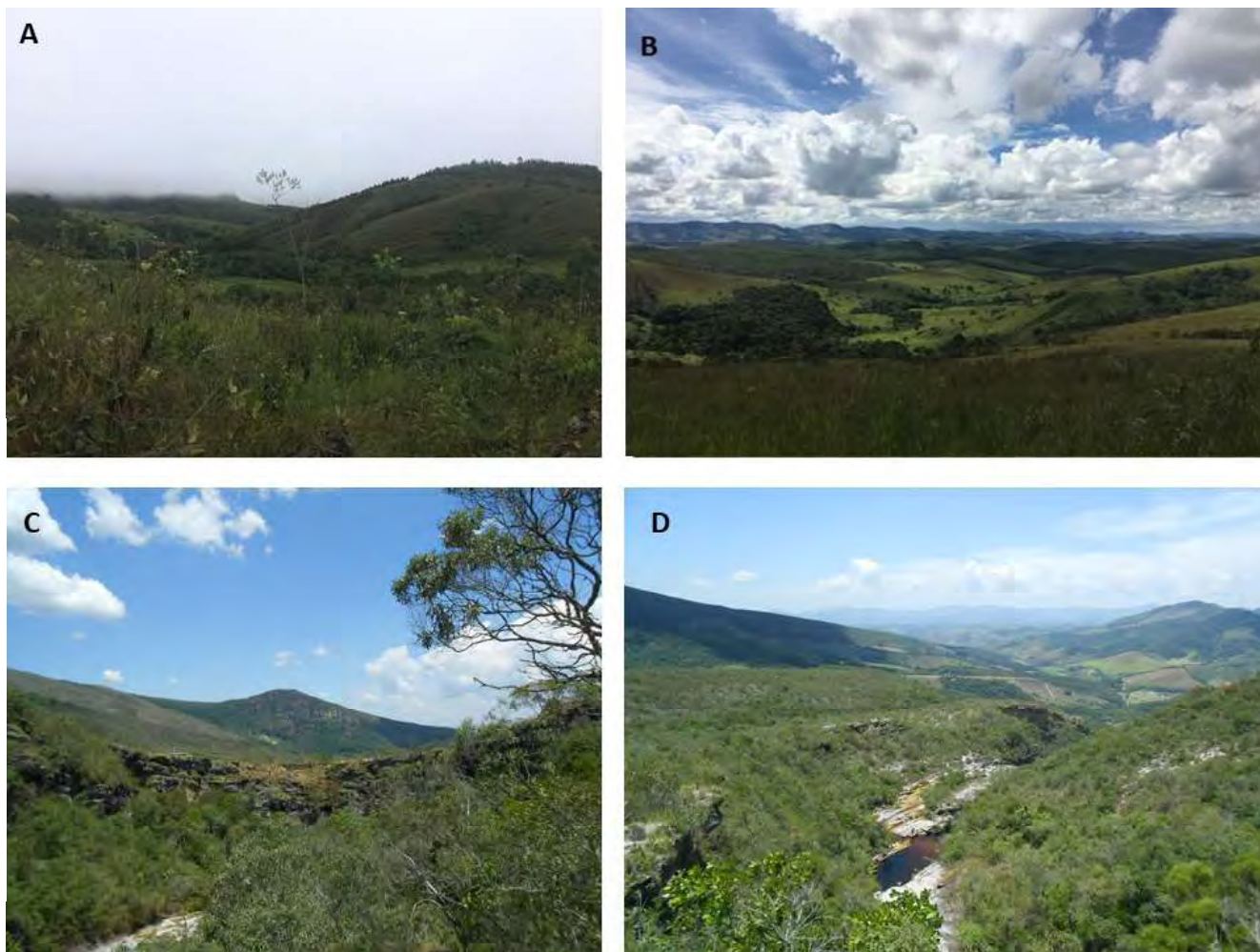


Figura 3 - Aspectos do relevo no planalto interiorano no reverso (A e B) e na frente escarpada da Serra da Mantiqueira (C e D).

Em relação aos solos da região, os mais comuns são os Neossolos Litólicos, Cambissolos Háplicos e Húmicos, Latossolos Vermelho-Amarelos, bem como, ocorrências pontuais de Organossolos (OLIVEIRA, 2016). A área de estudo situa-se no domínio da Mata Atlântica composta por diferentes tipos vegetacionais e apresenta fisionomias florestais, arbustivas, campestres e antrópicas. São identificadas formações florestais de Floresta Ombrófila Densa Aluvial, Floresta Ombrófila Densa Montana e Floresta Ombrófila Densa Alto-Mon-

tana e fragmentos de Floresta Estacional Semidecidual (VALENTE *et al.*, 2011). Entretanto, boa parte da vegetação natural já foi substituída por pastagens e demais usos agrícolas.

Procedimentos Metodológicos

Utilizou-se como base para a realização do trabalho o levantamento de informações bibliográficas, análises em ambiente SIG, trabalhos de campo e elaboração

de mapas. Os procedimentos para extração dos dados morfométricos foram realizados utilizando o software *ArcGIS* 10.1, assim como os mapas apresentados no presente artigo.

Os procedimentos para os mapeamentos foram elaborados a partir da base cartográfica do IBGE na escala de 1:50.000 para a região. Neste sentido, foram utilizadas as cartas topográficas inseridas na área de estudo, totalizando quatro, sendo elas: Ibertioga, Bias Fortes, Lima Duarte e Bom Jardim de Minas. As cartas topográficas foram utilizadas na delimitação das bacias estudadas e possibilitaram a identificação de feições morfológicas relacionadas a processos de reorganização de sistemas de drenagem e evolução do relevo, tais como: divisores rebaixados, cotovelos de drenagem e vales superdimensionados.

Além da base cartográfica do IBGE, foi utilizada imagem de radar SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) do projeto TOPODATA (VALERIANO & ROSSETI, 2012). A partir da imagem SRTM foram extraídas informações altimétricas e derivados dados morfométricos, como: anomalias de drenagem, lineamentos estruturais, índice de rugosidade e *Stream Power Index* (SPI).

Com base nos dados SRTM, foram elaborados três perfis topográficos transversais através dos dados do DEM (Figura 1), assim como, sete perfis longitudinais talvegue dos rios principais das bacias estudadas. Com isso, foram traçados os lineamentos estruturais utilizando-se o software *ArcGis* 10.1 e gerada roseta de orientação dos mesmos no software *OpenStereo* 1.2 para avaliar o controle estrutural regional. Foram extraídas as orientações dos canais de 1ª e 2ª ordem da área de estudo para correlação com os resultados obtidos dos lineamentos estruturais. A análise destes dados possibilita identificar possíveis controles estruturais nos sistemas de drenagem na área de estudo.

Para a identificação das anomalias de drenagem utilizou-se a ferramenta *Knickpoint Finder* (QUEIROZ et al., 2014; SALAMUNI et al., 2013) que se baseia no índice de Hack (HACK, 1973) ou índice RDE para a identificação de anomalias de drenagem ao longo do perfil longitudinal dos rios. Os dados obtidos são pontos de anomalias de 1ª e 2ª ordem, definidos como corredeiras e quedas d'água respectivamente. Por fim, foi elaborado mapa de densidade de *knickpoints* para melhor visualização dos dados.

O Stream Power Index (SPI) indica o potencial erosivo dos canais de determinada área através da interpolação dos dados de declividade e acumulação do fluxo de drenagem (CHEN & YU, 2011; ZHANG et al., 2015). O SPI foi elaborado por Danielson (2013) cujos valores são obtidos através da seguinte equação:

$$SPI = \ln ("Acumulação" + 0.001) * ("Declividade" / 100) + 0.001$$

onde:

SPI = Stream Power Index; "Acumulação": Raster de Fluxo acumulado da drenagem; "Declividade": Raster de declividade.

Resultados e Discussões

Perfis Topográficos e Longitudinais

Ao analisar os perfis topográficos (figuras 4 e 5) pode-se afirmar que, para as bacias interioranas, o relevo apresenta baixa amplitude, aproximadamente 200 metros, entre os topos e os fundos de vale. As médias altimétricas não apresentam variações significativas. Em contrapartida, os setores do perfil associadas às bacias que drenam para o RCSB possuem amplitude de relevo considerável, variando entre 1.250m e 750m.

Na porção NW os perfis possuem morfologias típicas de planalto com gradiente de relevo suave e os vales das bacias interioranas situam-se, aproximadamente, à 1.100m de altitude (Figura 4). Em direção para SE, os perfis apresentam relevo escarpado no degrau topográfico, próximo aos divisores de drenagem. A transição para a porção escarpada indica nível de base mais baixo e, por isso, o gradiente topográfico é maior podendo atingir 500m de diferença entre os topos e fundos de vale.

Os divisores topográficos de drenagem situam-se à montante da frente escarpada da Serra da Mantiqueira, incorporando áreas planálticas para as bacias que drenam ainda para o gráben do Paraíba do Sul (figuras 4 e 5). Esta configuração, onde a bacia que drena o piso inferior do degrau no relevo incorpora áreas do planalto – piso superior – foi observada em quase todos os estudos que investigaram os grandes divisores hidrográficos do sul e sudeste do Brasil e constituem bons indicativos de capturas fluviais e rearranjos da rede de drenagem (CHEREM et al., 2012; SALGADO et al., 2012, 2016; REZENDE et al., 2013; SORDI et al., 2015).

Paralelamente, a análise dos perfis longitudinais dos rios investigados (Figura 5) demonstra que para as drenagens situadas no planalto interiorano, o perfil se comporta de maneira uniforme, sem variações altimétricas significativas. Contudo, as bacias afluentes do rio Paraíba, em direção ao RCSB, possuem variações altimétricas significativas, indicando a ocorrência de anomalias de drenagem associadas à *knickpoints*.

Nota-se que as bacias do RCSB apresentam patamares elevados, em altitudes semelhantes às bacias interioranas, em contato direto com rupturas abruptas no perfil longitudinal. Esta característica marca a transição entre patamares elevados e as frentes escarpadas do relevo. O córrego do Salto e o rio Vermelho são as bacias que possuem as maiores rupturas no perfil longitudinal do rio, com aproximadamente 300m e 200m, respectivamente.

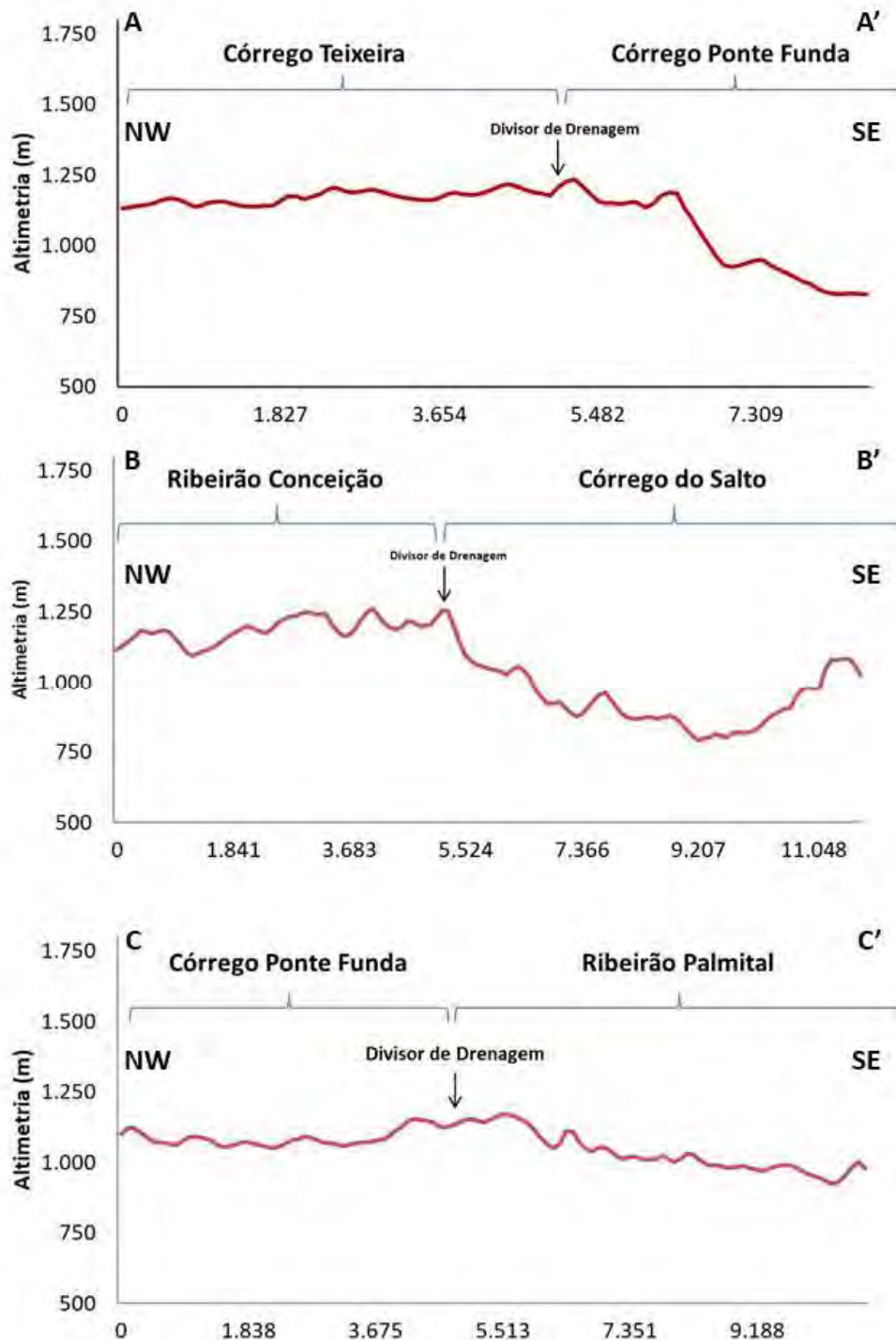


Figura 4 - Perfis topográficos elaborados na área de estudo.

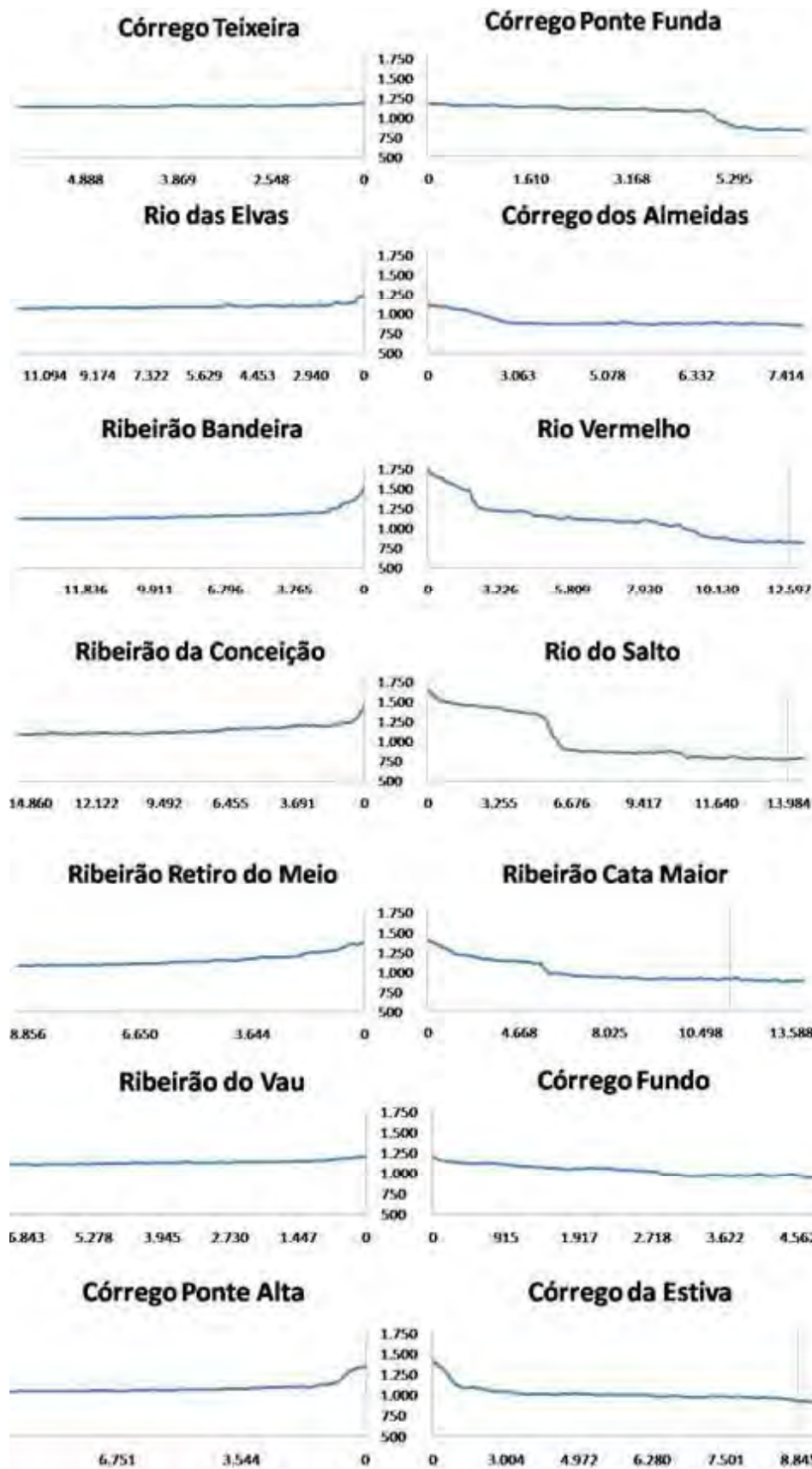


Figura 5 - Perfis longitudinais dos rios principais das bacias estudadas. Os perfis da parte esquerda estão associados às bacias que drenagem para o interior, enquanto os perfis da direita drenam para o RCSB.

