

CARACTERIZAÇÃO MORFOMÉTRICA E NEOTECTÔNICA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO VERMELHO – SUDESTE DO PARÁ

MORPHOMETRIC AND NEOTECTONIC CHARACTERIZATION OF THE VERMELHO RIVER
HYDROGRAPHIC BASIN - SOUTHEAST PARÁ

Amanda Tomaz Silva ALMEIDA¹, Leonardo Brasil FELIPE¹, Abraão Levi dos Santos
MASCARENHAS¹, Osmar Guedes da SILVA JÚNIOR²

¹Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará. Folha 31, Quadra 07, Lote Especial, s/n.º - Nova Marabá, Marabá – PA.
E-mails: amandathomaz21@gmail.com; lblfelipe@unifesspa.edu.br; abraaolevi@unifesspa.edu.br

²Universidade Federal do Pará. Rua Augusto Corrêa, 01 - Guamá, Belém - PA E-mail: guedesjr@ufpa.br

Introdução
Contexto geológico
A Neotectônica na Amazônia
Materiais e métodos
Análise morfométrica
Análise neotectônica através de índices geomórficos
Relação declividade-extensão
Fator de assimetria
Sinuosidade de frente de relevo
Integral hipsométrica
Índice de atividade tectônica
Resultados e discussão
Análise morfométrica
Características geométricas
Características de relevo
Característica da rede de drenagem
Análise neotectônica
Relação Declividade-Extensão
Fator de Assimetria
Integral hipsométrica
Sinuosidade de frente de relevo
Índice de Atividade Tectônica
Conclusões
Agradecimentos
Referências

RESUMO - Este trabalho apresenta a análise morfométrica e a aplicação de índices geomórficos visando avaliar a influência neotectônica na Bacia Hidrográfica do Rio Vermelho (BHRV), localizada no sudeste do Estado do Pará. A partir da análise do Modelo Digital de Elevação (MDE) foram definidas as características geométricas, de relevo e da rede de drenagem da referida bacia e, em seguida, empregado os índices: Relação Declividade-Extensão (RDE), Fator de Assimetria (FA), Integral Hipsométrica (IH) e Sinuosidade de Frente de Relevo (SFR) em vinte e sete sub-bacias. Esses quatro índices foram combinados para produzir o Índice de Atividade Tectônica Relativa (IAT), dividido em quatro classes de acordo com o coeficiente de intensidade da atividade tectônica. Como resultado, aproximadamente 44% da BHRV correspondeu à classe 1 (altíssima atividade tectônica), 37% correspondeu a classe 2 (com alta atividade tectônica) e apenas 18% correspondeu a classe 3 que indica uma moderada intensidade tectônica. Nenhuma sub-bacia apresentou a classe 4, o que indica que a BHRV possui alta atividade neotectônica.

Palavras-chave: Rede de drenagem, Morfometria, Neotectônica, Geoprocessamento.

ABSTRACT - This work presents the morphometric analysis and the application of geomorphic indices in order to evaluate the neotectonic influence on Rio Vermelho Hydrographic Basin (BHRV), located in the southeastern of Pará state. From the Digital Elevation Model (MDE) analysis, the geometric characteristics for relief and drainage network of the basin were defined, and then, used the indexes: Declivity-Extension Ratio (RDE), Asymmetry Factor (FA), Integral Hypsometric (IH) and Relief Front Sinuosity (SFR) in twenty-seven sub-basins. These four indices were combined to produce the Relative Tectonic Activity Index (IAT), divided into four classes, according to the coefficient of intensity tectonic activity. As result, approximately 44% of BHRV corresponded to class 1 (very high tectonic activity), 37% corresponded to class 2 (high tectonic activity) and only 18% corresponded to class 3 (which indicates moderate tectonic intensity). No sub-basin presented class 4, which indicates that BHRV has high neotectonic activity.

Keywords: Drainage network, Morphometry, Neotectonics, geoprocessing.

INTRODUÇÃO

O Brasil, até a década de 1970 foi considerado assísmico, devido à sua relativa estabilidade e localização no centro da placa tectônica. Porém, com o avanço nas técnicas de investigação geológicas, identificaram-se anomalias de cunho

sísmico ao longo do território brasileiro. Além disso, segundo Hasui (1990), os estudos da neotectônica possibilitaram buscar evidências mais sutis ou indiretas nas eventuais deformações, bem como seus agentes causadores e recorrência

de tais eventos. Dentre as técnicas de investigação, destaca-se a análise morfométrica de bacias hidrográficas por se tratar de um sistema facilmente afetado por processos deformadores.

Os estudos envolvendo análises morfométricas para detecção de deformações neotectônicas no Brasil tiveram início com Björnberg (1969 a, b; 1992), ao estudar perfis longitudinais, seguido dos autores Rodriguez & Suguio (1992) e Rodriguez (1993) aplicando na Região Amazônica, Takiya (1997) na Bacia Sedimentar de São Paulo, Etchebehere et al. (2004) na Bacia do Rio do Peixe, Guedes (2008) na Bacia do Rio Santo Anastácio, além de contribuições de outros autores como Doranti (2003), Missura (2005), Caretta (2006) e Lima

(2009).

Dentro desse contexto, o presente trabalho consiste na realização da análise morfométrica para definir as características geométricas, de relevo e da rede de drenagem e na aplicação de índices geomórficos visando identificar movimentações neotectônicas da Bacia Hidrográfica do Rio Vermelho (BHRV), utilizando dados topográficos e de sensoriamento remoto disponibilizados em ambiente digital, a partir da aplicação de técnicas de geoprocessamento. A referida bacia está localizada na porção sudeste do Estado do Pará, abrangendo áreas dos Municípios de Marabá, Curionópolis, Eldorado dos Carajás, São Geraldo do Araguaia, Piçarra, Xinguara e Sapucaia (Figura 1).

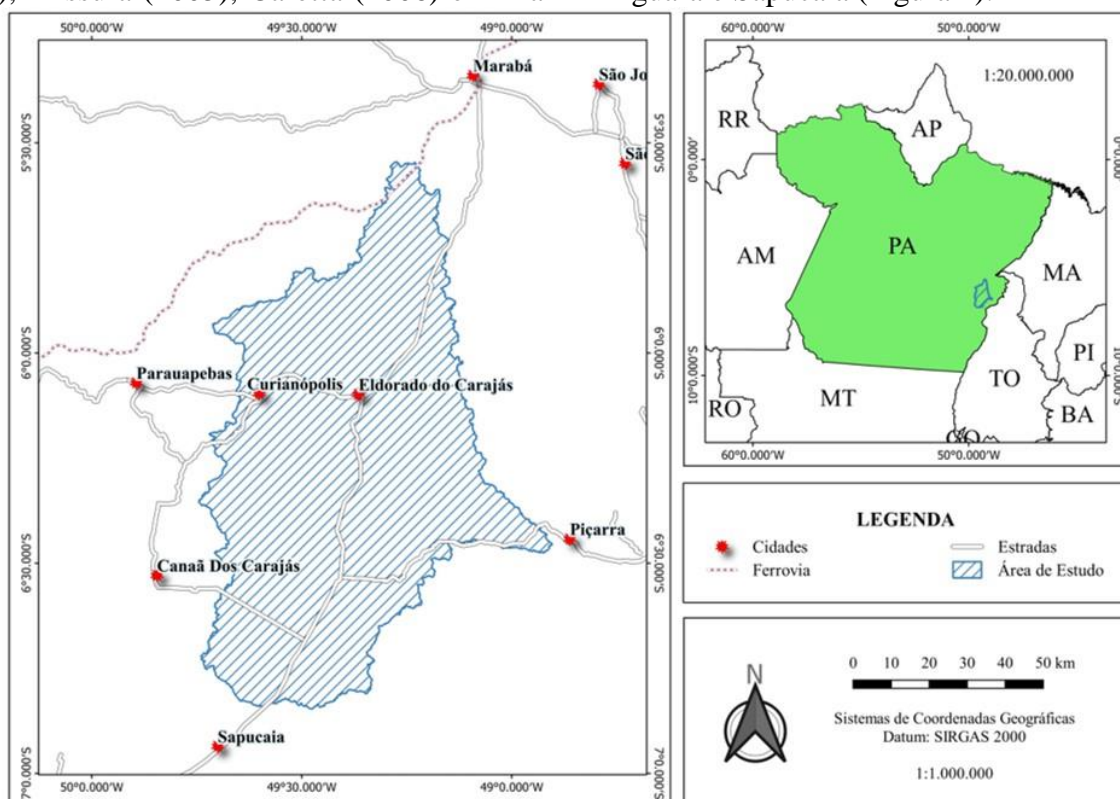


Figura 1 – Mapa de localização da bacia hidrográfica do Rio Vermelho.