Os perfis longitudinais das bacias que drenam para o RCSB possuem níveis de base suspensos, que marcam os degraus topográficos da paisagem e que, em sua maioria, são representados por cachoeiras de elevadas dimensões. A presença de degraus topográficos ou níveis de base indicam mudanças na dinâmica erosiva dos canais de drenagem e marcam a presença de trechos suspensos dos rios. Apesar disso, as bacias do córrego Fundo e o ribeirão Palmital não apresentam morfologias associadas à níveis de base ou *knickpoints* (Figura 5) e, neste trecho, estão no mesmo nível topográfico dos seus pares de bacia que drenam para o planalto interiorano. Esta característica indica que o rio ainda apresenta características de quando era ajustado ao antigo nível de base.

O comportamento dos perfis longitudinais reflete os resultados identificados nos perfis topográficos. As bacias do reverso da Serra da Mantiqueira, drenam sobre relevos planálticos e de baixa amplitude altimétrica, com isso, o perfil longitudinal dos rios apresenta, em sua maioria, feição côncava sem rupturas significativas. Já as bacias em direção ao gráben do Paraíba do Sul, drenam sobre setores planálticos de baixa amplitude de relevo, até atingirem as frentes escarpadas da Serra da Mantiqueira e cair para o piso inferior do degrau topográfico.

Índice RDE e Densidade de Knickpoints

Os resultados obtidos com os índices RDE dos canais de drenagem possibilitaram indicar a ocorrência de anomalias nos perfis longitudinais, consideradas como *knickpoints*. A formação dos mesmos pode estar relacionada com mudança litológica ou condicionante estrutural e pode ser representado por trechos de corredeiras e cachoeiras ao longo do canal. Ao todo, foram identificados 2.462 *knickpoints*, sendo que aproximadamente 38% encontram-se nas bacias interioranas e 62% situam-se nas bacias que drenam para o gráben do Paraíba do Sul (Figura 6). Além disso, pode-se perceber que a densidade de *knickpoints* é maior nas bacias voltadas para o RCSB do que nas bacias interioranas.

Os *knickpoints* identificados foram classificados em 1ª ordem e 2ª ordem, associados à corredeiras e cachoeiras, respectivamente. Na área de estudo, predominam *knickpoints* de 2ª ordem (1.933) associados às rupturas de declive nas escarpas da Serra da Manti-

queira representadas por cachoeiras. Já os *knickpoints* de primeira ordem, situam-se, prioritariamente, na porção do planalto interiorano, pois abrangem relevo de menor amplitude altimétrica e perfis longitudinais mais ajustados ao nível de base do rio Grande.

Pode-se perceber que a densidade dos *knickpoints* é maior próximo ao divisor hidrográfico regional entre as drenagens do rio Paraíbuna e rio Grande (Figura 6). A densidade também é maior nas bacias que drenam para o gráben do Paraíba do Sul, principalmente, no contato entre a frente escarpada da Serra da Mantiqueira e os planaltos elevados que foram capturados. Este comportamento foi observado por Sordi *et al.* (2015), ao identificar maior densidade de *knickpoints* em bacias hidrográficas que drenam para o piso inferior do degrau no relevo na Serra do Mar no estado de Santa Catarina.

Lineamentos Estruturais e Orientação da Rede de Drenagem

Os lineamentos estruturais são identificados em toda área de estudo, tendo sua densidade elevada em vários setores da mesma. A maior densidade de lineamentos pode ser encontrada na porção noroeste da área de estudo dentro dos limites da bacia do rio Elvas afluente do rio Grande. Na porção sudeste da área de estudo, também é possível observar elevada concentração de lineamentos estruturais associadas à bacia do rio Paraíbuna (Figura 7). Em alguns trechos, a frente escarpada da Serra da Mantiqueira apresenta densidade de lineamentos elevada, principalmente, na bacia do córrego Vermelho e ribeirão Palmital. Ao longo do divisor hidrográfico das bacias do rio Paraíbuna e do rio Grande, apenas a porção norte apresenta densidade de lineamentos elevada.

A orientação preferencial dos lineamentos da área de estudo é N50W seguido pelas direções N40W e N50E, sendo os lineamentos N-S e W-L os menos representativos. As rosetas de orientação dos lineamentos das bacias hidrográficas do rio Paraíbuna e do rio Grande são muito semelhantes no que tange às orientações preferenciais. Ambas apresentam a direção N50W como a mais representativa, variando muito pouco nas direções secundárias. Na região hidrográfica do rio Paraíbuna, a segunda direção mais representativa é N50E, enquanto que as bacias afluentes do rio Grande apresentam a direção N40W (Figura 7).

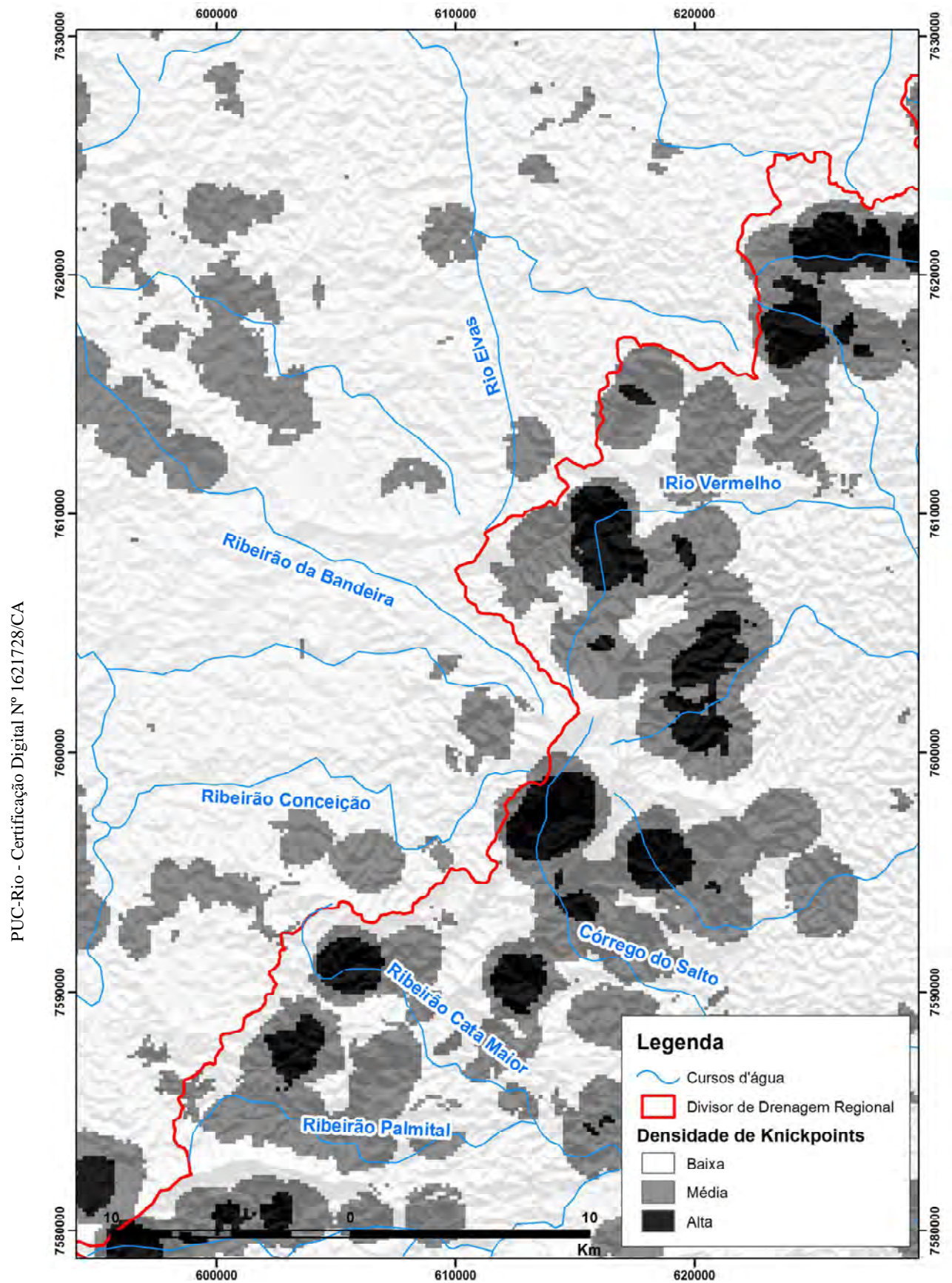


Figura 6 - Densidade de knickpoints identificados na área de estudo por meio da ferramenta Knickpoint Finder.

Na região da Serra da Mantiqueira, outros estudos demonstram o controle estrutural do relevo às zonas de cisalhamento regionais reativadas durante os eventos de rifteamento continental com direção predominante para NE-SW (NETO, 2017). Silva (2004) enfatiza que, para a região do Parque Estadual de Ibitipoca, o tectonismo de idade Plio-Pleistocênica exerceu influência estrutural no relevo, com direções NE-SW e E-W de direções preferenciais de lineamento. Ao correlacionar os lineamentos estruturais com os segmentos de drenagem, Neto (2017) identificou que os rios com direções preferenciais para NE-SW estão submetidos ao controle de estruturas reativadas, enquanto que os rios que drenam na direção NW-SE estão associados a orientação de drenagem invertida a partir do basculamento que soergueu a Mantiqueira. Neste sentido, a predominância dos lineamentos NW na área de estudo, podem estar associados a este evento.

As rosetas de orientação dos canais de 1ª e 2ª ordem na área de estudo, indicam predomínio de canais para a

direção do quadrante NW, contudo, com boa representação de canais voltados para NE (Figura 8). Ao analisar os eixos de canais na área de estudo, nota-se a direção N60W como a mais representativa, contudo, as direções N50W e N70W também apresentam valores elevados de frequência. Apesar disso, também se observa frequências representativas para as direções N70E, N80E e N20E (Figura 8). Os canais afluentes do rio Paraíba do Sul apresentam orientação preferencial para N50W, seguido pelas direções N70W e N20E. Já os afluentes do rio Grande que drenam sobre o planalto interiorano possuem direção preferencial N20W, além das direções N60W e N30W (Figura 8). Neste sentido, pode-se dizer que na área de estudo ocorre controle estrutural na orientação dos canais de drenagem, sendo corroborados pela análise das rosetas de lineamentos e eixos, com direção preferencial para NW. Este comportamento é mais evidenciado nos afluentes do rio Paraíbauna, pois possuem a mesma direção predominante que os lineamentos estruturais, N50W.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1621728/CA

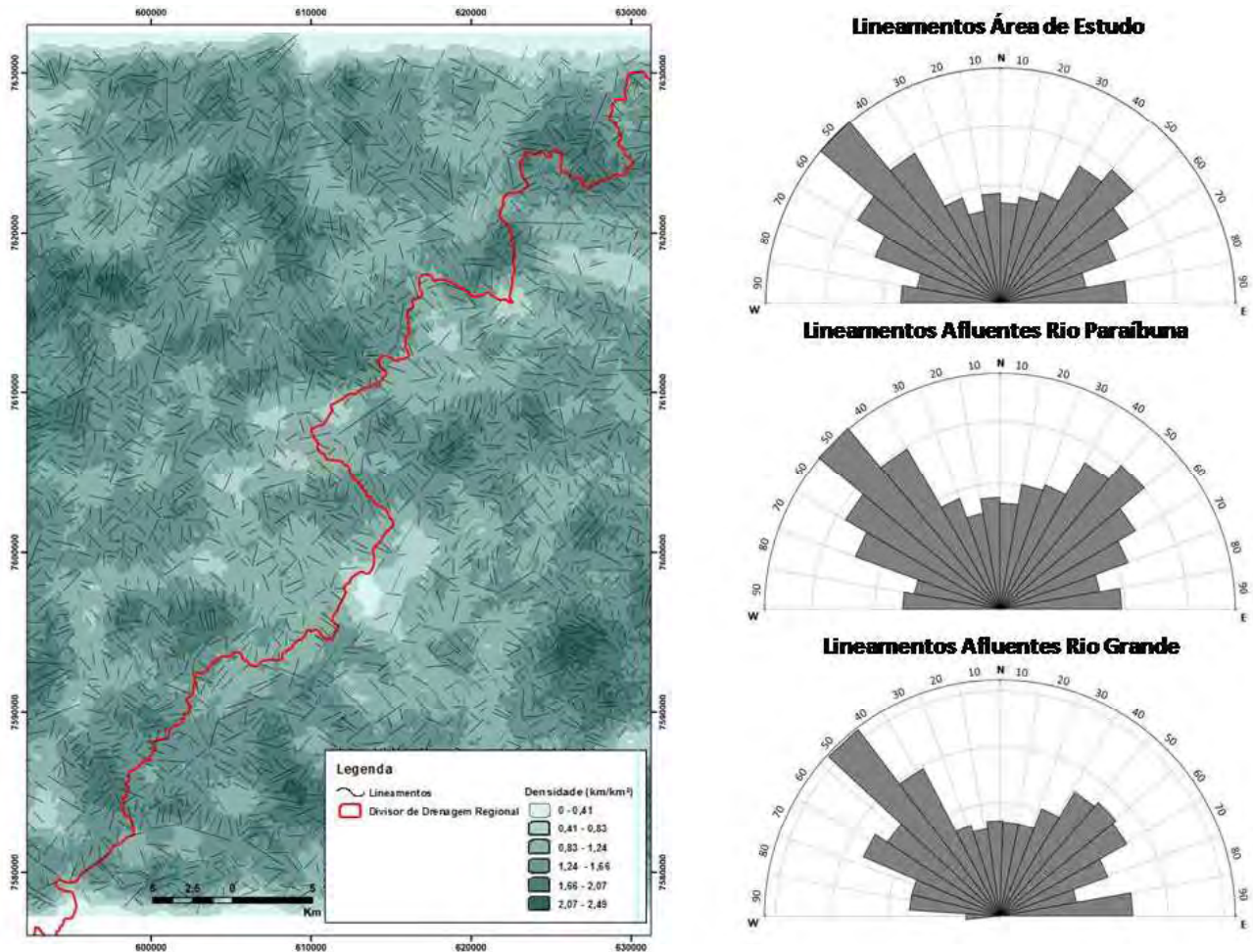


Figura 7 - Densidade de lineamentos e roseta de orientação da área de estudo.

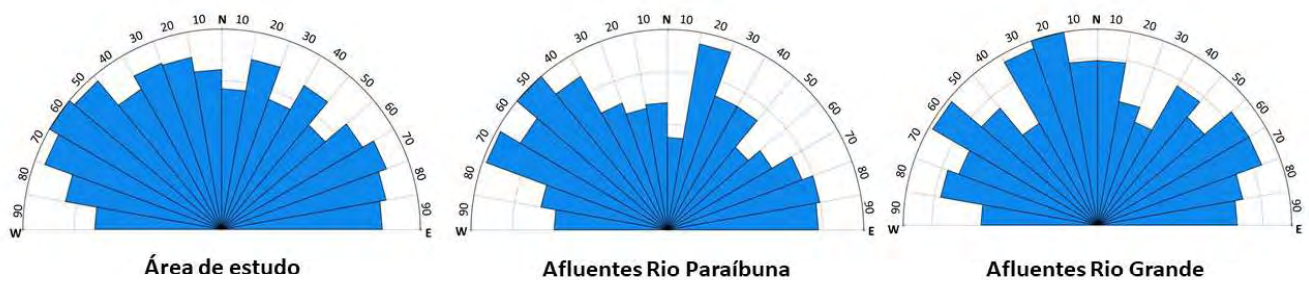


Figura 8 - Roseta de Orientação dos canais de 1ª e 2ª ordem na área de estudo.

Stream Power Index (SPI)

Em termos morfométricos, as taxas máximas e mínimas de SPI apresentaram mudanças significativas nos valores entre as bacias, contudo, o valor médio das bacias se manteve semelhante (Figura 9). Os valores médios variaram entre -0,08 para o rio Elvas e 0,08 para o córrego do Salto. A taxa de SPI mais elevada foi identificada na bacia do Rio Vermelho (8,69), enquanto a bacia do córrego do Salto apresentou o valor mais baixo (-11,96) (Figura 9). Logo, em sua maioria, bacias que drenam para o RCSB apresentam os valores máximos mais elevados em relação às bacias planalto interiorano. Para as bacias do RCSB as

taxas de SPI máximas variam entre 8,69 e 2,23, e nas bacias do planalto interiorano variam entre 4,65 e 1,03. Os valores mínimos também apresentam esta característica, tendo taxas mínimas mais elevadas para as bacias do RCSB, variando entre -5,55 e -11,96, enquanto que as bacias do planalto interiorano variam entre -2,92 e -7,86 (Figura 9). Ao comparar as taxas de SPI entre os pares de bacia apresentados na Figura 1, as bacias do RCSB apresentam valores mais elevados do que as bacias interioranas em todos os casos. Este comportamento aponta para um maior potencial erosivo nas bacias que drenam frentes escarpadas do que nas bacias situadas nos planaltos superiores com morfologia mais suave.

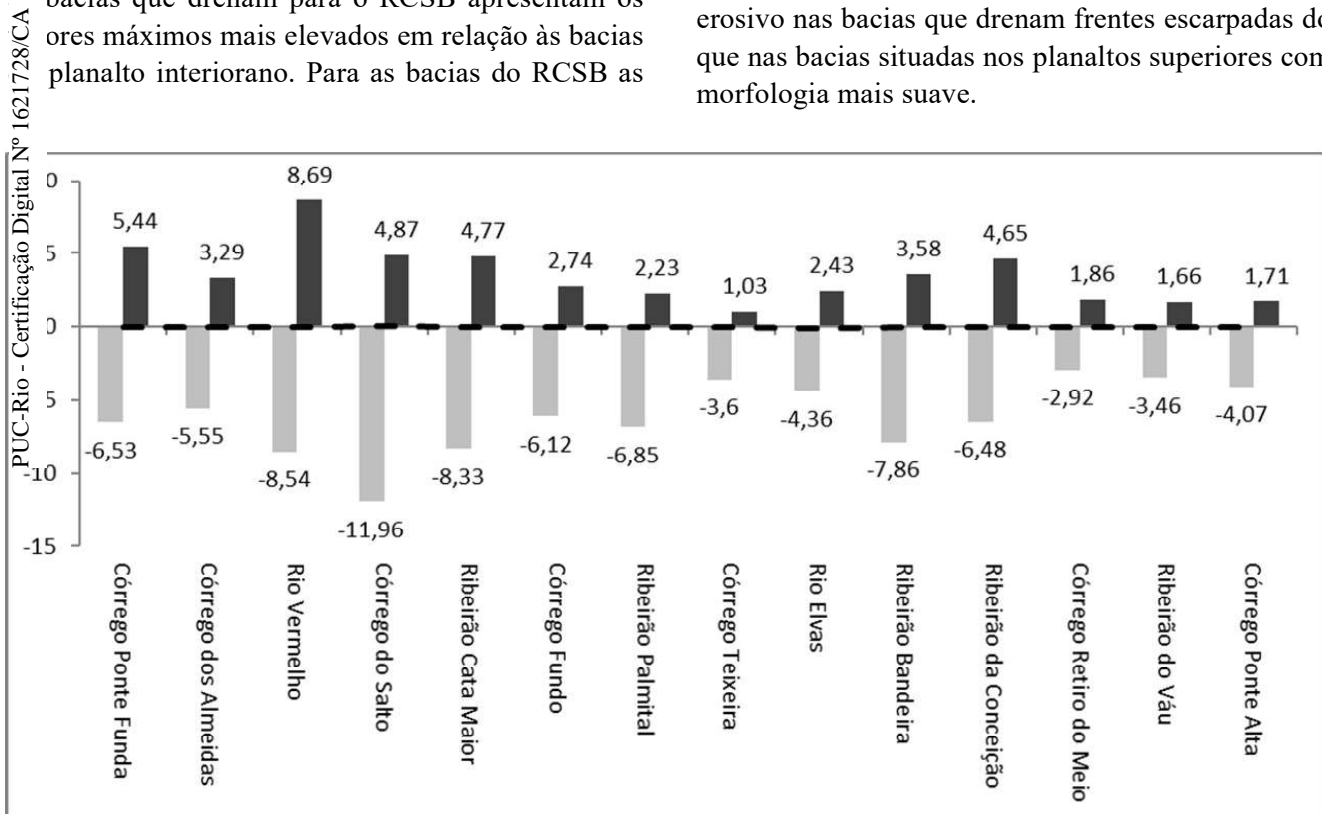


Figura 9 - Valores de Stream Power Index (SPI) das bacias estudadas. As 7 primeiras bacias da esquerda para direita drenam para o RCSB e as outras 7 drenam para o planalto interiorano. A barra preta indica valores máximos, a barra cinza os valores mínimos e a linha indica os valores médios para cada bacia.

Nota-se uma diminuição dos valores máximos de SPI para as bacias do RCSB de norte para sul, sendo o córrego Fundo e o ribeirão Palmital os valores mais baixos (Figura 9). Isto pode ser explicado através dos dados dos perfis longitudinais, uma vez que estes rios não apresentam rupturas significativas ao longo do perfil. Além disso, as cotas altimétricas destas bacias estão muito próximas dos seus pares interioranos, indicando que apesar de estarem associadas ao nível de base do graben, ainda apresentam morfologias relacionadas ao planalto interiorano. Logo, deduz-se uma expansão da frente de dissecação nesta região no sentido norte-sul.

Análise morfológica e integração dos resultados

Por sua vez, a análise da rede de drenagem demonstrou feições geomorfológicas típicas de anomalias, tais como cotovelos, e a ocorrência de capturas fluviais. Foram identificados divisores rebaixados entre as bacias analisadas que são caracterizados por divisores topográficos com aspecto plano, bem como, a presença de vales superdimensionados em cotas topográficas elevadas (Figura 10). Estas feições indicam processos de reorganização fluvial por meio de capturas de drenagem, que ao capturar rio adjacentes, promovem mudança na direção do segmento do rio, formando um cotovelo, bem como, a formação de um divisor rebaixado e um vale superdimensionado.

Na área de estudo, foram identificadas anomalias do tipo cotovelos de drenagem, prioritariamente, nas bacias que drenam para o RCSB, assim como, as feições de capturas fluviais (Figura 10). Ambas as feições se situam nas áreas próximas às cabeceiras e divisores, inseridas ou próximas, aos planaltos que foram incorporados pelas bacias do RCSB. Foram identificados vales superdimensionados – alvéolos – em todas as bacias, com exceção do ribeirão Retiro do Meio, que drenam para o planalto interiorano e próximos aos divisores com as bacias do RCSB. Já os divisores rebaixados foram identificados ao longo de todo o divisor hidrográfico da área de estudo, onde todos os pares de bacia apresentam esta morfologia em seus divisores (Figura 10). A partir da identificação e análise das feições morfológicas, foram delimitadas áreas que possivelmente foram capturadas e incorporadas às bacias afluentes do rio Paraibuna (Figura 11). Estas áreas constituíam as bacias interioranas e foram capturadas pelo maior poder erosivo das bacias que drenam o piso inferior do graben, principalmente pela diferença do nível de base

dos rios. Diante disso, pode-se perceber o recuo erosivo que estas bacias exercem sobre a escarpa da Serra da Mantiqueira e, consequentemente, capturam setores das bacias interioranas.

O conjunto de análises acima apresentadas aponta para o fato de que os afluentes da bacia hidrográfica do Rio Paraibuna apresentam maior agressividade no processo de dissecação do relevo do que aqueles que drenam as terras altas da Serra da Mantiqueira em direção ao Rio Grande. Este fato é comprovado não só pelos perfis topográficos (Figuras 4 e 5), mas também pelos valores de SPI (Figura 9), pela quantidade e densidade de *knickpoints* (Figura 6) e pelas feições morfológicas de reordenamento de drenagem identificados na área de estudo (Figura 10). Este processo independe do substrato litológico, pois ocorre tanto em áreas granítica-gnáissicas, quanto em áreas sustentadas pelos resistentes quartzitos (Figura 2).

As análises realizadas comprovam ainda que essa maior agressividade faz com que a escarpa e o degrau no relevo que marcam o limite da Bacia Hidrográfica do Paraná com a do Paraíba do Sul, recue em direção ao interior continental na área do limite entre o Rio Grande (principal formador do Rio Paraná) com o Rio Paraibuna. Este recuo explica a razão de partes consideráveis das bacias capturadas pelo rio Paraibuna, ainda apresentarem amplitudes de relevo e morfologia semelhante àquelas que drenam para o Rio Grande, garantidas ainda pelos *knickpoints* em forma de cachoeira já voltados para a escarpa da Serra da Mantiqueira (Figura 11).

Desta forma, pode-se afirmar que a área investigada possui comportamento erosivo e evolução do divisor hidrográfico muito semelhante ao encontrado nas áreas que lhes são adjacentes e que foram pesquisadas por Cherem *et al.* (2013) e Rezende *et al.* (2013), respectivamente bacias hidrográficas do Rio Pomba e do Rio Preto. Sendo assim, abre-se a necessidade de no futuro se investigar as semelhanças e diferenças entre esses três setores do escarpamento e do degrau no relevo que delimitam as bacias hidrográficas do Paraíba do Sul com Paraná. Afirma-se isso, pois essas semelhanças e diferenças tendem a refletir a evolução geomorfológica resultante da dinâmica tectônica dos blocos que compõe o RCSB, bem como podem ajudar a elucidar elementos da morfogênese deste importante elemento tectônico do sudeste brasileiro.

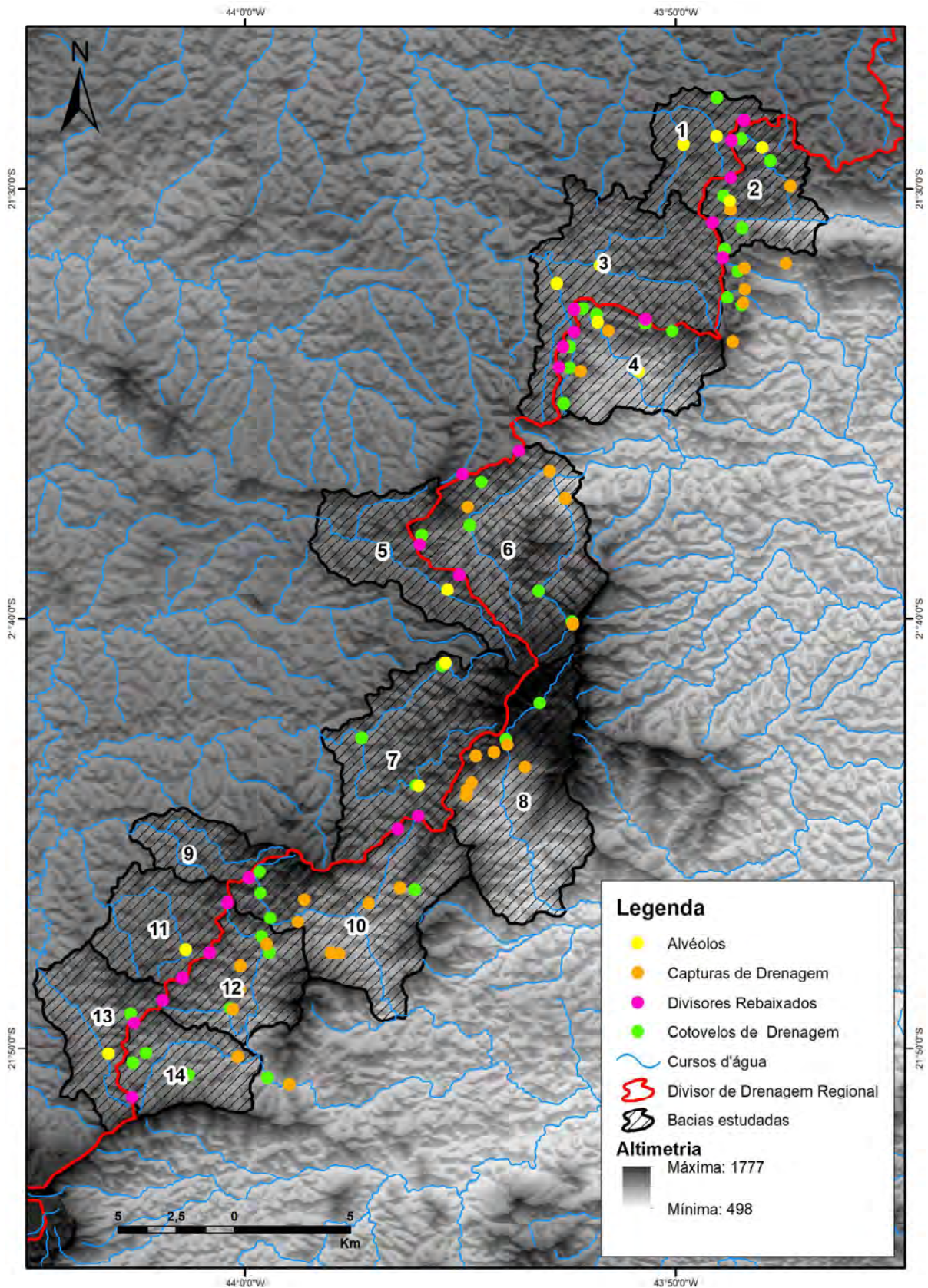


Figura 10 - Feições morfológicas de reordenamento dos sistemas de drenagem na borda oeste do RCSB. 1. Córrego do Teixeira; 2. Córrego Ponte Funda; 3. Rio das Elvas; 4. Ribeirão dos Almeidas; 5. Ribeirão Bandeira; 6. Rio Vermelho; 7. Ribeirão Conceição; 8. Córrego do Salto; 9. Ribeirão Retiro do Meio; 10. Ribeirão Cata Maior; 11. Ribeirão do Vau; 12. Córrego Fundo; 13. Córrego Ponte Funda; 14. Ribeirão Palmital.