CONTEXTO GEOLÓGICO

A BHRV está inserida no contexto geológico de três grandes unidades geotectônicas (Figura 2), sendo elas: I) Cráton Amazônico, uma das principais unidades geotectônicas da Plataforma Sul-Americana, constituído pelos escudos das Guianas e Brasil Central, separados pela expressiva faixa sedimentar das Bacias do Amazonas e Solimões; II) Cinturão Orogênico Araguaia, uma importante unidade geotectônica do Neoproterozoico pertencente ao Sistema Orogênico Tocantins; e III) Província Sedimentar do Meio Norte (Goés, 1995) ou Província Parnaíba (Silva et al., 2003), a qual abrange quatro bacias sedimentares originadas

a partir de fases tectônicas com estilos e idades distintas (Grajaú, Espigão Mestre, Alpercatas e Parnaíba; Góes, 1995).

As rochas do Cráton Amazônico ocupam toda a porção oeste da área, marcada predominantemente pela subprovíncia Serra dos Carajás, a qual é formada por unidades de alto grau metamórfico, *greenstone belts*, sequências metavulcanossedimentares, rochas siliciclásticas de idade arqueana depositadas em ambiente fluvial a marinho, unidades granitoides do tipo A e unidades gnáissico-granitoide (Hasui, 2012), pertencentes à Província Carajás (Santos, 2003); e, em menor proporção, é

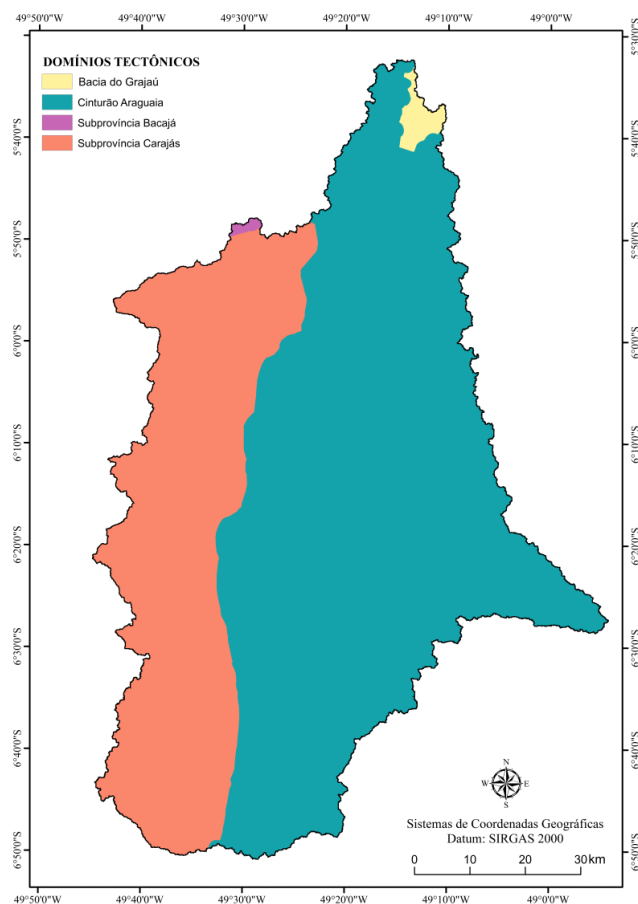


Figura 2 – Mapa mostrando os domínios tectônicos presentes na área de estudo.

marcada a norte pela subprovíncia Bacajá, formada por unidades de alto e médio grau metamórfico, unidades metavulcanossedimentares, granitoides pré-, sin-, tardi- e pós-tectônicos, unidades sedimentares e metassedimentares (Hasui, 2012), pertencentes a Província Transamazonas (Santos, 2003).

Na porção central e leste da área, ocorrem rochas do Cinturão Orogênico Araguaia, relacionadas à Formação Couto Magalhães do Grupo Tocantins, constituindo ardósias, filitos, quartzitos, meta-chertes, metarcóseos, metaconglomerados e metacalcários de grau baixo a incipiente (Hasui, 2012).

No extremo nordeste da área, rochas do Cinturão Orogênico Araguaia estão recobertas por rochas sedimentares da Bacia do Grajaú, em que afloram sequências sedimentares de arenitos e argilitos acumulados em ambiente marinho raso e flúvio/deltaico e, sequências de argilitos e arenitos de ambiente estuarino de vales incisos (Rossetti, 2001b) pertencentes à Unidade Indiferenciada e às Formações Alcântara e Cujupe que compõem o Grupo Itapecuru (Rossetti & Truckenbrodt, 1997). Sobrepondo-se a essas unidades ocorrem as Coberturas Detríticas Cenozoicas e Lateríticas Imaturas.

A Neotectônica na Amazônia

Na região amazônica, os estudos geológicos

têm revelado importantes evidências de processos tectônicos recentes na alteração da paisagem. Sternberg (1950) iniciou os estudos na região com o trabalho “Vales tectônicos na Planície Amazônica” seguido do levantamento realizado pelo Projeto Radam Brasil que descreveu feições morfológicas e anomalias de drenagens associadas a controles tectônicos entre meados dos anos 1970 e 1980, mas foi no final da década de 1980 que o quadro neotectônico da região amazônica começou a receber contribuições sistemáticas e se estabeleceu através das contribuições por autores como Igreja et al (1990) com os estudos neotectônicos nas ilhas de Outeiro e Mosqueiro no nordeste paraense, Costa et al. (1991) estudando a tectônica mesozoica e cenozoica da região norte do Brasil; Bemerguy & Costa (1991), Costa et al. (1993) ao apresentar os aspectos fundamentais da neotectônica na Amazônia; Saadi (1993) com o trabalho intitulado “Neotectônica da Plataforma Brasileira: esboço e interpretações preliminares”, onde ele reuniu o conhecimento até então adquirido sobre a neotectônica da região amazônica; Costa et al. (1996) em que sintetizaram importantes informações sobre a neotectônica da Amazônia; Silva (2005) investigou o quadro neotectônico da região de

Manaus e adjacências, e diversos outros autores.

Costa et al. (1996) destacam que o quadro neotectônico da região Amazônica seria decorrente de deformação intraplaca imposta pela atuação de forças de um par conjugado dextral de direção E-W, gerado pela rotação da Placa Sul-Americana para oeste e, apontam, ainda, que a atividade neotectônica no interior da Placa tem importante influência na modelagem da paisagem.

Estes mesmos autores, ao estudar a região sudeste do Pará e oeste do Tocantins, afirmam que as principais estruturas neotectônicas da região

seriam representadas por três feixes de falhas transcorrentes de direção E-W e dois feixes de falhas normais N-S.

Estabelecem também que, os dois feixes transcorrentes, norte e central, interligam-se através de descontinuidades orientadas na direção NE-SW, onde se situa a área de estudo, e que essas descontinuidades controlariam a orientação dos extensos segmentos dos rios Itacaiúnas, Parauapebas e Vermelho, sendo interpretados como falhas inversas decorrentes da movimentação dextral.

MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização deste estudo, foram utilizados dados de bases geográficas, os quais foram obtidos em formato vetorial e matricial, sendo que os dados vetoriais correspondem a arquivos *shapefile* com informações de vias de acesso, localidades e sedes municipais, adquiridos nos portais do DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes) e aos arquivos com informações da geologia da área, adquiridos no portal GeoSGB da CPRM (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais);

enquanto que os dados matriciais do tipo MDE (Modelo Digital de Elevação), foram obtidos, respectivamente, nos portais TOPODATA do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) e *Alaska Satellite Facility*. Neste último foi baixado dados da missão *Advanced Land Observing Satellite – ALOS PALSAR*, com resolução espacial de 12,5m. O fluxograma abaixo resume esquematicamente as etapas realizadas e, a descrição detalhada de cada etapa é apresentada em seguida, na figura 3.