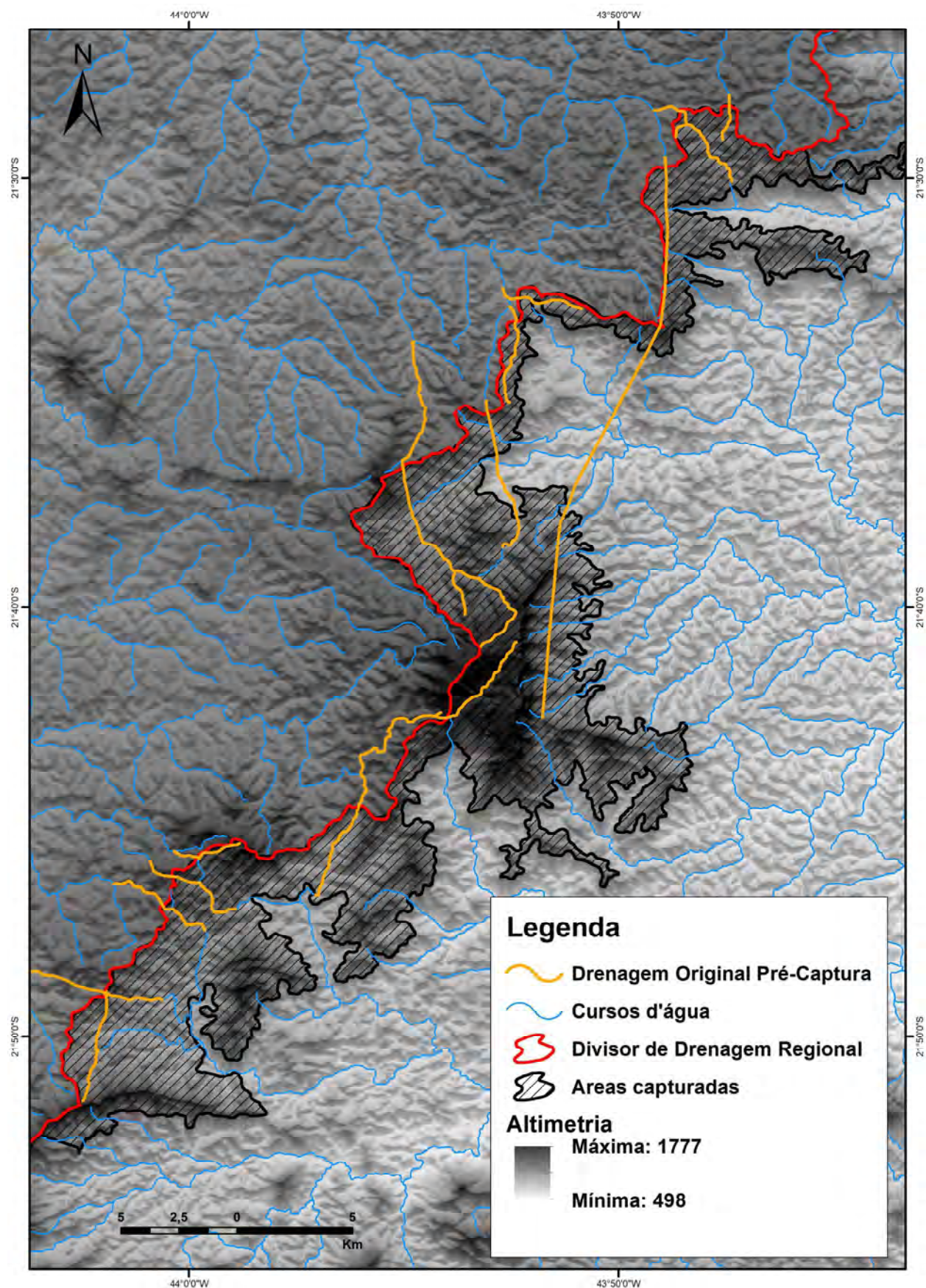


Figura 11 - Áreas planálticas capturadas pelos rios que drenam para o graben do Paraíba do Sul.

Considerações Finais

A análise dos perfis topográficos e longitudinais indicam que as bacias interioranas estão ajustadas aos níveis de base mais altos, tendo assim um relevo mais suave de baixa amplitude e sem rupturas abruptas nos eixos de drenagem. Já as bacias afluentes do rio Paraíba, voltadas para o RCSB, apresentam gradientes topográficos mais acentuados, devido ao nível de base mais rebaixado e seus divisores estarem localizados em porções suspensas a montante da escarpa da Serra da Mantiqueira. Estas características indicam morfologias de planaltos capturados pela frente erosiva das bacias voltadas ao RCSB, fazendo com áreas planálticas reorganizem seu sistema de drenagem para bacias adjacentes. Este comportamento é evidenciado pelos perfis longitudinais das bacias afluentes do rio Paraíba.

Soma-se a isso, os dados do índice RDE indicam maior densidade de *knickpoints* nas bacias do RCSB e, com isso, atribui maior controle litológico e/ou estrutural na evolução do relevo. As taxas de SPI demonstram maior potencial erosivo dos canais voltados para o RCSB, bem como, uma provável expansão da frente de dissecação nesta região no sentido de norte para sul.

Por fim, os cotovelos, os vales superdimensionados e as demais morfologias típicas de captura fluvial, indicam, indubitavelmente, que consideráveis áreas do planalto interior que drenavam para o Rio Grande foram capturadas por cursos fluviais que descem o degrau no relevo e se dirigem para o Rio Paraíba do Sul. Sendo assim, os resultados aqui apresentados, demonstram, assim como Rezende *et al.* (2015) e Cherem *et al.* (2012), processos de expansão da rede de drenagens sobre planaltos escalonados através de mecanismos de capturas de drenagem. Logo, a morfogênese do relevo na borda oeste do RCSB se deu a partir da reorganização da rede de drenagem em função da mudança de nível de base imposto pelo processo de rifteamento que induziu um input erosivo e iniciou o processo de dissecação ainda em andamento do antigo planalto por meio de erosão remontante e capturas fluviais.

Agradecimentos

Agradecemos ao Projeto CAPES COFECUB 869/15 pelo apoio.

Referências Bibliográficas

- AB'SABER, A. N. O problema das conexões antigas e da separação da drenagem do Paraíba e do Tietê. **Geomorfologia**. São Paulo, Instituto de Geografia da USP, p. 38-49. 1957.
- ASMUS, H.E. & FERRARI, A.L. **Hipótese sobre a causa do tectonismo cenozoico na região sudeste do Brasil**. *Projeto REMAC*, 4, p.75-88. 1978.
- BENTO, L. C. M.; RODRIGUES, S. C. Aspectos geológico-geomorfológicos do Parque Estadual do Ibitipoca/MG: base para o entendimento do seu geopatrimônio. **Sociedade. & Natureza**, Uberlândia, 25 (2): 379-394. 2013.
- BISHOP, P. Drainage rearrangement by river capture, beheading and diversion. **Progress in Physical Geography**, v.19, n.4, p.449-473.1995.
- CHEN, C. Y. & YU, F. C. Morphometric analysis of debris flow and their source area using GIS. **Geomorphology** 129, p. 387-397. 2011.
- CHEREM, L. F. S.; VARAJÃO, C. A. C.; BRAUCHER, R.; BOURLÉS, D.; SALGADO, A. A.; VARAJÃO, A. C. Long-term Evolution of Denudational Escarpments in Southeastern Brazil. **Geomorphology**. v. 173-4. p. 118-27. 2012.
- CHEREM, L. F. S.; VARAJÃO, C. A. C.; MAGALHÃES JÚNIOR, 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, p. 299-308, 2013.
- CHRISTOFOLETTI, A. Considerações sobre o nível de base, rupturas de declive, capturas fluviais e morfogênese do perfil longitudinal. **Geografia**, 2 (4), p. 81-102. 1977.
- DANIELSON, T. Utilizing a High Resolution Digital Elevation Model (DEM) to Develop a Stream Power Index (SPI) for the Gilmore Creek Watershed in Winona County, Minnesota. **Papers in Resource Analysis**. Volume 15, 11 pp. Saint Mary's University of Minnesota University Central Services Press. 2013.
- COMPANHIA MINERADORA DE MINAS GERAIS (CODEMIG); COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS (BRASIL). **Mapa geológico do estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte: CPRM, 2014.
- FERRARI, A.L. **Evolução tectônica do Gráben da Guanabara**. Tese (Doutorado), Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.p.412. 2001.

- HACK, J.T., 1973. Stream-Profile Analysis and Stream-Gradient Index. **US Geol. Surv. J. Res.** 1 (4), 421–429.
- HEILBRON, M., PEDROSA-SOARES, A. C., CAMPOS NETO, M. C., SILVA, L. C., TROUW, R.A.J.; JANASI, V. A., Província Mantiqueira. In: MANTESSO-NETO, V. BARTORELLI, A., CARNEIRO, C. D. R. e BRITO-NEVES, B. B., Orgs. **Geologia do Continente Sul-Americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida**. São Paulo, Ed. Beca, p.203-236. 2004
- HEILBRON, M.; MOHRIAK, W.; VALERIANO, C. M.; MILANI, E.; ALMEIDA J. C. H.; TUPINAMBÁ, M. From collision to extension: the roots of the south-eastern continental margin of Brazil. In: TALWANI & MOHRIAK (eds). **Atlantic Rifts and Continental Margins**. American Geophysical Union, Geophysical Monograph Series, 115:1-34. 2000.
- JENNESS, J. S. Calculating landscape surface area from digital elevation models. **Wildlife Society Bulletin** 32, 829-839. 2004.
- MARENT, B. R.; SALGADO, A. A. R.; SANTOS, L. J. C. Modelos de evolução do relevo de margens passivas em regiões com grande escarpamento. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.14, n.2, (Abr-Jun) p.235-240, 2013.
- NETO, R. M. O Horst da Mantiqueira Meridional: Proposta de Compartimentação Morfoestrutural para sua Porção Mineira. **Revista Brasileira de Geomorfologia**. São Paulo, v.18, n.3, (Jul-Set) p.561-577, 2017.
- OLIVEIRA, D. Capturas fluviais como evidências da evolução do relevo: Uma revisão bibliográfica. **Revista do Departamento de Geografia**, 20, 37-50. 2010.
- OLIVEIRA, C. S. **Estudo dos Geossistemas das Cristas Quartzíticas da Mantiqueira Meridional: A Paisagem em Perspectiva Multiescalar**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Juiz de Fora, Programa de Pós-Graduação em Geografia. 131p. 2016.
- QUEIROZ, G.L.; SALAMUNI, E.; NASCIMENTO, E.R. Knickpoint Finder: A software tool that improves neotectonic analysis. **Computers & Geosciences**, v. 76, p. 80-87, 2014.
- REZENDE, E. C.; SALGADO, A. A. R.; SILVA, J. R.; BOURLÈS, D.; BRAUCHER, R.; LÉANNI, L. Fatores Controladores da Evolução do Relevo no Flanco NNW do Rift Continental do Sudeste do Brasil: Uma Análise Baseada na Mensuração dos Processos Denudacionais de Longo-termo. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.14, n.2, (Abr-Jun) p.221-234, 2013.
- RICCOMINI, C.; SANT'ANNA, L. G.; FERRARI, A. L. Evolução geológica do Rift Continental do Sudeste do Brasil. In: MANTESSO-NETO, V.; BARTORELLI, A.; CARNEIRO, C. D. R.; BRITO NEVES, B. B. (Org.). **Geologia do Continente Sul-Americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida**. São Paulo: Beca, p. 383-405. 2004
- RICCOMINI, C.; GROHMANN, C. H.; SANT'ANNA, L. G.; HIRUMA, S. T. A Captura das Cabeceiras do Rio Tietê pelo Rio Paraíba do Sul. In: MONDENSEI-GAUTTIERI, M. C.; BARTORELLI, A. CARNEIRO, C. R. LISBOA, M. B. A. L. **A Obra de Aziz Nacib Ab'Sáber**. São Paulo: Beca-BALL edições, 2010.
- RILEY, S. J.; DEGLORIA, S. D.; ELLIOT, R. A Terrain Ruggedness Index that quantifies topographic heterogeneity. **Intermountain journal of sciences**, Vol. 5, Nº 1-4. 1999.
- SALAMUNI, E.; NASCIMENTO, E. R.; SILVA, P. A. H.; QUEIROZ, G. L. SILVA, G. Knickpoint Finder: ferramenta para a busca de geossítios de relevante interesse para o geoturismo. **Boletim Paranaense de Geociências**, v. 70, p. 200 – 208. 2013.
- SALGADO, A. A. R.; SOBRINHO, L.C.; CHEREM, L. F.; VARAJÃO, C.A. C.; VARAJÃO, C.A. C.; BOURLÈS, DIDIER L.; BRAUCHER, R.; MARENT, B. R. Estudo da evolução da escarpa entre as bacias do Doce/Paraná em Minas Gerais através da quantificação das taxas de desnudação. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 13, n. 2, p. 213-222, 2012.
- SALGADO, A. A. R., MARENT, B. R., CHEREM, L. F. S., BOURLÈS, D., SANTOS, L. J. C., BRAUCHER, R., BARRETO, H. N. Denudation and retreat of the Serra do Mar escarpment in southern Brazil derived from in situ-produced ¹⁰Be concentration in river sediment. **Earth Surface Process and Landforms** 39:311–319. 2014.
- SALGADO, A. A. R., REZENDE, E. A., BOURLÈS, D., BRAUCHER, R., DA SILVA, J. R., GARCIA, R. A., Relief evolution of the continental rift of Southeast Brazil revealed by in situ-produced ¹⁰Be concentrations in river-borne sediments. **Journal of South America Earth Science**. 67: 89–99. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2016.02.002>. 2016.
- SILVA, S. M. da. **Carstificação em rochas siliciclásticas: estudo de caso da Serra do Ibitipoca, MG**. 143 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Belo Horizonte, Belo Horizonte. 2004.
- SILVA, T. M.; MONTEIRO, H. S.; CRUZ, M. A.; MOURA, J. R. S. Anomalias de drenagem e evolução da paisagem no médio vale do rio Paraíba do Sul (RJ/SP). **Anuário do Instituto de Geociências (Rio de Janeiro)**, v. 29, p. 210-224. 2006.
- SILVA, T. M.; SANTOS, B. P. Sistemas de Drenagem e Evolução

- da Paisagem. **Revista Geogr. Acadêmica** v.4, n.1, 5-19. 2010.
- SORDI, M. V., SALGADO, A. A. R., PAISANI, J. C. Evolução do relevo em áreas de tríplex divisor de águas regional - o caso do Planalto de Santa Catarina: análise da rede hidrográfica. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, 16 (3):435–447. 2015a
- SORDI, M. V., SALGADO, A. A. R., PAISANI, J. C. Evolução do relevo em áreas de tríplex divisor de águas regional - o caso do Planalto de Santa Catarina: análise morfoestrutural. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, 16 (4):579–592. 2015b.
- SUMMERFIELD, M. A. **Global Geomorphology: An introduction to the Study of Landforms**. Longman Scientific & Technical, p.537.1991.
- VALENTE, A. S. M.; GARCIA, P. O.; SALIMENA, F. R. G.; OLIVEIRA-FILHO, A. T. Composição, estrutura e similaridade florística da Floresta Atlântica, na Serra Negra, Rio Preto-MG. **Rodriguésia**, v. 62, n. 2, p. 321-340. 2011.
- VALERIANO, M. M.; ROSSETTI, D. F. Topodata: Brazilian full coverage refinement of SRTM data. **Applied Geography**, v. 32, p.300-309, 2012.
- ZALÁN, P. V.; OLIVEIRA, J. A. B. Origem e evolução estrutural do Sistema de Riftes Cenozóicos do Sudeste do Brasil. **Boletim de Geociências Petrobras**, Rio de Janeiro, v. 13, n. 2, p. 269-300, maio/nov. 2005.
- ZHANG, H. Y.; SHI, Z. H.; GUO, M. H. Linking watershed geomorphic characteristics to sediment yield: Evidence from the Loess Plateau of China. **Geomorphology** 234, p. 19-27. 2015.