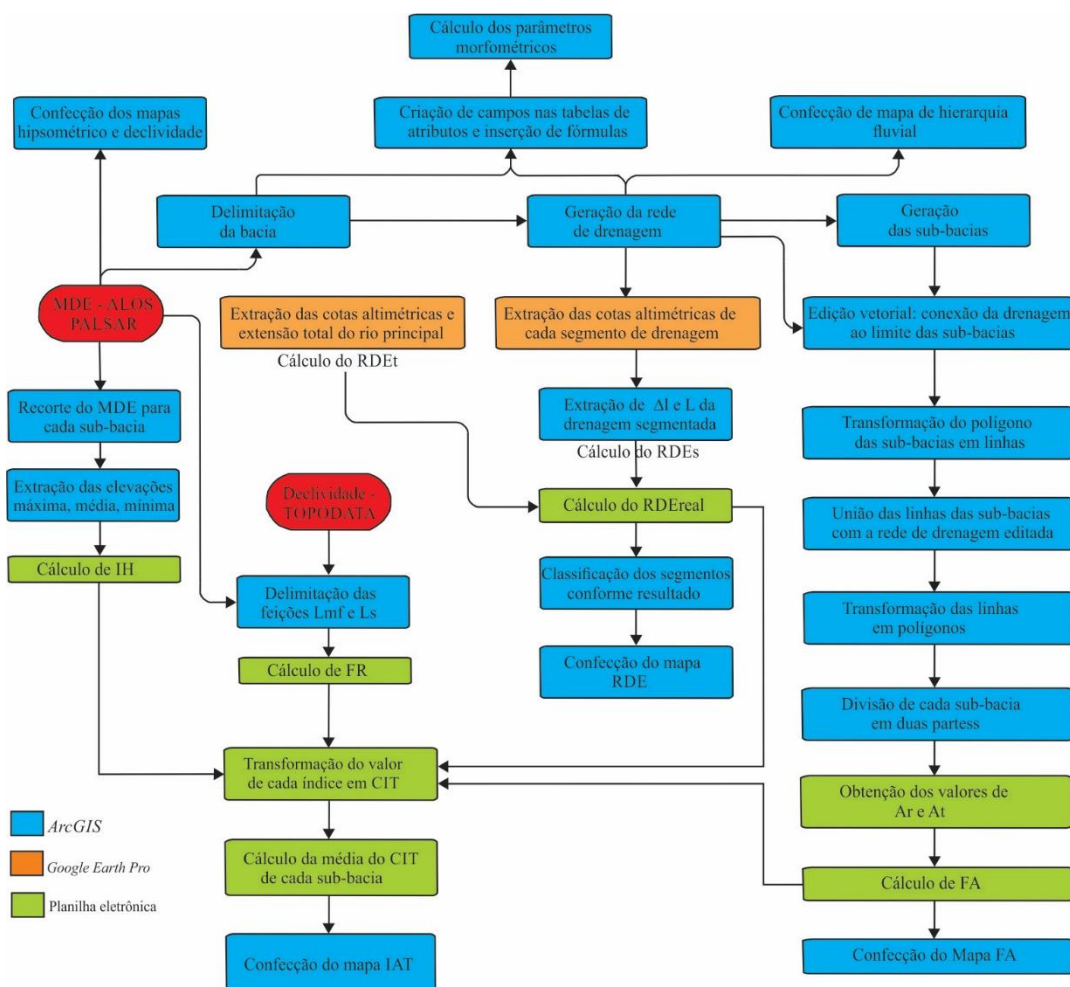


Figura 3 – Fluxograma das etapas realizadas.

Análise morfométrica

Para a realização da análise morfométrica inicialmente utilizou-se o Modelo Digital de Elevação (MDE) – *Alos Palsar*, onde a partir da extensão *ArcHydro* do *ArcGIS*, onde foram aplicados os seguintes processos: 1) *Fill Sinks*; 2) *Flow Direction*; 3) *Flow Accumulation*; 4) *Stream Definition*; 5) *Stream Segmentation*; 6) *Catchment Grid Delineation*; 7) *Catchment Polygon Processing*; 8) *Drainage Line Processing*; 9) *Adjoint Catchment Processing*; 10) *Drainage Point Processing*; 11) *Batch Point Generation*; 12) *Watershed Delineation*; 13) *Batch Subwatershed Delineation*. A aplicação desses procedimentos resultou na delimitação da bacia hidrográfica, geração da rede de drenagem e de 27 sub-bacias. De posse dos dados vetoriais da rede drenagem e bacia hidrográfica foram calculados os parâmetros morfométricos com base na proposta de Horton (1945, segundo Christofolletti, 1980) e Villela & Mattos (1975) com vista para a caracterização da bacia quanto aos seus aspectos geométricos, de relevo e rede de drenagem. A tabela 1 (APÊNDICE) lista os parâmetros morfométricos analisados e suas respectivas fórmulas.

Análise neotectônica a partir de índices geomórficos

A análise quantitativa foi desenvolvida através dos *software ArcGIS* e *Google Earth Pro* para determinar os índices geomórficos: RDE – Relação Declividade-Extensão, FA – Fator de Assimetria, IH – Integral Hipsométrica e SFR – Sinuosidade de Frente de Relevo, e na integração desses quatro índices em um índice combinatório: IAT – Índice de Atividade Tectônica Relativa.

Estes índices foram calculados a partir de informações derivadas do MDE e da rede de drenagem da Bacia do Rio Vermelho.

Relação Declividade-Extensão (RDE)

A Relação Declividade-Extensão foi inicialmente proposta por John T. Hack (1973) e é utilizada como forma de detecção de possíveis deformações tectônicas através de parâmetros morfométricos obtidos a partir do perfil longitudinal do canal (Andrades Filho, 2010).

Para aplicação deste índice foi utilizado o plano de informação contendo a drenagem da bacia hidrográfica, em formato vetorial gerado através do processamento elucidado anteriormente, utilizando a extensão *ArcHydro* do *ArcGIS*. Assim, cada segmento de drenagem recebeu um identificador, para compatibilizar a

associação entre os processamentos realizados em SIG, e demais cálculos em planilha eletrônica. Inicialmente, foram extraídas as cotas altimétricas da nascente e da foz do Rio Vermelho e a sua extensão total, por meio do *software Google Earth Pro*, utilizando as funções Adicionar Marcador e Adicionar Caminho, respectivamente, obtendo, assim, os valores necessários para o cálculo do RDE total do Rio Vermelho. Estes dados foram exportados e calculados numa planilha eletrônica, empregando a equação (1).

$$RDEt = \frac{\Delta h}{\ln L} \quad (1)$$

onde, Δh corresponde a variação de altura (diferença entre a cota da foz e cota da cabeceira) e $\ln L$ representa o logaritmo natural de toda a extensão.

Posteriormente, foram extraídos os valores de RDE por segmento de drenagem. Para realizar este procedimento é necessário decompor a rede de drenagem em segmentos, conforme os limites das sub-bacias hidrográficas, o qual foi realizado de forma automática ao gerar as sub-bacias pelo *ArcGIS*. Obteve-se também a cota altimétrica do ponto mais a montante e do ponto mais a jusante de cada segmento, utilizando a ferramenta Adicionar Marcador no *Google Earth Pro*. Estes dados foram exportados e manipulados numa planilha, onde se realizou os cálculos utilizando a diferença altimétrica (Δh) entre os pontos a montante e a jusante, a extensão sinuosa de cada segmento (Δl), a declividade de cada segmento ($\Delta h/\Delta l$), e a extensão em linha reta (L) do segmento a partir da nascente. Com base nestes dados, foi extraído o valor de RDE por segmento e obtida a sua relação com o RDE total do Rio Vermelho, utilizando-se as equações (2) e (3):

$$RDEs = \frac{\Delta h}{\Delta l} L \quad (2)$$

onde, Δl representa o comprimento de determinado segmento e L corresponde à distância entre o segmento para o qual o índice RDE está sendo calculado e a nascente da drenagem

$$RDE_{real} = \frac{RDEs}{RDEt} \quad (3)$$

Por fim, os resultados calculados foram importados para o *ArcGIS*, onde se realizou a classificação dos segmentos, segundo os valores de RDE_{real} . Conforme os critérios de Seeber & Gornitz (1983) considera-se $RDE = 2$ como o

limiar inferior da faixa de anomalias. Adicionalmente Andrades Filho & Rossetti (2015) distinguiram quatro classes, adotadas neste trabalho, o qual três refletem valores anômalos ($2 \leq RDE < 4$; $4 \leq RDE < 6$ e $6 \leq RDE$).

Fator de Assimetria (FA)

O Fator de Assimetria foi definido por Hare & Gardner (1985) como um modo de avaliar a existência de inclinações tectônicas, em escala de bacia de drenagem, podendo ser aplicado em áreas relativamente extensas (Keller & Pinter, 2002).

A implementação do fator de assimetria foi realizada com auxílio do programa ArcGIS e da planilha eletrônica. Para isso, se utilizaram os limites das sub-bacias hidrográficas, em formato vetorial, e o vetor referente à drenagem. A partir deste produto, efetuou-se a edição para conectar o ponto de nascente ao limite da bacia hidrográfica, para então aplicar os seguintes processos: 1) Transformação dos polígonos das sub-bacias em linhas – Arc Toolbox > Features > Polygon to line; 2) União das linhas das sub-bacias com a drenagem – Geoprocessing > Merge; 3) Transformação das linhas em polígonos – Arc Toolbox > Features > Features to polygon. Após este processamento cada sub-bacia foi decomposta em duas áreas, referentes às porções direita e esquerda da drenagem principal. Em seguida foram extraídos os valores da área direta e área total de cada sub-bacia, disponibilizados na tabela de atributos do *shapefile*, e exportados para a planilha eletrônica, visando a realização do cálculo através da equação (4):

$$Fa = 100 \frac{Ar}{At} \quad (4)$$

Onde, Ar refere-se à medida da área direita da bacia e At corresponde à métrica de sua área total da bacia de drenagem. A partir do resultado, foi subtraído o valor 50. O resto foi computado em módulo $|Fa-50|$. As sub-bacias hidrográficas foram então classificadas em graus de intensidade de assimetria: baixa ($0 < |Fa-50| \leq 7$), média ($7 < |Fa-50| \leq 15$) e alta ($15 < |Fa-50|$) (Keller & Pinter, 2002).

Integral Hipsométrica (IH)

A integral hipsométrica descreve a curva de distribuição da elevação do terreno, de uma determinada bacia hidrográfica por meio da frequência acumulada das altitudes (Strahler, 1952). Representa determinada área da bacia, que ainda não esteve sujeita a processos erosivos, configurando-se como indicador de diferentes

estágios evolutivos do relevo (Keller & Pinter, 2002; Pérez-Peña et al., 2009).

A obtenção deste índice foi realizada utilizando-se os polígonos referentes a cada bacia hidrográfica, e o MDE em projeção UTM, datum SIRGAS 2000. Os dados foram processados com auxílio do programa ArcGIS e de planilha eletrônica.

Na primeira etapa, o Modelo Digital de Elevação foi recortado a partir do polígono de cada sub-bacia hidrográfica, por meio da ferramenta clip disponível em – Arc Toolbox > Data Management Tools > Raster > Raster Processing > Clip. A partir de cada recorte, foram extraídas as elevações mínima, média e máxima, contidas nos atributos do próprio MDE. Na segunda etapa, os dados de elevação foram exportados para uma planilha eletrônica, e foram efetuados os cálculos de IH, utilizando a fórmula:

$$IH = \frac{(\text{elev. média} - \text{elev. mínima})}{(\text{elev. máxima} - \text{elev. mínima})} \quad (5)$$

Sinuosidade de Frente De Relevo (SFR)

A Sinuosidade de Frente de Relevo é um índice que reflete o balanço entre forças erosivas que afetam as frentes de relevo e tendem a deixá-las mais irregulares, com valores de SFR alto, e forças tectônicas que tendem a produzir frentes de relevo fortemente retilíneas, coincidindo com falhas ou fraturas ativas, e com baixos valores de SFR (Bull & Mc Fadden, 1977; El Hamdouni et al., 2008). Este índice tem sido utilizado em contexto de diferentes tipos de relevo, não sendo exclusivo a relevo de montanhas, como aponta os estudos de Andrades Filho & Rossetti (2015) e Oliveira et al. (2018).

Para obtenção do índice de sinuosidade de frente de relevo (SFR) utilizou-se o plano de informação da bacia hidrográfica, a base de declividade (SN) do TOPODATA e o MDE. Na primeira etapa, com auxílio visual do MDE e da base de declividade, identificou-se as feições denominadas frentes de relevo e, para cada feição, foram delimitados dois segmentos vetoriais. Primeiramente, traçou-se por edição vetorial, cada feição na sua forma retilínea, de acordo com sua conformidade geral no terreno.

Na sequência, criou-se outro plano de informação vetorial, onde foi traçada a mesma feição, porém respeitando a sinuosidade existente da frente de relevo, revelada visualmente por fortes rupturas de declividade na base.

A informação de extensão dos segmentos foi exportada para uma planilha eletrônica, onde se realizou o cálculo do índice SFR, para cada sub-bacia, de acordo com a seguinte equação:

$$SFR = \frac{Lmf}{Ls} \quad (6)$$

onde, Lmf é o comprimento da frente de relevo medida na base onde ocorre mudança de declividade; e Ls é o comprimento, em linha reta, da face do relevo.

Índice de Atividade Tectônica (IAT)

O índice de atividade tectônica permite a discriminação de áreas, com diferentes graus de influência de atividade tectônica, por meio da combinação dos índices descritos anteriormente (RDE, FA, IH E SFR). Ademais, para realizar essa combinação é necessário transformar todos os índices morfométricos em valores categóricos visando traduzi-los para uma mesma escala. Os autores El Hamdouni et al. (2008), responsáveis

por criar este índice, dividiram os valores dos quatro índices, arbitrariamente, utilizando a melhor estimativa, em 3 classes de intensidade tectônica (CIT), nos quais o valor 1 indica alta atividade tectônica, 2 representa média atividade tectônica e, 3 indica baixa atividade tectônica.

Para aplicação do IAT foram combinadas as informações dos índices morfométricos utilizando-se planilha eletrônica. A partir dos valores de CIT em cada índice, foi auferida a média para cada sub-bacia. Com base na média de CIT obtida em cada sub-bacia foi possível a determinação de diferentes graus de intensidade tectônica relativa (IAT), com seus valores classificados em quatro classes: classe 1 = $1 \leq IAT \leq 1,5$ – Altíssima Intensidade; classe 2 = $1,5 < IAT \leq 2$ – Alta Intensidade; classe 3 = $2 < IAT < 2,5$ – Moderada Intensidade; classe 4 = $IAT > 2,5$ – Baixa Intensidade (El Hamdouni et al., 2008).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Análise morfométrica

A análise morfométrica da BHRV foi realizada sob três diferentes aspectos: geométrico, de relevo e rede de drenagem e seus resultados estão listados na tabela 2 (APÊNDICE).

Características geométricas

A bacia possui uma área de 7.003,59 km², perímetro de 532,44 km e comprimento axial de 146,24 km. O coeficiente de capacidade (Kc) encontrado no valor de 1,78, associado ao fator de forma Kf = 0,327, indicam que esta bacia, em condições normais de precipitação, é pouco suscetível a enchentes. Este resultado é reforçado pelo índice de circularidade (Ic) de 0,31, pois o afastamento da unidade indica que a bacia não tende à forma circular, ou seja, possui forma mais alongada e, portanto, segundo Villela & Mattos (1975, segundo Souza et al., 2017), possuem menor concentração do deflúvio.

A densidade hidrológica é de fundamental importância, uma vez que, esse parâmetro compara a frequência de cursos d'água, e estima a capacidade de gerar novos canais de drenagem. Uma bacia é considerada bem drenada, quando tem 1 canal por km² (Horton segundo Christofolletti, 1980). Portanto, a Bacia Hidrográfica do Rio Vermelho apresenta uma baixa densidade hidrográfica (0.34 canais/km²).

Características de relevo

A amplitude altimétrica máxima de uma bacia hidrográfica corresponde à diferença entre o

ponto de máxima elevação e o ponto de menor elevação. Na Bacia do Rio Vermelho o ponto de maior elevação é 751m e a cota mínima é de 50m. Portanto a amplitude máxima encontrada é de 701m (Figura 4).

A Relação de Relevo consiste no relacionamento existente entre a amplitude altimétrica máxima de uma bacia e sua maior extensão, medida paralelamente à principal linha de drenagem (Schumm segundo Christofolletti, 1980). A Relação de Relevo para a BHRV foi de 3,89 m.

O índice de rugosidade é o parâmetro hipsométrico que combina as qualidades de declividade e comprimento das vertentes com a densidade de drenagem, expressando-se como número adimensional. O valor obtido foi 0,518 indicando que esta bacia não apresenta susceptibilidade erosiva ocasionada por escoamentos superficiais.

O índice de sinuosidade varia de 1 a 2, indicando que valores próximos a 1 sugerem canais retilíneos, enquanto que valores superiores a 2 indicam sinuosidade dos canais. Valores intermediários indicam formas transitórias, regulares e irregulares. O índice de sinuosidade (Is) encontrado de 1,37 sugere formas regulares e irregulares com canais retilíneos e sinuosos.