BACIAS ENDORREICAS E CAPTURA FLUVIAL NA MORFOGÊNESE DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARAÍBA DO SUL

ENDORHEIC CATCHMENTS AND FLUVIAL PIRACY IN THE MORPHOGENESIS OF THE PARAÍBA DO SUL BASIN

Rodrigo Wagner Paixão

Departamento de Geografia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro
Rua Marquês de São Vicente, 225, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. CEP: 22451-900. Brasil

E-mail: rodrigowpp1@gmail.com

André Augusto Rodrigues Salgado

Departamento de Geografia, Universidade Federal de Minas Gerais
Av. Antônio Carlos, 6627, Belo Horizonte, Minas Gerais. CEP 31270-901. Brasil

E-mail: geosalgado@yahoo.com.br

Marcelo Motta de Freitas

Departamento de Geografia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro
Rua Marquês de São Vicente, 225, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. CEP: 22451-900. Brasil

E-mail: marcelomotta@puc-rio.br

Julio Cesar Horta de Almeida

Faculdade de Geologia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro
Rua São Francisco Xavier, 524, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. CEP: 20550-900. Brasil

Email: jchalmeida@gmail.com

Resumo

O presente trabalho tem por objetivo investigar a evolução do sistema de drenagem do rio Paraíba do Sul no interior do Rift Continente do Sudeste do Brasil (RCSB) através da análise de parâmetros morfológicos e morfométricos. Neste sentido, foram analisados e extraídos informações do relevo e da rede fluvial em ambiente SIG, tais como, fator Chi (X), perfis Swath e Nprofile, para auxiliar os estudos de evolução do sistema de drenagem do rio Paraíba do Sul. Os perfis Swath evidenciam uma bacia hidrográfica morfológicamente construída graças a uma erosão remontante ainda muito distante de um perfil de equilíbrio. Os afluentes de sua porção jusante estão mais ajustados ao perfil do canal principal que os das partes montantes. Os resultados de Chi (X) demonstram um maior potencial erosivo dos afluentes que drenam para o rio Paraíba do Sul em relação às suas bacias adjacentes que fluem para o interior do continente. A análise dos resultados dos perfis normalizados permite inferir que não há correlação direta entre a distância da foz e o índice de C_T . Porém, no caso dos rios relativamente distantes da foz do rio Paraíba do Sul com elevados índices de C_T , há uma associação de sua foz localizarem-se junto a depósitos Eocenic. Neste sentido, pode-se inferir que a evolução do rio Paraíba do Sul se deu por meio de erosão remontante a partir de capturas fluviais sobre o planalto sudeste brasileiro. O sistema de capturas e o pulso erosivo do rio Paraíba do sul atingiu o divisor da Mantiqueira na porção norte primeiro, através do rio Pomba, e avançou sobre o planalto sudeste incorporando sistemas de drenagem endorréicos por meio de capturas de drenagem até configurar o sistema de drenagem atual. Embora não tenha sido possível datar esses eventos de pirataria fluvial, percebe-se que as bacias endorréicas capturadas permaneceram desconectadas do Oceano Atlântico até pelo menos o Terciário Superior ou mesmo até o início do Quaternário.

Palavras Chave: Índices Morfométricos; rio Paraíba do Sul/Brasil; Bacias Hidrográficas Endorréicas; Captura Fluvial.

Abstract

The use of morphometric parameters in geomorphological analyzes has been increasingly common, once it contribute, through quantitative data, to analyze processes

of relief evolution and drainage systems. Morphometric analyzes shows river catches mechanisms and, thus, can establish geomorphological processes in watersheds. The present work aims to investigate the evolution of the Paraíba do Sul river drainage system within the Brazilian Southeast Continental Rift through the analysis of morphological and morphometric parameters. To assist the evolution studies of the Paraíba do Sul river drainage system, it was analyzed and extracted relief and river network information in GIS environment, such as Chi (X) factor, Swath and Nprofile profiles. Swath shows a morphologically constructed watershed thanks to a reassembling erosion still far from an equilibrium profile. The downstream portion tributaries are much more adjusted to the main channel profile than those of the upstream portions. The Chi (X) results shows greater erosion potential of the tributaries that drain to the Paraíba do Sul river in relation to its adjacent basins that flow into the interior of the plateau. The analysis of the normalized profiles allows us to infer that there is no direct correlation between the mouth distance and the CT index. However, in the case of rivers that are relatively distant from the Paraíba do Sul river mouth with high CT rates - D9, D10 and E12. There is an association of their mouths located near Eocene deposits. In this sense, it can be inferred that the evolution of the Paraíba do Sul river occurred through reassembly erosion from river catches on the Brazilian southeastern plateau. The catch system and the erosive pulse of the Paraíba do sul river reached the Mantiqueira divider in the northern portion first, across the Pomba River, and advanced over the southeastern plateau incorporating endorheic drainage systems through drainage captures until the system was set up. current drainage. Although it was not possible to date these river piracy events, it is clear that the captured endorheic basins remained disconnected from the Atlantic Ocean until at least the Upper Tertiary or even early Quaternary.

Keywords: Morphometric Index; Paraíba do Sul river/Brazil; Endorheic catchments; Fluvial capture.

Introdução

Mecanismos de capturas fluviais são fundamentais para a evolução dos sistemas de drenagem e para a morfogênese do relevo. O processo de captura fluvial em escarpamentos de margem passiva está muito associado ao nível de base dos oceanos que por ser muito mais baixo que os continentais no reverso da escarpa, promove input erosivo nas bacias costeiras reordenamento os sistemas fluviais e permitindo a migração dos divisores hidrográficos para o interior do continente (SUMMERFIELD, 1991; BISHOP, 1995). Este processo ocorreu ao longo de boa parte da margem passiva do oceano atlântico, como no caso dos Appalaches (GALLEN & WEGMANN, 2015;), na bacia do rio Douro (STRUTH *et al.*, 2019) e na Namibia (BIERMANN & CAFFEE, 2001).

Apesar do processo acima descrito ser fundamental para a evolução geomorfológica da rede de drenagem das margens passivas, na de clima tropical úmido da América do Sul ainda são poucos e, salvo exceções, recentes os estudos que investigaram a importância da pirataria fluvial para a evolução da rede de drenagem, para a regressão das escarpas e para a morfogênese regional (AB'SABER, 1957; CHEREM *et al.*, 2012; REZENDE *et al.*, 2013; SALGADO *et al.*, 2014, 2016; SORDI *et al.*, 2018). Paralelamente, o tema nessa região é complexo, pois parte dessa margem passiva esteve submetida a proeminentes episódios tectônicos durante o Terciário que acarretaram a formação de um rifte, o Rifte Continental do Sudeste do Brasil (RCSB), que não progrediu até a completa ruptura (HEILBRON *et al.*, 2000; RICCOMINI *et al.*, 2004; RICCOMINI *et al.* 2010, 1989; ZÁLAN & OLIVEIRA, 2005). Além disso, sistemas de rifte como esse tendem a formar redes hidrográficas endorréicas e no Sudeste do Brasil, talvez graças ao seu clima tropical úmido, este tema – endorreísmo fluvial – nunca foi profundamente investigado. Deste modo, é notável a ausência de estudos científicos que investiguem a evolução da rede de drenagem da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul que está instalada no interior do RCSB e apresenta uma série de anomalias em sua configuração.

Diante do acima apresentado, o presente trabalho tem por objetivo investigar a evolução do sistema de drenagem do rio Paraíba do Sul no interior do RCSB através da análise de parâmetros morfológicos e morfométricos. Neste sentido, foram analisados e extraídos informações do relevo e da rede fluvial em ambiente SIG, tais como, fator Chi (X) e Nprofile, para auxiliar os estudos de evolução do sistema de drenagem do rio Paraíba do Sul.

Área de Estudo

A área de estudo compreende toda a bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul que está situada na região sudeste do Brasil (Figura 1), porém dá ênfase às suas porções média e baixa. O rio Paraíba do Sul possui aproximadamente 1.100km de extensão entre a nascente e a foz e, em sua maior parte, flui por um planalto mamelonar que constitui o piso de um conjunto de grabens que formam o RBSB. De modo geral seus afluentes estão localizados nas proeminentes escarpas de um dos dois horts: (1) o oriental constituído pela Serra do Mar que alcança quase 2.300 metros de altitude e; (2) o ocidental formado pela Serra da Mantiqueira com picos de mais de 2700 metros de altitude. A configuração do RCSB se deu principalmente entre 60 e 35 Ma, mas há indícios de atividade tectônica pelo menos até a passagem entre o Neógeno e o Quaternário (RICCOMINI *et al.*, 2004; SANTOS *et al.*, 2006; SALGADO *et al.*, 20016).

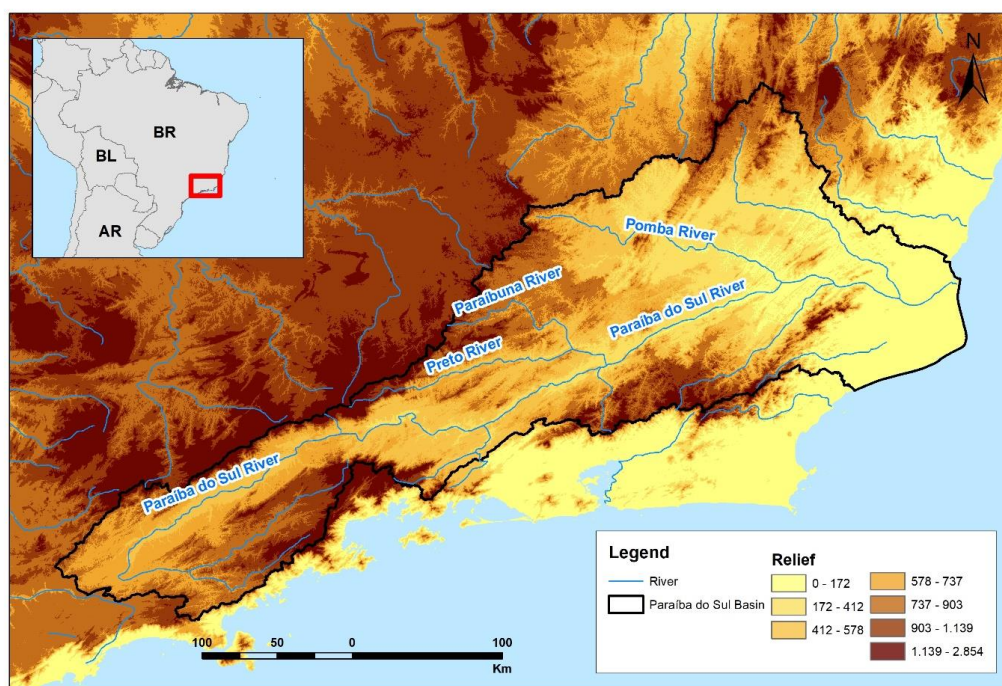


Figura 1. Contexto regional da bacia do rio Paraíba do Sul no planalto sudeste do Brasil.

Em termos geológicos a área de estudo está inserida na Província Mantiqueira que representa uma entidade geotectônica originada durante a Orogênese Brasileira/Pan-

Africana no Neoproterozoico, cuja estabilização desempenhou importante papel na aglutinação deste setor do Gondwana (HEILBRON *et al.* 2004). Seu substrato geológico é complexo, mas pode ser basicamente resumido em granulitos e gnaisses de alto grau metamórfico, orto e paraderivados, com foliação principal alinhada de NE a SW, entremeados por granitos pre, sin e pós tectônicos. As estruturas de falhas inversas, zonas de cisalhamentos e deformações dúcteis acompanham a orientação da foliação em seus eixos principais, registrando as diversas fases de deformação durante a orogenia (HEILBRON *et al.* 2000, 2004). O RCSB apresenta suas formações sedimentares associadas aos depocentros dos sistemas conjugados dos diversos grabens, sendo que a deposição desses sedimentos se estendeu provavelmente até o fim do Mioceno (RAMOS *et al.* 2006; AMADOR, 2012).

Em termos climáticos, a Serra do Mar e a Serra da Mantiqueira abrandam o caráter tropical do clima e favorecem a chuva orográfica (SANT'ANNA NETO, 2005) que alcança quase os 2.500 mm na região mais elevada da área de estudo. Embora a pluviosidade seja concentrada nos meses de primavera e verão do hemisfério sul, não há propriamente uma estação seca. Isto favoreceu a instalação de uma floresta tropical densa, a Mata Atlântica, sendo que nas regiões mais elevadas essa floresta se adapta até se transformar em um conjunto de campos arbustais de altitude. Alguns trabalhos abordam o paleoclima da região, apontando para um período ainda durante o Holoceno mais seco e frio que o atual (MELO & MARENGO, 2008).

Procedimentos Metodológicos

Utilizou-se como base para a realização do trabalho o levantamento de informações bibliográficas, análises em ambiente SIG, trabalhos de campo e elaboração de mapas. Os procedimentos para extração dos dados morfométricos foram realizados com o software *ArcGIS* 10.1 que também foi utilizado na elaboração dos produtos cartográficos.

Os procedimentos para os mapeamentos foram elaborados a partir da base cartográfica do IBGE na escala de 1:50.000. As cartas topográficas foram utilizadas na delimitação das bacias hidrográficas e ajudaram no reconhecimento das anomalias de drenagem. Deu-se especial atenção para as feições morfológicas relacionadas a processos de reorganização de sistemas de drenagem e evolução do relevo, tais como: divisores

rebaixados, cotovelos de drenagem, cursos fluviais com sentido invertido ao do restante da bacia hidrográfica e vales superdimensionados.

Além da base cartográfica do IBGE, foram usadas imagens de radar SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) do projeto TOPODATA (VALERIANO & ROSSETI, 2012). A partir da imagem SRTM foram extraídas informações altimétricas e derivados dados morfológicos, como: anomalias de drenagem, lineamentos estruturais, perfis topográficos, paleodivisores, dentre outros.

Para análise morfométricas, foram traçados três perfis topográficos ao longo do divisor do rio Paraíba do Sul na porção noroeste utilizando a ferramenta *Swath Profile* através do *ArcGis* 10.1 que gera perfis com os valores máximos, médios e mínimos ao longo de uma janela predefinida (PÉREZ-PEÑA *et al.*, 2017). Os perfis foram elaborados para melhor compreensão da morfologia do relevo ao longo do divisor, bem como, comparar a amplitude de relevo na região. Outro parâmetro morfométricos utilizado foi a quantificação dos valores de Chi (X) ao longo do mesmo divisor dos perfis elaborados (WILLET *et al.*, 2014; SORDI *et al.*, 2018). O fator Chi (X) avalia o potencial erosivo dos rios e a migração de divisores hidrográficos, sendo uma ferramenta bastante útil para analisar a evolução dos sistemas de drenagem em margens passivas.

Foram extraídos perfis longitudinais de drenagem normalizados de rios afluentes do rio Paraíba do Sul e obtidos seus índices de concavidade (*Concavity Index*). Estas informações foram geradas a partir da utilização da Ferramenta NProfile que cria perfis normalizados de drenagens e calcula o índice de concavidade (C_T) da drenagem a partir da morfologia do perfil longitudinal (PÉREZ-PEÑA *et al.*, 2017). Além disso, indica o máximo de concavidade (C_{max}) e atribui um valor de distância entre o C_{max} e a cabeceira do afluente (dL). De maneira geral, os perfis longitudinais em condições de equilíbrio apresentam feição côncava para cima, demonstrando o ajuste estabelecido pela denudação e remodelamento do relevo (PÉREZ-PEÑA *et al.*, 2017). Em alguns casos, os perfis das drenagens podem apresentar pontos de inflexão, conhecidos como *knickpoints*, que alteram a morfologia côncava do mesmo (BURBANK & ANDERSON, 2013). As drenagens que apresentam valores de C_T elevados nos perfis normalizados, tendem a ser mais dissecadas e próximas do perfil de equilíbrio. A tendência é que as drenagens mais distantes da foz do rio principal apresentem valores de C_T menores, enquanto os rios próximos à foz possuem valores maiores.