As informações quantitativas (Tabela 3 – APÊNDICE - e Figura 5) apontam que a maior parte da declividade está compreendida nas classes baixa (26,09%) e baixa a média (27,06%) seguida

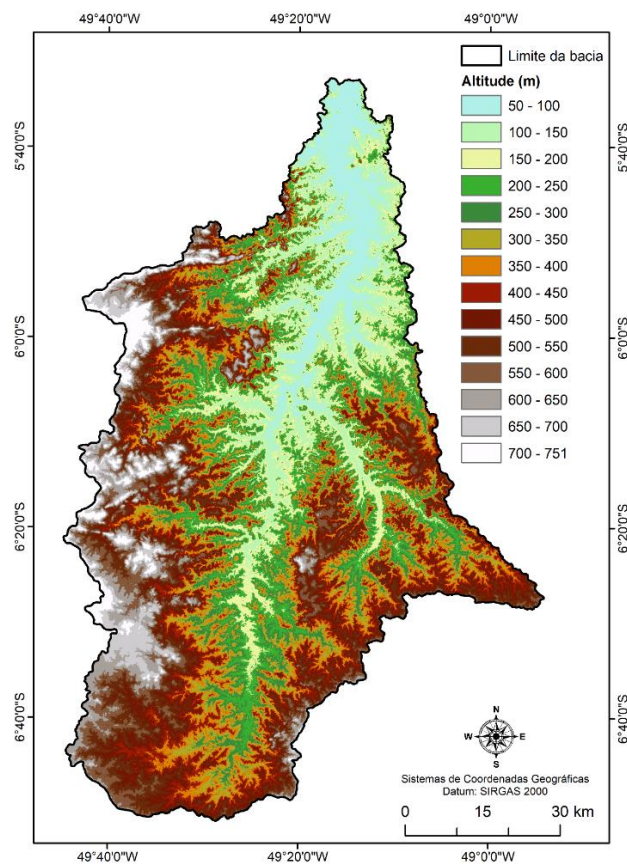


Figura 4 – Mapa hipsométrico da Bacia Hidrográfica do Rio Vermelho.

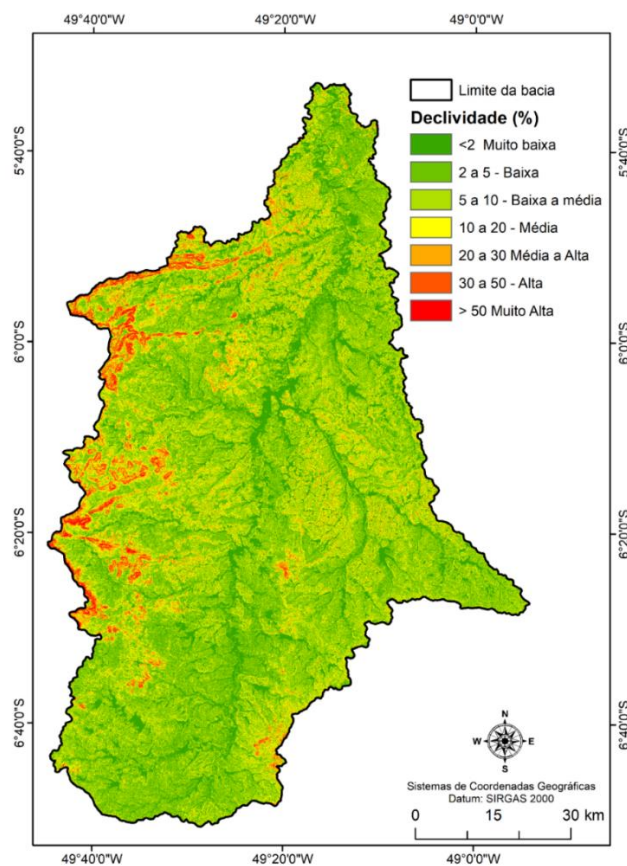


Figura 5 – Mapa de declividade da Bacia do Rio Vermelho, conforme classificação de Crepani et al (1996).

pela classe média (19,83%) muito baixa (10,76%), de acordo com a classificação de Crepani et al (1996).

Segundo Pruski (2011) quanto mais acentuada a declividade de uma bacia, menor será sua capacidade de armazenamento superficial, e

maior a sua susceptibilidade à ocorrência de erosões.

Desta forma os valores encontrados indicam

uma tendência de baixa velocidade no escoamento superficial, aumentando a possibilidade da infiltração de água no solo.

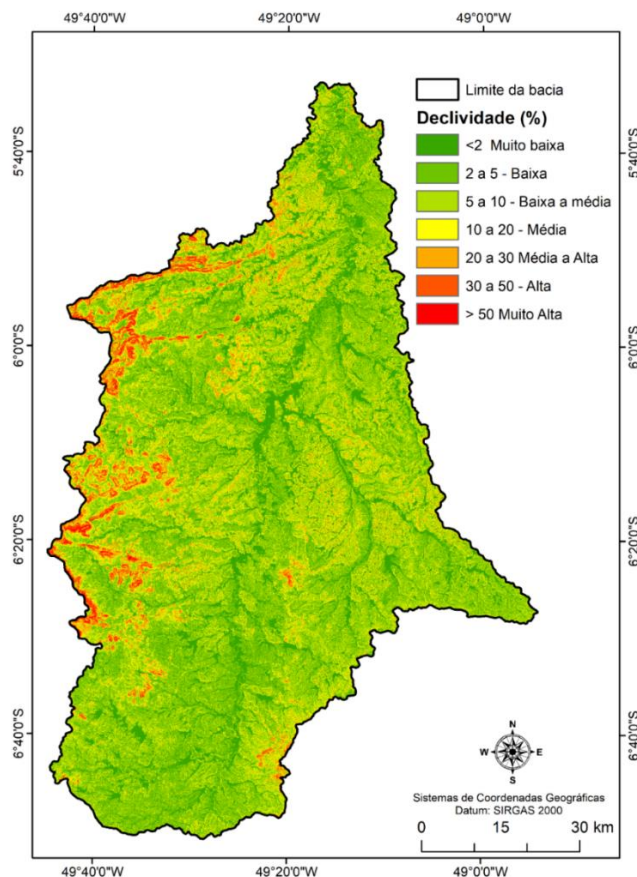


Figura 6 – Mapa de declividade da Bacia do Rio Vermelho, conforme classificação de Crepani et al (1996).

Característica da rede de drenagem

A Bacia do Rio Vermelho possui hierarquia fluvial de 6ª ordem, segundo a classificação proposta por Strahler (1952, segundo Christofolletti, 1980).

A quantidade de canais de 1ª, 2ª, 3ª, 4ª, 5ª e 6ª ordens e os seus respectivos comprimentos (km), bem como o comprimento médio dos canais, por ordem na bacia, estão discriminados na tabela 4 (APÊNDICE). Essa hierarquia também está ilustrada na figura 6, na qual pode ser observado o sentido sul-norte do rio principal.

Segundo Christofolletti (1980) o resultado obtido na relação de bifurcação nunca pode ser inferior a 2. Estes valores, em sua maioria, devem variar entre 3 e 5. Na Bacia do Rio Vermelho a relação variou de 4 a 5,35 tendo uma média de 4,52 (Tabela 5 - APÊNDICE).

A densidade de drenagem obtida foi de 0,73 km/km² e pode ser considerada baixa ($\leq 5,0$), de acordo com a proposta de Strahler (1957), assim como a densidade hidrográfica (Dh) de 0,34 km/km². Esses dados sugerem que a relação

entre a área da bacia e o comprimento dos rios é baixa (Silva & Melo, 2006).

O coeficiente de manutenção tem o objetivo de fornecer a área mínima necessária, para a manutenção de um metro de canal de fluvial (Santos & Morais, 2012). O resultado para a Bacia do Rio Vermelho demonstra que para um quilômetro quadrado existem 1.369,86 m de canal.

O gradiente do canal é um bom indicador da capacidade de transporte de sedimentos de um rio. O valor obtido para a BHRV foi de 36 %, o que demonstra que a área drenada por este sistema fluvial, naturalmente, não sofre uma grande pressão pela erosão fluvial.

A extensão do percurso superficial (Eps) é considerada como a distância média que um fluxo hídrico percorre, até chegar ao leito do rio. Este coeficiente é expresso por $Eps = 1/2Dd$. A extensão do percurso superficial foi de 0,68 km, ou seja, sabe-se que, em média, a cada distância de 0,68 km na vertente haverá um canal para escoamento das águas superficiais da Bacia do Rio Vermelho.

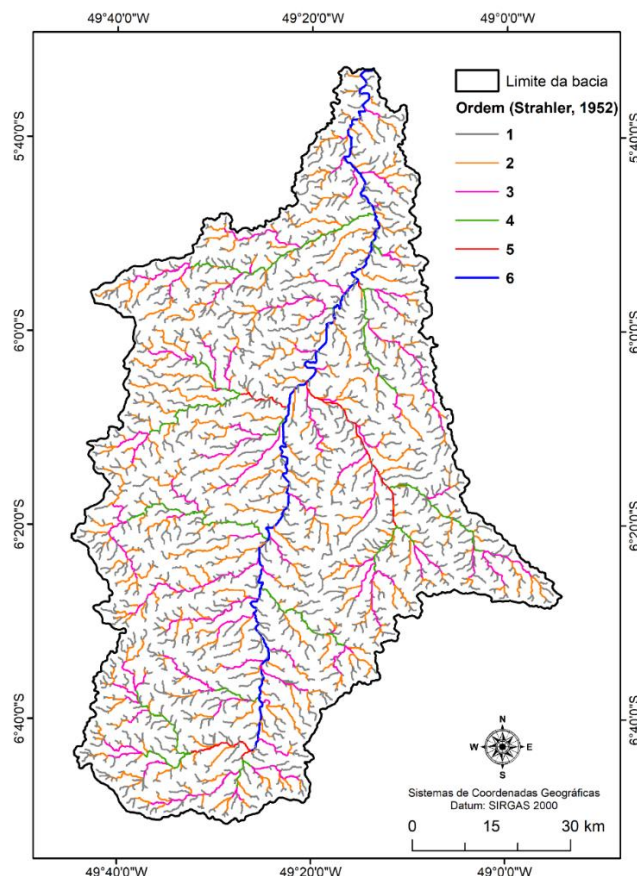


Figura 7 – Hierarquia fluvial da Bacia do Rio Vermelho.

Análise neotectônica

Em relação à análise morfométrica utilizada para identificar modificações neotectônicas, foi possível analisar quantitativamente 27 sub-bacias hidrográficas, baseado nos diferentes índices geomórficos (RDE, FA, HI, SFR e IAT), os quais revelaram a atuação de atividade tectônica, em diferentes graus de intensidade.

Relação Declividade-Extensão

O índice RDE foi aplicado em 16 drenagens, as quais foram divididas em 118 segmentos, que totalizam 744 km de extensão fluvial. A obtenção do índice RDE, por trecho, revelou indícios de anomalias de drenagem em todas as sub-bacias, com exceção da sub-bacia 20, posicionada no alto curso do Rio Vermelho. No geral, foram definidos 110 segmentos anômalos, perfazendo 93% do total de trechos de rio analisados (Tabela 6 - APÊNDICE). Os segmentos de drenagem estão espacializados, a partir dos valores obtidos, na relação entre o índice RDE por segmento e o índice RDE total do rio (Figura 7).

Fator de Assimetria

Os valores de FA variaram entre 0 e 34 (Tabela 7 - APÊNDICE). As sub-bacias foram classificadas de acordo com o valor de $|FA-50|$, no qual foram reconhecidas sub-bacias com baixa, média e alta assimetria. Valores próximos a

50 denotam bacias mais simétricas, enquanto valores distantes (abaixo ou acima) podem indicar alteração na inclinação do terreno decorrente de atividade tectônica ou erosão diferencial por controle litológico. Na área de estudo dez sub-bacias foram definidas como tendo o fator assimétrico relacionado ao controle litológico, e estas não foram incluídas no cálculo de FA.

O índice FA apresentou certa heterogeneidade na área, mas com uma concentração de sub-bacias com influência de controle externo, na porção oeste, e uma maior concentração de sub-bacias com média assimetria, na porção centro-leste (Figura 8).

Integral Hipsométrica

O cálculo de IH revelou valores baixos para todas as sub-bacias, exceto para a sub-bacia 12 que apresentou valor médio (Tabela 8 - APÊNDICE). Os valores altos de IH associam-se a terrenos jovens, onde a erosão é reduzida, o que sugere, embora não de maneira exclusiva, atividade tectônica recente e, os valores baixos, estão associados com paisagens antigas afetadas por processos erosivos por tempo prolongado. Deste modo, os baixos valores encontrados nas sub-bacias analisadas podem indicar que houve muita erosão nesses terrenos e que o relevo é mais antigo.

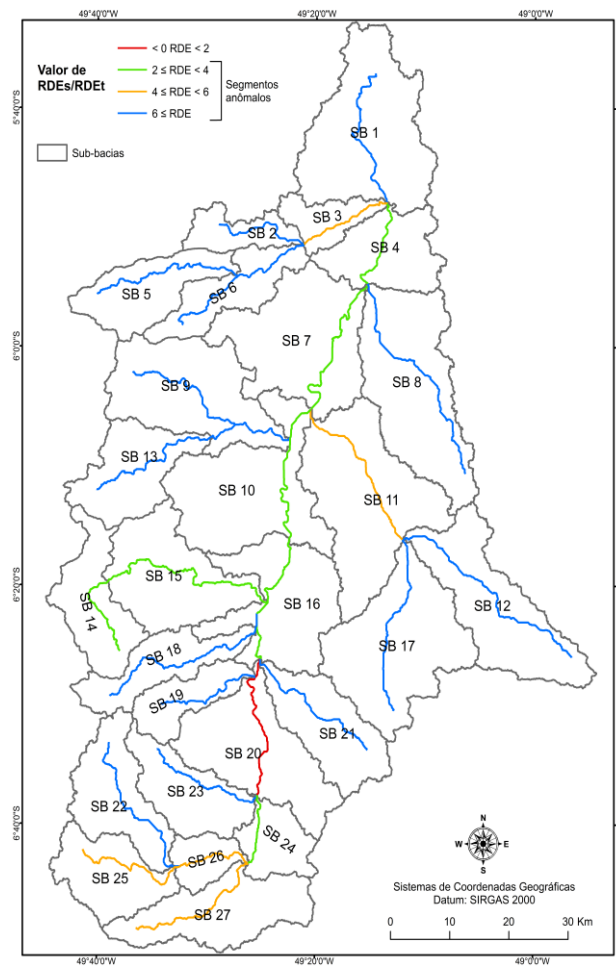


Figura 8 – Mapa da Relação Declividade-Extensão.

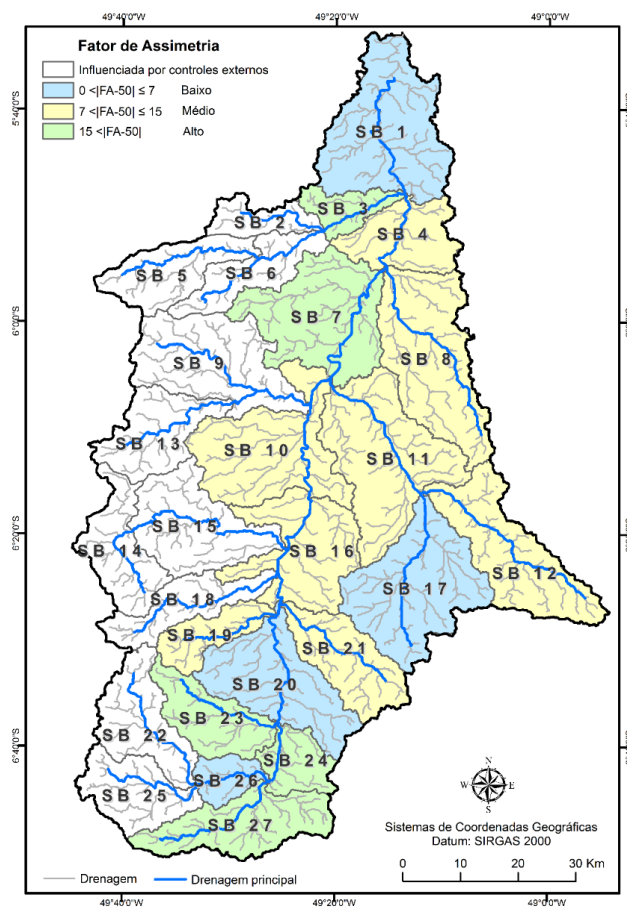


Figura 9 – Mapa do Fator de Assimetria.