Resultados e Discussões

Swath Profiles

A análise dos perfis topográficos, com os valores máximos e mínimos do relevo, possibilitou inferir o grau de dissecação da paisagem e, com isso, estabelecer áreas com maior ou menor potencial erosivo. Neste sentido, foram traçados três perfis topográficos ao longo do divisor do rio Paraíba do Sul, sendo um no divisor com o rio Doce e dois no divisor com o rio Grande (Principal formador do rio Paraná) (Figura 2).

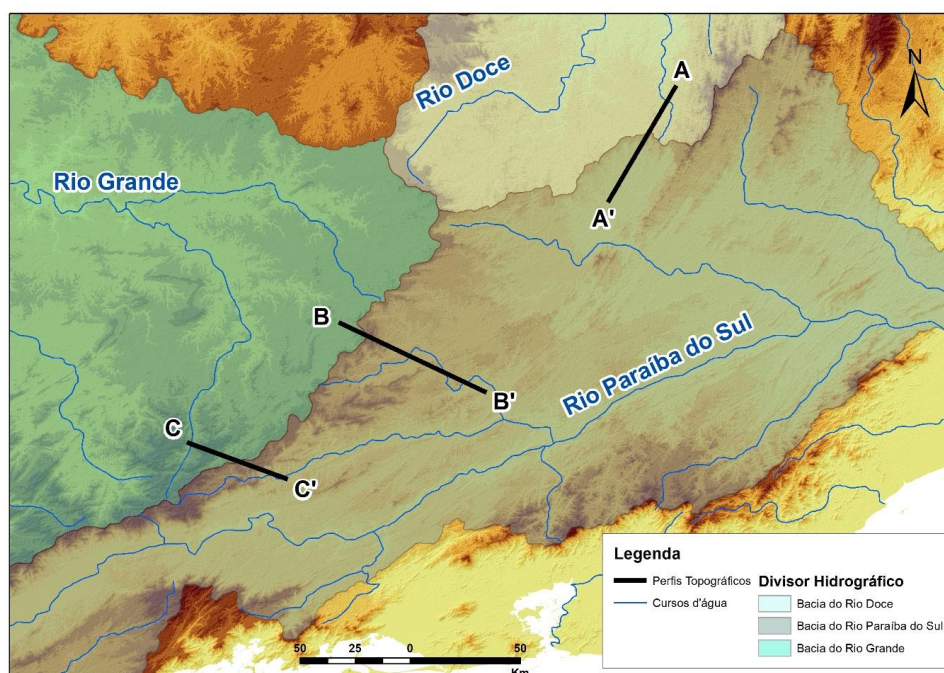


Figura 2: Localização geográfica dos perfis topográficos traçados ao longo da Serra da Mantiqueira. Perfil A - A' divisor Paraíba do Sul - Doce; Perfis B - B' e C - C' no divisor Paraíba do Sul - Grande.

O perfil A-A' situa-se mais a nordeste em relação aos demais. Situa-se no divisor do rio Pombo com o rio Doce e apresenta drenagens sobre morfologias planálticas na porção do rio Doce, podendo atingir 200m de amplitude, enquanto que as drenagens afluentes do rio Pombo drenam a frente escarpada da Serra da Mantiqueira e o degrau inferior até o rio Paraíba do Sul. A diferença do divisor topográfico entre a porção dos afluentes do rio Doce e os do rio Pombo pode atingir até 400m de altitude e promove a ocorrência de uma morfologia escarpada ao longo do divisor das bacias (Figura 3).

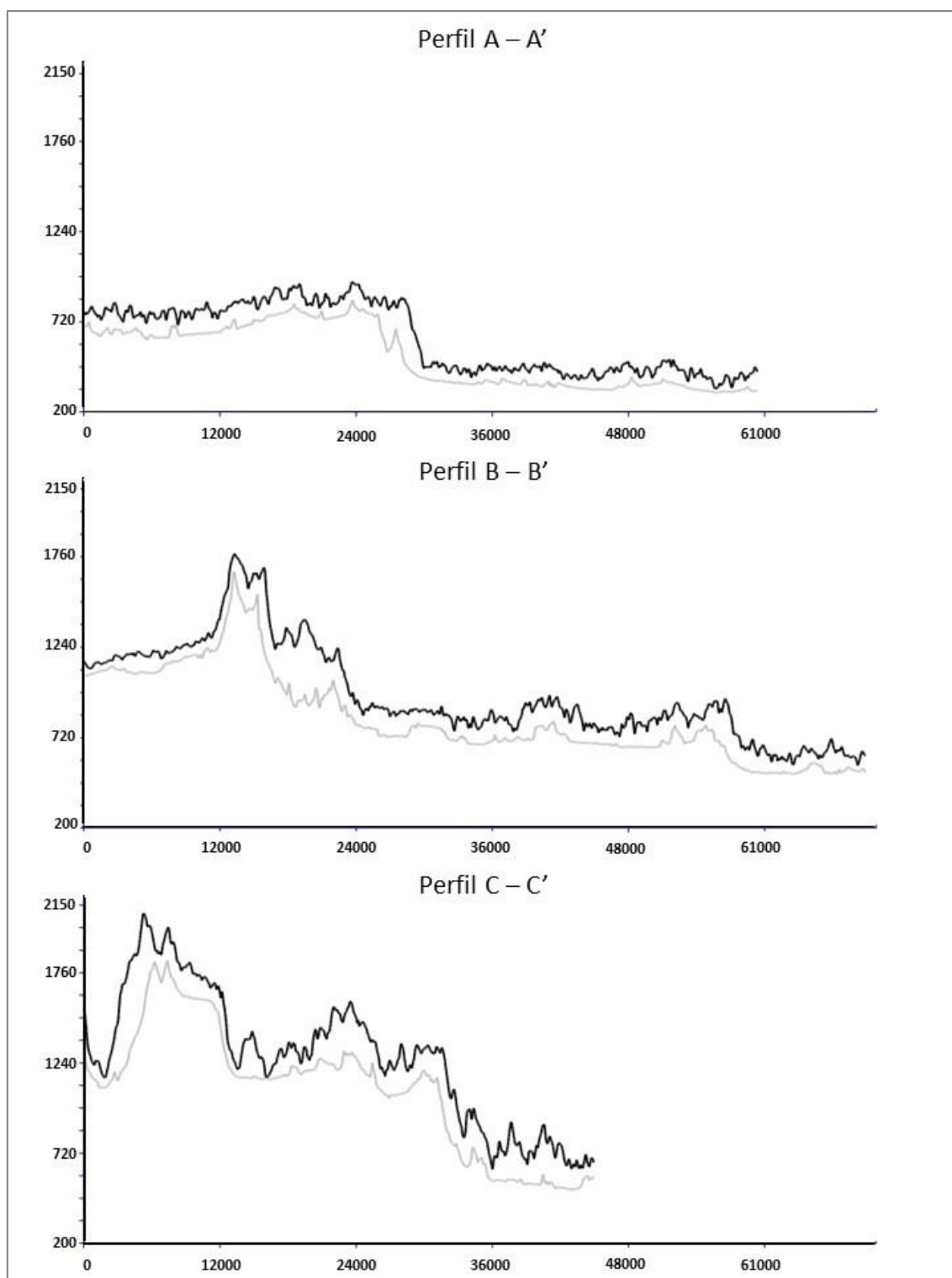


Figura 3: *Swath Profiles* elaborados ao longo da Serra da Mantiqueira. Linha preta indica os valores máximos e linha cinza indica valores mínimos de altitude. Perfil A - A' divisor Paraíba do Sul - Doce; Perfis B - B' e C - C' no divisor Paraíba do Sul - Grande.

O perfil B - B' encontra-se na Serra da Mantiqueira que constitui o divisor entre o rio Paraibuna (afluente do rio Paraíba do Sul) e do rio das Mortes (afluente do rio Grande).

Sua topografia atinge um máximo de 1.700m e um mínimo de 540m de altitude. As drenagens associadas aos afluentes do rio Grande situam-se no degrau superior, variando entre 1200m e 1.000m, enquanto que os afluentes do rio Paraíba do Sul drenam sobre o piso inferior entre 700m e 900m de altitude. A amplitude de relevo entre as bacias hidrográficas é de aproximadamente 300m sendo, portanto, menor que no perfil A - A'. Além disso, o piso inferior dos afluentes que drenam a frente escarpada em direção ao RCSB encontra-se em patamar topográfico mais elevado que os afluentes do rio Pomba, como demonstra o perfil A - A'. Ainda assim, o divisor topográfico apresenta morfologia escarpada.

Já o perfil C - C' está associado aos afluentes do rio Grande que escoam para o interior do continente e aos do rio Preto que drenam para o piso inferior RCSB. Este perfil apresenta as maiores elevações, podendo atingir 2180m de altitude no compartimento do rio Grande. Porém, os vales das drenagens afluentes ao rio Grande estão situados entre 1.200m e 1.400m de altitude. O mesmo ocorre com os rios que drenam para o rio Preto que apresentam altitudes semelhantes aos da sua bacia opositora.

Neste sentido, pode-se dizer que ocorre um comportamento topográfico nas bacias hidrográficas afluentes do rio Paraíba do Sul, onde a altitude média das mesmas aumenta de nordeste para sudoeste (figuras 2 e 3). Este comportamento é evidenciado pelos perfis topográficos, no qual pode ser segmentado em: degrau inferior do rio Pomba (300m - 400m); degrau intermediário do rio Paraíba do Sul (700m - 900m); e degrau superior do rio Preto (1.100m - 1400m). Deste modo é possível perceber um maior desgaste erosivo na porção nordeste deste divisor, onde o nível topográfico do piso do rio Paraíba do Sul atinge 200m de altitude. Os perfis B-B' e C-C' apresentam altitudes mais elevadas e indicam que o pulso erosivo do rio Paraíba do Sul ainda está avançando sobre estas áreas com bastante intensidade. Esta característica evidencia uma bacia hidrográfica morfológicamente construída graças a uma erosão remontante ainda muito distante de um perfil de equilíbrio. Os afluentes de sua porção jusante estão muito mais ajustados ao perfil do canal principal que os das partes montantes. A intensidade de ocorrência desse fenômeno significa que a evolução da Bacia Hidrográfica do Paraíba do Sul se insere em uma dessas três condições: (1) Toda a região foi submetida a um forte pulso neotectônico e a rede de drenagem ainda está se ajustando a este soerguimento generalizado; (2) Há uma coincidência na ocorrência das litoestruturas onde rochas muito resistentes frente à erosão se localizam mais a montante, rochas médias na porção intermediária e frágeis na porção jusante ou; (3) a bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul foi estruturada graças a

pulsos energéticos advindos de capturas fluviais que, no caso, incorporam bacias hidrográficas endorréicas, uma após outra, de jusante para montante.

Os resultados combinados de Hiruma et al. (2001, 2010) e Rezende et al. (2013) não coadunam com a primeira opção de uma neotectônica mais ativa no Terciário Superior e no Quaternário. Pelo contrário: apontam para uma tendência de diminuição da atividade tectônica desde o Terciário Superior fato que teria permitido um equilíbrio maior aos perfis fluviais. Paralelamente, a geologia da região não possibilita que uma erosão diferencial controlada pela litoestrutura explique esse comportamento, pois toda a região apresenta rochas muito semelhantes. Deste modo, por eliminação, abre-se perspectiva para a terceira possibilidade: capturas fluviais de bacias endorréicas que estavam estabelecidas no interior dos grabens do RCSB. De fato, os grabens existem na área de estudo (COSTA, 1999; RICCOMINI *et al.*, 2004; SANTOS *et al.*, 2006) e estas são zonas que, em situações de pronunciado rifteamento, no auge da atividade, tendem a impor ocorrência de drenagens endorréicas. Porém, com a estabilização do processo de subsidência, a rede de drenagem endorréica tende a se tornar exorréica. Principalmente em regiões como a área de estudo, ou seja, ainda soerguidas em relação ao nível marinho e submetidas a climas úmidos. Logo, a novidade dos resultados não está na existência de paleobacias endorréicas controladas tectonicamente no RCSB, mas sim no fato de que essas bacias hidrográficas devem ter persistido na paisagem até tempos relativamente recentes (Terciário Superior/Quaternário).

Fator Chi (X)

Os valores de Chi (X) representam a diferença de agressividade erosiva entre as cabeceiras de drenagem voltadas para diferentes bacias hidrográficas ao longo de um mesmo interflúvio. Neste parâmetro os valores mais baixos são representados por cores mais frias e quanto menores eles forem, mais agressiva tende a ser bacia hidrográfica na região do interflúvio.

Ao longo da Serra da Mantiqueira as bacias hidrográficas investigadas apresentaram diferenças significativas em seus valores de Chi (X) sendo possível perceber que, de maneira geral, o nível de base local mais elevado determinou os maiores índices. De fato, foram realizadas três análises de valores de Chi (X) nas mesmas regiões onde foram traçados os perfis de *Swath Profile*: divisor rio Pomba e rio Doce; rio Paraíbuna e rio Grande; rio Preto e rio Grande (Figura 2). Estes valores variaram entre os divisores, sendo essa variação mais significativa para o interflúvio entre o rio Preto e o

rio Grande, situado mais ao sudoeste, e a menor entre o rio Pomba e o rio Doce, mais a nordeste. Vale ressaltar que os valores de Chi (X) para os divisores do rio Pomba e o rio Doce apresentaram valores muito próximos a 1,0. Entretanto, mesmo nesse caso, as vertentes voltadas para o rio Pomba apresentam índices inferiores aos de sua bacia adjacente (Figura 4a), pois nela variam entre 0.6 e 1.2, enquanto que para as do rio Doce estão entre 0.8 e 1.4. Entretanto, em um trecho desse interflúvio as vertentes voltadas para a bacia hidrográfica do rio Doce apresentaram valores inferiores de Chi (X) em relação às do rio Pomba (Figura 4 a). Isto ocorre justamente onde Cherem et al. (2012) identificaram um processo de captura fluvial.

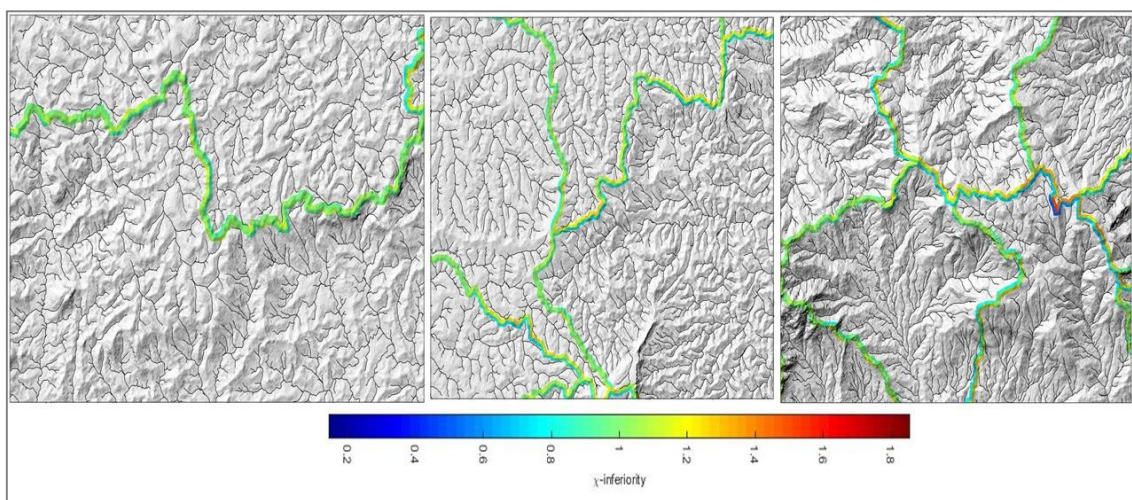


Figura 4: Valores de Chi (X) ao longo do divisor da Serra da Mantiqueira do rio Paraíba do Sul.