Sinuosidade de Frente de Relevô

Neste trabalho, dezessete frentes de relevô foram identificadas e avaliadas, com valores de SFR contabilizados para cada sub-bacia (Tabela 9 - APÊNDICE).

Algumas sub-bacias apresentaram mais de uma feição com relevância, para a implementa o do cálculo e, portanto, foi preciso obter a média dos índices nestas sub-bacias. De modo geral, foi reconhecida uma alta atividade tectônica, aos índices de sinuosidade de frente de relevô, com baixos valores de SFR. Contudo, as sub-bacias 17, 18 e 19 obtiveram uma média atividade, no caso das duas primeiras, e uma baixa atividade tectônica, no caso da última, respectivamente. Em geral, os valores que indicam possíveis faces de relevô, decorrentes de processos tectônicos, estão próximos a 1,0 (El Hamdouni et al., 2008).

 ndice de Atividade Tectônica

A tabela 10 (APÊNDICE) apresenta todos os valores dos índices geomórficos (RDE, FA, IH e

SFR), transformados para valores de categoria de intensidade tectônica (CIT), a média dos CIT e os valores de IAT, referentes às 27 sub-bacias da presente pesquisa.

A  rea de estudo não apresentou nenhuma sub-bacia com IAT=4, sugerindo a presença de atividade tectônica em toda a área de estudo. Aproximadamente 44% da bacia corresponde à classe 1, com altíssima atividade tectônica, 37% corresponde a classe 2 com alta atividade tectônica e apenas 18% corresponde a classe 3 que indica uma moderada atividade tectônica (Figura 9).

A  rea de estudo não apresentou nenhuma sub-bacia com IAT=4, sugerindo a presença de atividade tectônica em toda a área de estudo. Aproximadamente 44% da bacia corresponde à classe 1, com altíssima atividade tectônica, 37% corresponde a classe 2 com alta atividade tectônica e apenas 18% corresponde a classe 3 que indica uma moderada atividade tectônica (Figura 9).

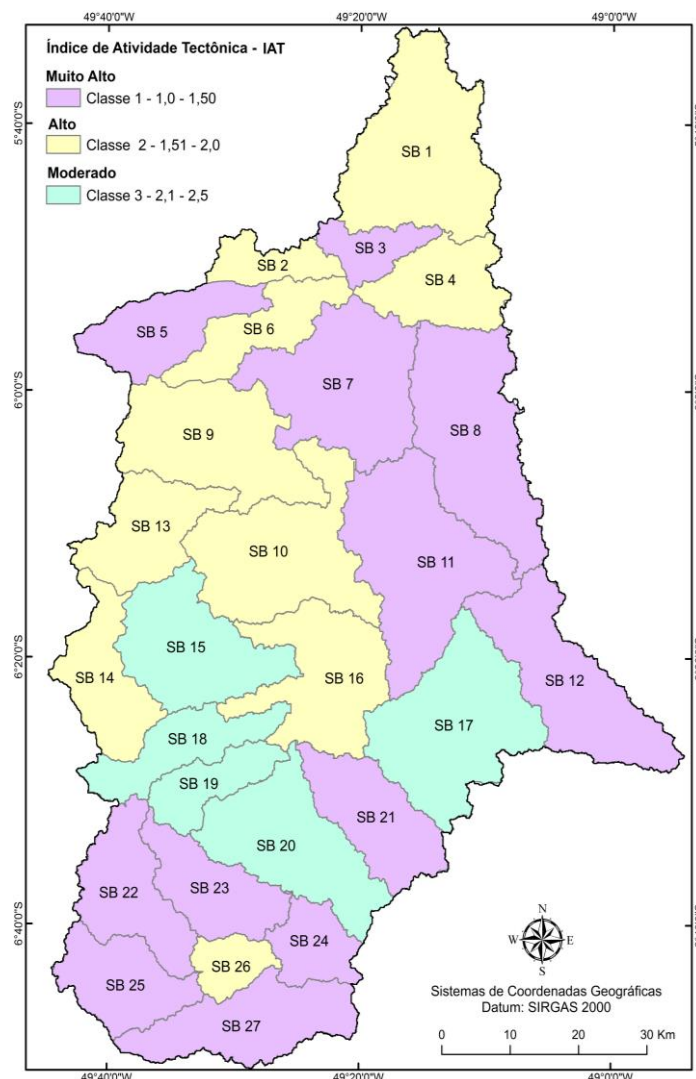


Figura 10 - Mapa do  ndice de Atividade Tectônica das sub-bacias com suas respectivas classes.

CONCLUSÕES

A análise morfométrica permitiu identificar que a BHRV é de 6ª ordem, de formato alongado e que em condições normais de precipitação apresenta-se pouco suscetível a enchentes. A predominância de valores baixos a médios de declividade combinado aos valores encontrados de comprimento de vertentes, densidade de drenagem e gradiente de canal sugerem que a área drenada por este sistema fluvial, naturalmente, não apresenta suscetibilidade erosiva ocasionada por escoamentos superficiais.

Os dados do MDE – ALOS PALSAR possibilitaram de forma eficaz a utilização de índices geomórficos como ferramenta de análise quantitativa de influência tectônica, sendo que os

índices RDE e FA foram os que apresentaram uma maior quantidade de sub-bacias sob alta influência tectônica.

Além disso, a combinação dos quatro índices geomórficos (RDE, FA, IH E SFR) gerou o índice IAT e permitiu avaliar a distribuição espacial da atividade tectônica relativa na área de estudo, o que revelou uma concentração da atividade tectônica muito alta, nas porções leste e sul da bacia, correspondendo a aproximadamente 44% da área, uma alta atividade tectônica nas porções oeste e norte, com cerca de 37% da área da bacia, e uma moderada atividade tectônica na porção centro-sul da bacia, correspondendo a 18% da área.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará – UNIFESSPA e à FAPESPA (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Pará), pelo auxílio à pesquisa e pela concessão de bolsa de Iniciação Científica à primeira autora.

REFERÊNCIAS

- ANDRADES FILHO, C.O. **Análise morfoestrutural da porção central da Bacia Paraíba (PB) a partir de dados MDE-SRTM e ALOS-PALSAR FBD**. São José dos Campos, 2010, 150 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.
- ANDRADES FILHO, C.O. & ROSSETTI, D.F. Intensidade da atividade tectônica na porção emersa da Bacia Paraíba e embasamento cristalino adjacente, Nordeste do Brasil. **Pesquisas em Geociências**, v. 42, n. 2, p. 113-130, 2015.
- BEMERGUY, R.L. & COSTA, J.B.S. Considerações sobre o sistema de drenagem da Amazônia e sua relação com o arcabouço tectono-estrutural. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi (Série Ciências da Terra)**, v. 3, p. 75-97, 1991.
- BJÖRNBERG, A.J.S. Microestrutura dos solos. In: NEGRO JÚNIOR, A. ET AL. (Editores), **Solos da cidade de São Paulo**. São Paulo: ABMS/ABEF, p. 89-109, 1992.
- BJÖRNBERG, A.J.S. **Contribuição ao estudo Cenozoico paulista: tectônica e sedimentologia**. São Carlos, 1969a. 128 p. Tese (Provedimento do cargo de Professor) – Universidade de São Paulo.
- BJÖRNBERG, A.J.S. Critério geomorfológico para determinação de áreas falhadas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 23, 1969, Salvador. **Resumo das conferências e das comunicações**. Salvador: Sociedade Brasileira de Geologia, 1969b, p. 65-66.
- BULL, W.B. & MC FADDEN, L.D. Tectonic geomorphology north and south of the Garlock fault, California. In: GEOMORPHOLOGY SYMPOSIUM, 8, 1977, Binghamton. **Resumos Expandidos...** Binghamton: IAG, 1977, p. 115-138.
- CARETTA, A.R. Análise Morfométrica da Bacia do Ribeirão Bom Jesus, Alto Rio Pardo SP/MG. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA, 6, 2006, Goiânia. **Anais...**Goiânia: VI SINAGEO e Regional Conference on Geomorphology, v. 1, p. 185-185, 2006.
- CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 200 p., 1980.
- COSTA, J.B.S.; IGREJA, H.L.S.; BORGES, M.S.; HASUI, Y. O quadro tectônico regional do Mesozoico na região Norte do Brasil. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, 3, 1991, Belém. **Anais...** Belém: SBG, 1991, p. 166-178.
- COSTA, J.B.S.; HASUI, Y.; BEMERGUY, R. L.; BORGES, M.S.; TRAVASSOS, W.; IGREJA, H.L.S. Aspectos Fundamentais da Neotectônica na Amazônia Brasileira. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM OF THE QUATERNARY OF THE AMAZONIA, 1, 1993, Manaus. **Resumos e Contribuições Científicas...**Manaus: UFAM/ INPA/ UNESCO, 1992, p. 103-106.
- COSTA, J.B. S. HASUI, Y, BEMERGUY, R.L., BORGES, M.S. Neotectônica da Região Amazônica: Aspectos tectônicos, geomorfológicos e deposicionais. **Geomomos**, v. 4, n. 2, p. 23-44, 1996
- CREPANI, E.; MEDEIROS, J.S.; AZEVEDO, L.G.; DUARTE, V.; HERNANDEZ, P. & FLORENZANO, T. **Curso de Sensoriamento Remoto Aplicado ao Zoneamento Ecológico-Econômico**. São José dos Campos: INPE, 18 p., 1996.
- DORANTI, C. **Contribuição ao estudo morfoestrutural do planalto de monte verde, a partir do uso de análise morfométrica da rede de drenagem e do relevo**. Rio Claro, 2003. Trabalho (Conclusão de Curso) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista.
- EL HAMDOUNI, R.; IRIGARAY, C.; FERNÁNDEZ, T.; CHACÓN, J.; KELLER, E. A. Assessment of relative active tectonics, southwest border of the Sierra Nevada (Southern Spain). **Geomorphology**, v. 96, n.1-2, p. 150-173, 2008.
- ETCHEBEHERE, M.L.; SAAD, A.R.; FULFARO, V.J.; PERINOTTO, J.A.J. Detection of neotectonic deformations along the Rio do Peixe Valley, western São Paulo state, Brazil, based on the distribuion of late quaternary allounits. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 6, n. 1, p. 109-114, 2004.
- GÓES, A.M. **A Formação Poti (Carbonífero Inferior) da Bacia do Parnaíba**. São Paulo, 1995. 171 p. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- GUEDES, I.C. **Aplicação de análise flúvio morfométrica na bacia hidrográfica do rio Santo Anastácio – SP para detecção de deformações neotectônicas**. Guarulhos, 2008. 114 p. Dissertação (Mestrado em Análise Geoambiental) – Centro de Pós-graduação e Pesquisa – CEPPE, Universidade de Guarulhos.
- HACK, J.T. Stream-profile analysis and stream-gradient index. **Journal Research of the U. S. Geological Survey**, v. 1, n. 4,