Para o interflúvio entre o rio Paraibuna e o Grande a diferença entre os valores de Chi (X) são maiores se comparados ao caso anterior. Apesar disso, as características são semelhantes, com os menores valores associados ao Paraibuna que é o afluente do rio Paraíba do Sul, onde variam entre 0.4 e 1.0, enquanto que para a bacia do rio Grande circulam entre 1.0 e 1.4 (Figura 4b). Já o Chi (X) no divisor entre o rio Preto e o Grande apresenta as maiores diferenças entre os interflúvios analisados, com as vertentes voltadas para o rio Paraíba do Sul circulando entre 0.2 e 0.8 e as para o rio Grande entre 1.2 e 1.6 (Figura 4c).

Em claro acordo com as taxas de denudação mensuradas por Cherem *et al.* (2012) e Salgado *et al.* (2016) para essas mesmas áreas, os resultados de Chi (X) demonstram um maior potencial erosivo dos afluentes que drenam para o rio Paraíba do Sul em relação

às suas bacias adjacentes que fluem para o interior do planalto. A semelhança entre os valores de Chi (X) para o divisor do rio Pomba e do rio Doce indicam que aquela porção se encontra em estágio mais próximo do equilíbrio. Já os valores de Chi (X) para os outros dois divisores indicam um maior desequilíbrio, ou seja, o recuo erosivo do interflúvio em favor da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul é muito mais proeminente. Este comportamento é mais evidenciado no divisor mais à montante, ou seja, aquele entre o rio Preto e o rio Grande. Isto confirma os resultados obtidos através da análise do *Swath Profile* onde é possível perceber que a porção média e montante da área de estudo na Bacia Hidrográfica do rio Paraíba do Sul estão muito mais distantes de um perfil de equilíbrio em termos de erosão do que a do rio Pomba. Neste sentido, confirma-se que o pulso erosivo do rio Paraíba do Sul ocorreu de maneira remontante sobre o planalto sudeste do Brasil e no sentido de nordeste para sudoeste ao longo do divisor da Serra da Mantiqueira. Sendo assim, o pulso erosivo alcançou o interflúvio nordeste antes do divisor do rio Preto na porção sudoeste e, com isso, os valores de Chi (X) refletem este processo. Na porção nordeste, o processo já estabilizou ao longo do tempo, mas ainda está evidente na porção sudeste por ter atingido esta região mais recentemente. Como já dito, as morfologias dos perfis de *Swath Profile* contribuem para esta análise, uma vez que a porção nordeste já rebaixou significativamente o degrau inferior do Paraíba do Sul, enquanto que nas porções mais a sudoeste, ainda podem ser identificados planaltos relictos para serem dissecados.

NProfile

A análise dos perfis longitudinais de normalização auxilia no entendimento do grau de dissecação do relevo pelos índices de concavidade apresentados pelas drenagens. Valores elevados do índice de concavidade indicam, em sua maioria, drenagens mais ajustadas ao nível de base local e um perfil mais próximo do normal. Já valores mais baixos indicam que as drenagens ainda estão em estágio de ajuste ao nível de base. A Figura 5 apresenta a localização das drenagens nas quais foram extraídos os perfis longitudinais de normalização. Estes foram diferenciados entre afluentes da margem direita e esquerda para facilitar a identificação dos canais (Figura 5).

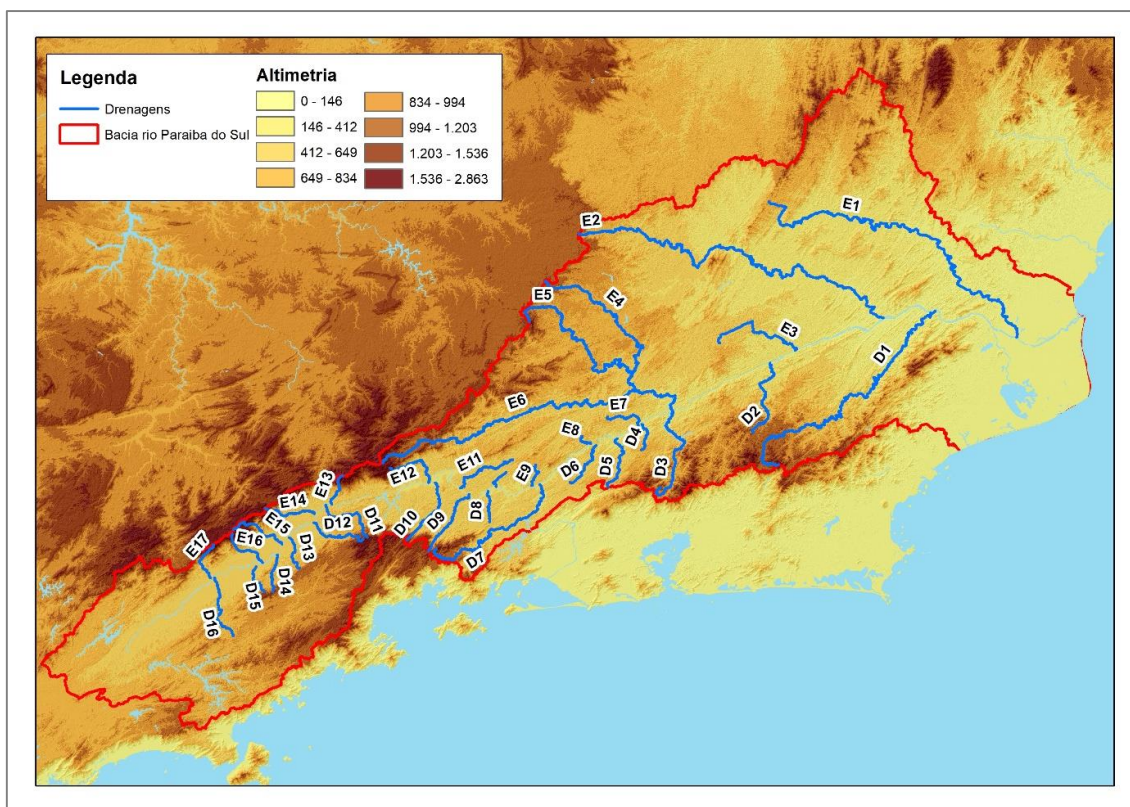


Figura 5: Mapa de Localização dos rios analisados pela ferramenta NProfile.

De maneira geral, os cursos fluviais tendem a apresentar índices de concavidade mais altos próximos à foz, demonstrando uma diminuição destes conforme os afluentes situam-se mais à montante. Contudo, percebe-se que alguns afluentes do rio Paraíba do Sul, apresentam altas taxas de concavidade mesmo estando localizados distantes da foz (Tabela 1).

As drenagens afluentes do rio Paraíba do Sul que apresentam os valores mais elevados de C_T são, respectivamente: D9 (80,7%), D10 (80,1%), E14 (78,6%) e E12 (75,6%). Já as drenagens que apresentam os menores valores são: D6 (-12,8%) na margem direita e E3 (8,2%) na margem esquerda. Pode-se inferir que não houve diferença significativa entre os valores de C_T , C_{max} e dL entre as drenagens situadas em margens opostas. Além disso, os valores de C_T não apresentam correlação direta com a distância da foz dos afluentes do rio Paraíba do Sul. Ao analisar os dados da tabela, pode-se dizer que os afluentes mais próximos à foz do rio Paraíba do Sul apresentam valores de C_T elevados, como apresentam os rios D1 (58,7%), E1 (67,7%). Apesar disso, nota-se que alguns afluentes mais distantes da foz apresentam valores de C_T ainda maiores, como no caso dos rios D9, D10 D11 e D15 para a margem direita; e E12, E 14 e E16.

Os perfis normalizados dos afluentes do rio Paraíba do Sul, em sua maioria, apresentam feições côncavas para cima e abaixo da linha normal do perfil, com exceção do rio Angú (D6) que é convexo e negativo em termos de C_T (figuras 6 e 7). Este comportamento pode ser explicado pela topografia mais elevada no alto curso deste rio o que promove uma ruptura de declive no perfil longitudinal do mesmo. Esta característica também pode explicar a presença de trechos de perfil convexos (acima da linha normalizada) em outros afluentes do rio Paraíba do Sul, como no caso dos rios E3, E9 e E15 (figuras 6 e 7). Os valores de C_T nestes afluentes são considerados baixos quando comparados com os outros e, além disso, são relativamente menores em extensão.

A análise dos resultados dos perfis normalizados permite inferir que não há correlação direta entre a distância da foz e o índice de C_T . Porém, no caso dos rios relativamente distantes da foz do rio Paraíba do Sul com elevados índices de C_T - D9, D10 e E12 – há uma associação de sua foz localizarem-se junto a depósitos Eocenic das bacias de Volta Redonda e Resende. Estes depósitos correspondem a materiais fluviais e lacustres no interior de grabens continentais. Neste sentido, pode-se dizer que estes rios estão ajustados a este nível de base local há muito tempo e, por isso, apresentam valores elevados de C_T . Esta característica corrobora com a hipótese de evolução da Bacia Hidrográfica do rio Paraíba do Sul ter se estruturado através da incorporação de bacias hidrográficas endorréicas ao sistema atlântico. Bacias hidrográficas essas que permaneceram na paisagem até recentemente, pois caso contrário o perfil normalizado dos cursos fluviais que nela desembocam não iria mais apresentar índices de C_T tão elevados. Ou seja, as grandes concavidades tão distantes da foz do rio Paraíba do Sul só se explicam por níveis de base interiores extremamente estáveis e que só recentemente foram rompidos. Logo, a associação de depósitos sedimentares no interior do planalto sudeste, tais como, Volta Redonda, Resende e Taubaté, e o fenômeno de elevado índice de C_T melhor se explica por meio de sistemas endorréicos de drenagem estáveis formados nos grabens tectônicos que, apenas bem posteriormente, foram incorporados ao sistema atlântico pela erosão remontante do rio Paraíba do Sul que as capturou. Além destas bacias, também são conhecidos outros sistemas de grabens na região, como no caso do gráben de Itaocara (TUPINAMBÁ, 2003) e o do rio dos Bagres no rio Pomba (OLIVEIRA, 2018). Acredita-se que a maior parte dos depósitos sedimentares destes grabens já foram erodidos pelo pulso erosivo do rio Paraíba do Sul quando estes foram incorporados ao nível de base atlântico, restando apenas testemunhos a montante de Volta Redonda. Além disso, a alta capacidade do rio Paraíba do Sul em incorporar extensas

áreas à montante já foi comprovada na captura do Guararema (AB'SABER, 1957) que representa todo seu mais alto curso.

Tabela 1. Valores de Índice de Concavidade, Cmax e dL das drenagens afluentes do rio Paraíba do Sul.

ID	Nome	Margem	Concavidade	Cmax	dL	Distância Foz	Extensão (km)
RPS	Rio Paraíba do Sul	-	42,86	0,426	0,059	-	1.162,6
D1	Rio Grande	Direita	58,7	0,458	0,247	97,1	241,5
D2	Rio Paquequer	Direita	38,46	0,37	0,482	196,8	69,4
D3	Rio Piabanha	Direita	39,28	0,388	0,055	259,4	82,9
D4	Córrego Matosinho	Direita	34,48	0,355	0,353	279,1	24,5
D5	Rio do Saco	Direita	34,67	0,416	0,043	293,9	48,0
D6	Rio Alegre	Direita	-12,86			321,5	38,9
D7	Rio Pirai	Direita	67,96	0,598	0,278	356,5	129,2
D8	Ribeirão Brandao	Direita	53,08	0,512	0,125	393,7	25,0
D9	Rio Bananal	Direita	80,72	0,72	0,153	406,7	50,7
D10	Rio Barreiro de Baixo	Direita	80,19	0,761	0,133	444,1	56,0
D11	Ribeirão Itagaçaba	Direita	78,14	0,659	0,137	519,9	50,8
D12	Rio Bocaina	Direita	71,69	0,67	0,231	533,7	49,2
D13	Ribeirão Lorena	Direita	68,9	0,621	0,094	552,8	24,6
D14	Ribeirão dos Motas	Direita	68,97	0,663	0,18	565,5	26,7
D15	Ribeirão Piratingui	Direita	71,88	0,621	0,157	582,1	22,9
D16	Rio Uma	Direita	58,4	0,494	0,2	613,4	48,7
E1	Rio Muriaé	Esquerda	67,75	0,617	0,122	43,8	289,1
E2	Rio Pomba	Esquerda	51,54	0,422	0,047	128,7	314,1
E3	Rio Angu	Esquerda	8,2	0,213	0,553	181,9	70,8
E4	Rio Paraibuna	Esquerda	29,5	0,345	0,063	259,4	194,6
E5	Rio Vermelho	Esquerda	45,88	0,504	0,078	259,4	183,7
E6	Rio Preto	Esquerda	74,49	0,619	0,271	259,4	232,5
E7	Ribeirão Grande	Esquerda	45,33	0,505	0,094	280,8	32,9
E8	Ribeirão Marambaia	Esquerda	25,15	0,262	0,125	315,2	13,2
E9	Rio Ipiabas	Esquerda	38,11	0,389	0,341	361,6	22,2
E10	Ribeirão do Inferno	Esquerda	56,26	0,489	0,337	386,0	15,5
E11	Rio do Turvo	Esquerda	40,43	0,415	0,125	412,8	65,4
E12	Rio Pirapetinga	Esquerda	75,65	0,676	0,231	448,4	43,9
E13	Ribeirão do Brasão	Esquerda	49,43	0,368	0,357	516,8	22,0
E14	Ribeirão Piquete	Esquerda	78,69	0,681	0,196	528,5	40,4
E15	Rio Piagui	Esquerda	37,25	0,474	0,431	558,0	45,8
E16	Ribeirão dos Buenos	Esquerda	70,33	0,663	0,263	579,7	32,6
E17	Rio Piracuma	Esquerda	44,78	0,434	0,42	614,5	29,1

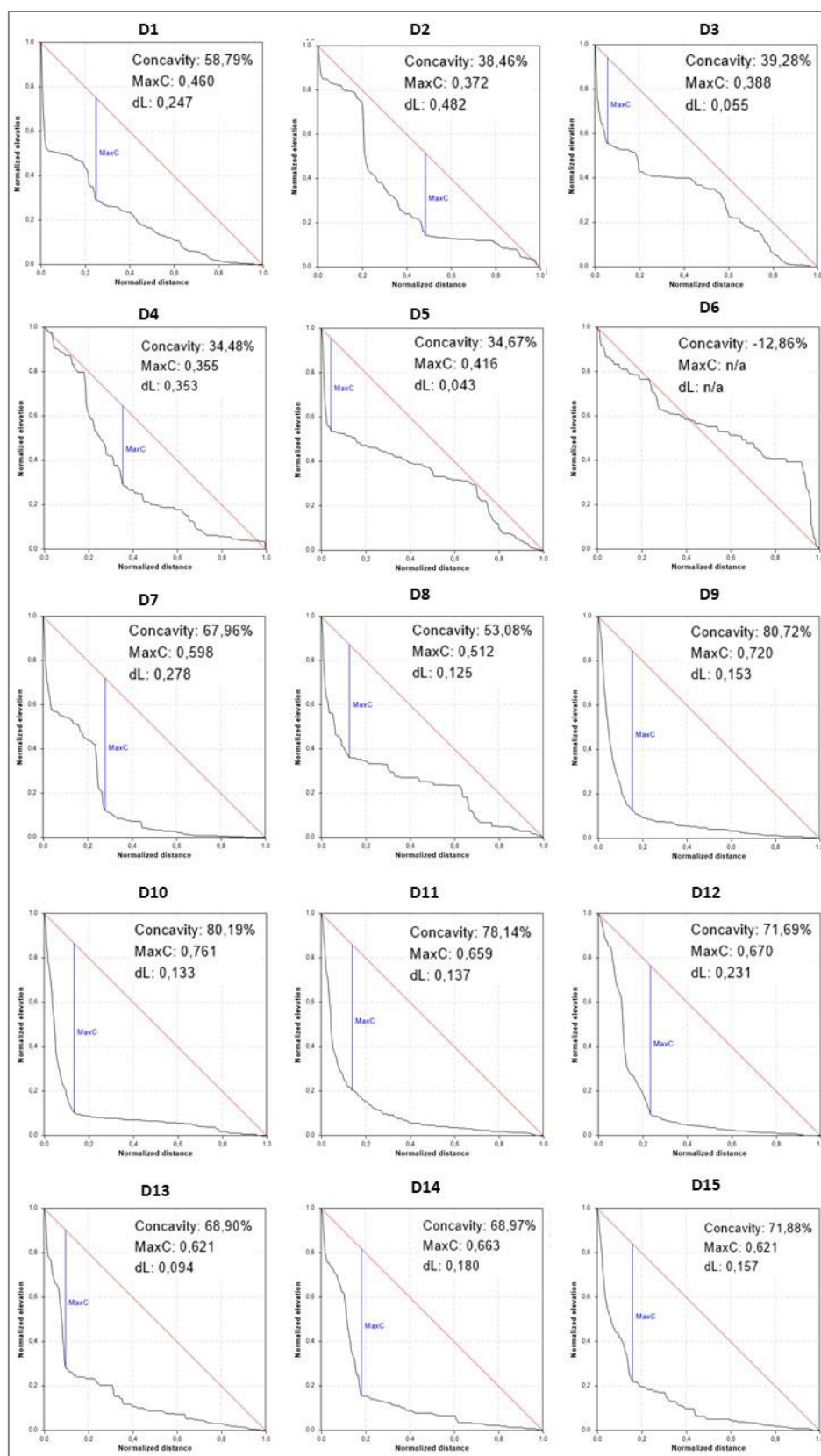


Figura 6: Perfis longitudinais normalizados das drenagens da margem direita do rio Paraíba do Sul.

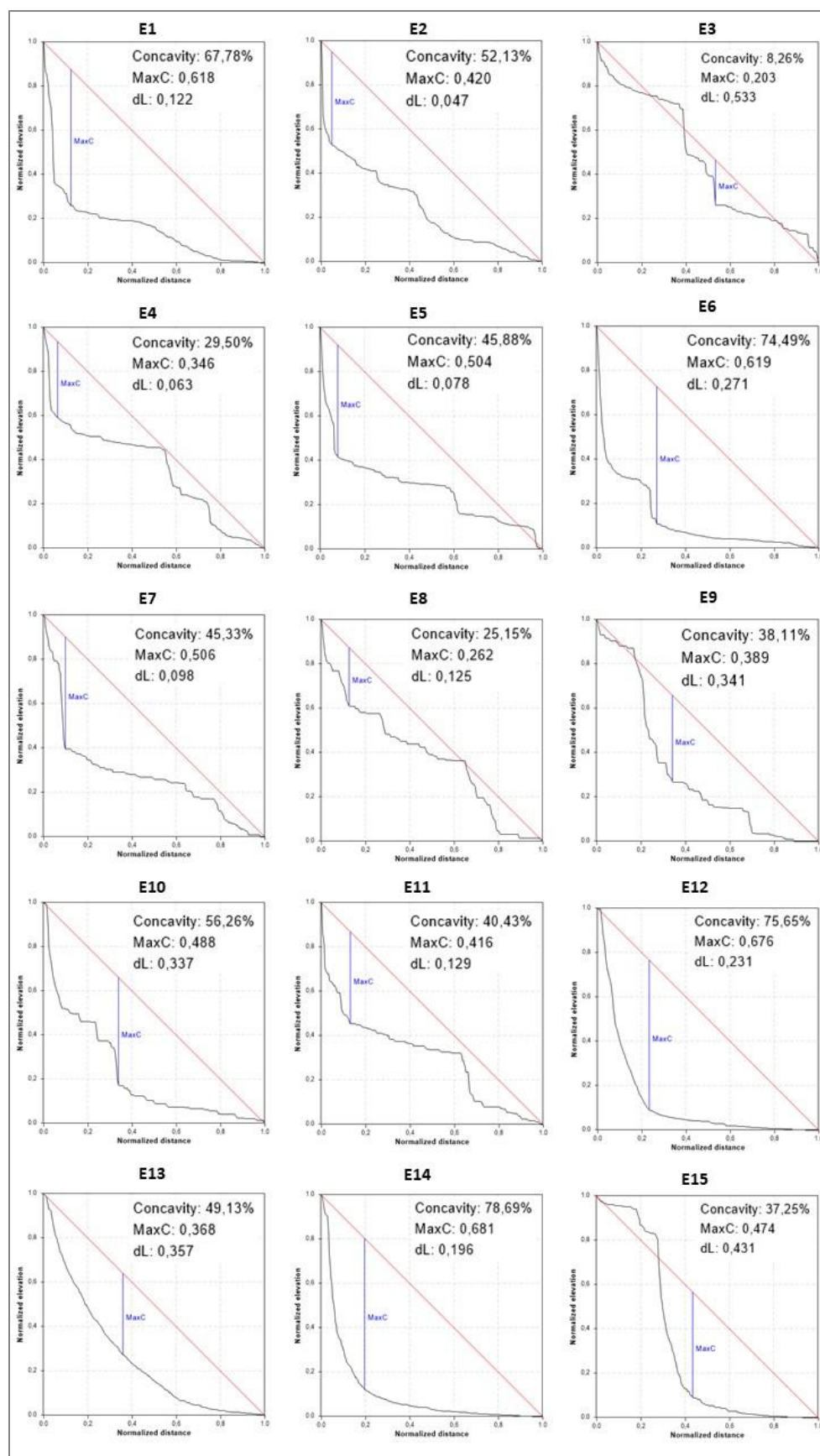


Figura 7: Perfis longitudinais normalizados das drenagens da margem esquerda do rio Paraíba do Sul.

Considerações Finais

Através da análise dos dados, pode-se inferir que a evolução do rio Paraíba do Sul se deu por meio de erosão remontante a partir de capturas fluviais sobre o planalto sudeste brasileiro. O sistema de capturas e o pulso erosivo do rio Paraíba do sul atingiu o divisor da Mantiqueira na porção norte primeiro, através do rio Pomba, e avançou sobre o planalto sudeste incorporando sistemas de drenagem endorréicos por meio de capturas de drenagem até configurar o sistema de drenagem atual. Este processo é evidenciado pela análise dos resultados: (1) perfis topográficos e valores de Chi (X) indicando estabilidade de divisor a nordeste e grande agressividade na porção sudoeste e; (2) elevados valores de C_T para drenagens distantes da foz associados aos depósitos sedimentares Eocenicicos. Em suma: a Bacia Hidrográfica do rio Paraíba do Sul esteve extremamente estável até recentemente e, somente quando a atividade tectônica diminuiu de intensidade, ela entrou em fase de ajuste erosivo e expansão. Este aparente contrassenso ocorreu em razão de que foi somente com a diminuição da atividade tectônica que o pulso erosivo do rio Paraíba do Sul pode, por erosão remontante, capturar uma série de bacias endorréicas que se localizavam a montante e assim ajustar seus afluentes ao novo nível de base oceânico.

Por fim, ressalta-se a necessidade de novos estudos para evidenciar as capturas fluviais ao longo da bacia do rio Paraíba do Sul, bem como, a identificação dos processos erosivos que podem indicar a atuação do pulso erosivo atlântico. Por fim, pode-se dizer que a análise morfométrica do relevo, por estar acompanhada de conhecimento empírico e teórico da área de estudo e dos sistemas de drenagem, contribuiu para interpretar a evolução e formação do sistema de drenagem do rio Paraíba do Sul.

Agradecimentos

A serem apresentados no caso de aprovação do artigo.

Referências Bibliográficas

AB'SABER, A. N. O problema das conexões antigas e da separação da drenagem do Paraíba e do Tietê. **Geomorfologia** 26. São Paulo, Instituto de Geografia da USP, p. 38-49. 1957.

AMADOR, E. M. Bacia da Baía de Guanabara: características geoambientais, formação e ecossistemas. Rio de Janeiro, Ed. Interciência, 432p. 2012.

BIERMAN, P. R.; CAFFEE, M. Slow Rates of Rock Surface Erosion and Sediment Production Across the Namib Desert and Escarpment, Southern Africa. *American Journal of Science*, vol. 301. April / May p. 326 – 358. 2001.

BISHOP, P. **Drainage rearrangement by river capture, beheading and diversion**. *Progress in Physical Geography*, v.19, n.4, p.449-473.1995.

BURBANK, D.W., ANDERSON, R.S. **Tectonic Geomorphology**, 2nd ed. Blackwell Science, Oxford. 2013.

CHEREM, L. F. S.; VARAJÃO, C. A. C.; BRAUCHER, R.; BOURLÉS, D.; SALGADO, A. A.; VARAJÃO, A. C. Long-term Evolution of Denudational Escarpments in Southeastern Brazil. **Geomorphology**. v. 173-4. p. 118-27. 2012.

COSTA, R. D. Determinação dos campos de tensão cenozóicos na região sul de Minas Gerais. **Tese de Doutorado**. Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 135 p. 1999.

GALLEN, S. F.; WEGMANN, K. W. Exploring the origins of modern topographic relief in the southern Appalachians: An excursion through the transient landscape of the Cullasaja River basin, North Carolina. **The Geological Society of America**. Field Guide 39. 2015.

HEILBRON, M.; MOHRIAK, W.; VALERIANO, C.M.; MILANI, E.; ALMEIDA J.C.H.; TUPINAMBÁ, M. From collision to extension: the roots of the south-eastern continental margin of Brazil. In: TALWANI & MOHRIAK (eds). **Atlantic Rifts and Continental Margins**. American Geophysical Union, Geophysical Monograph Series, 115:1-34. 2000.

HEILBRON,M., PEDROSA-SOARES,A.C., CAMPOS NETO,M.C., SILVA,L.C., TROUW, R.A.J.; JANASI,V.A., Província Mantiqueira. In: MANTESSO-NETO,V. BARTORELLI,A., CARNEIRO,C.D.R. e BRITO-NEVES,B.B., Orgs. **Geologia do Continente Sul-Americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida**. São Paulo, Ed. Beca, p.203-236. 2004.

HIRUMA S.T., RICCOMINI C., MODENESI-GAUTTIERI M.C. Neotectônica no planalto de Campos do Jordão, SP. **Revista Brasileira de Geociências**, 31(3):375-384. 2001.

HIRUMA S.T., RICCOMINI C., MODENESI-GAUTTIERI M.C., HACKSPACHER P.C., HADLER NETO J.C., FRANCO-MAGALHÃES, A.O. Denudation history of the Bocaina Plateau, Serra do Mar, southeastern Brazil:

Relationships to Gondwana breakup and passive margin development. *Gondwana Research*, **18**(4):674-687. 2010.

MELLO, M. L. D.; MARENGO, J. A. Simulações do Clima do Holoceno Médio na América do Sul com o Modelo de Circulação Geral da Atmosfera do CPTEC. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.23, n.2, 190-204, 2008.

OLIVEIRA, L. D. Reativações intraplaca no hemigraben do rio dos Bagres, Serra da Mantiqueira Setentrional - análise integrada de morfotectônica, termocronologia (U-Th-Sm)/He e isótopo cosmogênico ^{10}Be . **Tese de Doutorado**. Faculdade de Geologia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro. 2018.

PÉREZ-PEÑA, J. V.; AL-AWABDEH, M.; AZAÑÓN, J. M.; GALVE, J. P.; BOOTH-REA, G.; NOTTI, D. SwathProfiler and NProfiler: Two new ArcGIS Add-ins for the automatic extraction of swath and normalized river profiles. *Computers & Geosciences* 104, 135–150. 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2016.08.008>

RAMOS, R.R.C.MELLO,C.L. e SANSON M.S.R. Revisão Estratigráfica da Bacia de Resende, Rift Continental do Sudeste do Brasil, Estado do Rio de Janeiro. São Paulo, UNESP, *Geociências*, v. 25, n. 1, p. 59-69, 2006.

REZENDE, E. C.; SALGADO, A. A. R.; SILVA, J. R.; BOURLÈS, D.; BRAUCHER, R.; LÉANNI, L. Fatores Controladores da Evolução do Relevo no Flanco NNW do Rift Continental do Sudeste do Brasil: Uma Análise Baseada na Mensuração dos Processos Denudacionais de Longo-termo. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v.14, n.2, (Abr-Jun) p.221-234, 2013.

RICCOMINI, C.; GROHMANN, C. H.; SANT'ANNA, L. G.; HIRUMA, S. T. A Captura das Cabeceiras do Rio Tietê pelo Rio Paraíba do Sul. In: MONDENSEI-GAUTTIERI, M. C.; BARTORELLI, A. CARNEIRO, C. R. LISBOA, M. B. A. L. **Obra de Aziz Nacib Ab'Sáber**. São Paulo: Beca-BALL edições, 2010.

RICCOMINI, C.; SANT'ANNA, L. G.; FERRARI, A. L. Evolução geológica do Rift Continental do Sudeste do Brasil. In: MANTESSO-NETO, V.; BARTORELLI, A.; CARNEIRO, C. D. R; BRITO NEVES, B. B. (Org.). **Geologia do Continente Sul-Americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida**. São Paulo: Beca, p. 383-405. 2004

SALGADO, A.R., MARENT, B.R., CHEREM, L.F.S., BOURLÈS, D., SANTOS, L.J.C., BRAUCHER, R., BARRETO, H.N. Denudation and retreat of the Serra do Mar escarpment in southern Brazil derived from in situ-produced ^{10}Be concentration

in river sediment. **Earth Surface Processes and Landforms**, 39, 311-319. 2014. <https://doi.org/10.1002/esp.3448>.

SALGADO, A.A.R., REZENDE, E.A., BOURLÈS, D., BRAUCHER, R., DA SILVA, J.R., GARCIA, R.A., Relief evolution of the continental rift of Southeast Brazil revealed by in situ produced ^{10}Be concentrations in river-borne sediments. **Journal of South America Earth Science**. 67:89–99. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2016.02.002>.

SANT'ANNA NETO, J.L. Decálogo da climatologia do sudeste brasileiro. **Revista Brasileira de Climatologia**, v.1, nº1, p.43-60. 2005.

SANTOS M., HASUI Y., MORALES N., LADEIRA F.S.B. A Bacia Terciária de Aiuruoca: contribuição para o entendimento da evolução cenozóica do Sul de Minas Gerais. In: **7º Simpósio do Cretáceo no Brasil e 1º Simpósio do Terciário do Brasil**. Serra Negra, *Boletim*, 114. 2006.

SORDI, M. V. de, SALGADO, A. A. R., SIAME, L. BOURLÈS, D., PAISANI J. C., LEANNI, L. BRAUCHER, R., COUTO, E. VÍTOR do, ASTER TEAM. Implications of drainage rearrangement for passive margin escarpment evolution in Southern Brazil. **Geomorphology**. 306: 155-169. 2018. doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.01.007.

STRUTH, L.; GARCIA-CASTELLANOS, D.; VIAPLANA-MUSZAS, M. VERGÉS, J. Drainage network dynamics and knickpoint evolution in the Ebro and Duero basins: From endorheism to exorheism. **Geomorphology**, 327. 554 – 571. 2019.

SUMMERFIELD, M. A. **Global Geomorphology: An introduction to the Study of Landforms**. Longman Scientific & Technical. p.537.1991.

TUPINAMBÁ, M., SILVA, L. G. & HEILBRON, M. O Gráben de Itaocara, Rio de Janeiro, sudeste do Brasil. In: IX Simposio Nacional de estudos tectônicos/III International symposium on tectonics, Buzios. Boletim de resumos. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Geologia. pp. 305-306, 2003.

VALERIANO, M. M.; ROSSETTI, D. F. Topodata: Brazilian full coverage refinement of SRTM data. **Applied Geography**, v. 32, p.300-309, 2012.

WILLETT, S.D., MCCOY, S.W., PERRON, J.T., GOREN, L., CHEN, C.Y. Dynamic reorganization of river basins. **Science** 343, 248765. <https://doi.org/10.1126/science.1248765>. 2014.

ZALÁN, P. V.; OLIVEIRA, J. A. B. Origem e evolução estrutural do Sistema de Riftes Cenozóicos do Sudeste do Brasil. **Boletim de Geociências Petrobras**, Rio de Janeiro, v. 13, n. 2, p. 269-300, maio/nov. 2005.