- p. 421-429, 1973.
- HARE, P.W. & GARDNER, T.W. Geomorphic Indicators of Vertical Neotectonism along Converging Plate Margins. Nicoya Peninsula, Costa Rica. In: MORISAWA, M. AND HACK, J.T. (Eds). **Tectonic Geomorphology**. Proceedings of the 15th Annual Binghamton Geomorphology Symposium, Boston, p. 123-134, 1985.
- HASUI, Y. Neotectônica e aspectos fundamentais da tectônica ressurgente no Brasil. In: WORKSHOP SOBRE NEOTECTÔNICA E SEDIMENTAÇÃO CENOZOICA CONTINENTAL NO SUDESTE BRASILEIRO, 1, 1990, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: Sociedade Brasileira de Geologia, 1990, p 1-31
- HASUI, Y. Sistema Orogênico Tocantins. In: HASUI, Y.; CARNEIRO, D.R.; ALMEIDA, F.F.M.; BARTORELLI, A. (Orgs), **Geologia do Brasil**. São Paulo: Beca, p. 289 – 313, 2012.
- HORTON, R.E. Drainage Basin Characteristics. **Translational American Geophysical Union**, v. 13, n. 1, p. 350-361, 1932.
- HORTON, R.E. Erosional development of streams and their drainage basins: Hydrographical approach to quantitative morphology. **Geological Society of America Bulletin**, v.56, n.2, p.275-370, 1945.
- IGREJA, H.S.; BORGES, M.S.; ALVES, R.J.; COSTA JÚNIOR, P.S.; COSTA, J.B.S. Estudos neotectônicos nas ilhas de Outeiro e Mosqueiro – Nordeste do Estado do Pará. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 36, 1990, Natal. **Anais...** Natal: Sociedade Brasileira de Geologia, v.3, p. 2110-2124, 1990.
- KELLER, E.A & PINTER, N. (Eds). **Active Tectonics: Earthquakes, Uplift, and Landscape**. 2ed. New Jersey: Prentice Hall, 362 p., 2002.
- LIMA, H.C. **Contribuição ao Estudo Geomorfológico do Planalto Sul de Minas a Partir do Uso de Termocronologia por Traços de Fissão em Apatitas e Análise Morfométrica da Rede de Drenagem**. Rio Claro, 2009, 62 p. Trabalho de Conclusão de Curso – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista.
- MISSURA, R. **Análise morfoestratigráfica da bacia do Ribeirão dos Poncianos-MG**. Rio Claro, 2005. 135 p. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista.
- OLIVEIRA, V.F.; SILVA FILHO, W.F.; NOGUEIRA NETO, J.A. Atividade neotectônica na borda norte da bacia do Araripe (Ceará-Brasil): evidências a partir de índices morfométricos. **Geociências**, v. 37, n. 3, p. 523-541, 2018.
- PÉREZ-PEÑA, J.V.; AZANÓN, J.M.; AZOR, A. CalHypso: an ArcGIS extension to calculate hypsometric curves and their statistical moments. Applications to drainage basin analysis in SE Spain. **Computers & Geosciences**, v. 35, n. 6, p. 1214-1223, 2009.
- PRUSKI, F.F. **Conservação de solo e água: práticas mecânicas para o controle da erosão hídrica**. 2.ed. Viçosa: UFV, 240 p., 2011.
- RODRIGUEZ, S.K. **Neotectônica e sedimentação quaternária na região da “Volta Grande” do rio Xingu, Altamira – PA**. São Paulo, 1993. 106 p. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- RODRIGUEZ, S.K. & SUGUIO, K. Gradientes hidráulicos das drenagens de 2ª ordem: uma contribuição para os estudos de neotectônica da “Volta Grande” do Rio Xingu, Altamira – PA. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 37, 1992, São Paulo. **Resumos expandidos...**São Paulo: Sociedade Brasileira de Geologia, 1992, p. 598-600.
- ROSSETTI, D.F. Interesse científico e econômico de rochas cretáceas. In: D.F. ROSSETTI, A.M.; GÓES, W. TRUCKENBRODT (Eds), **O Cretáceo na Bacia de São Luís-Grajaú**. Belém: Museu Paraense Emílio Goeldi, ed 1, p. 11-14, 2001b.
- ROSSETTI, D.F. & TRUCKENBRODT, W. Revisão estratigráfica para os depósitos do Albiano-Terciário Inferior (?) na Bacia de São Luís, Maranhão. **Boletim Museu Paraense Emílio Goeldi - Série Ciência Terra**, n. 9, p. 29-41, 1997.
- SAADI, A. Neotectônica da Plataforma Brasileira-esboço e interpretações preliminares. **Geonomos**, v. 1, n. 1 e 2, p. 1-15, 1993.
- SANTOS, J.O.S. Geotectônica dos Escudos das Guianas e Brasil-Central. In: L. A. Bizzi, C. Schobbenhaus, R. M. Vidotti e J. H. Gonçalves (Editores). **Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil**. Brasília: CPRM – Serviço Geológico do Brasil, p. 169-195, 2003.
- SANTOS, D.A.R. & MORAIS, F.D. Análise morfométrica da bacia hidrográfica do rio Lago Verde como subsídio à compartimentação do relevo da região de Lagoa da Confusão - TO. **Revista Geonorte**, Edição Especial, v. 3, n. 4, p. 617-629, 2012.
- SCHUMM, S.A. Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy. **Geological Society of America Bulletin**, v. 67, p. 597-646, 1956.
- SEEBER, L. & GORNITZ, V. River profiles along the Himalayan arc as indicators of active tectonics. **Tectonophysics**, v. 92, p. 335-367, 1983.
- SILVA, C.L. **Análise da tectônica cenozóica da região de Manaus e adjacências**. São Paulo, 2005, 282p. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas.
- SILVA, A.M. & MELLO, C.R. **Apostila de Hidrologia**. Universidade Federal de Lavras -MG, 2006.
- SILVA, A.J.P., LOPES, R.C., VASCONCELOS, A.M., BAHIA, R.B.C. Bacias Sedimentares Paleozoicas e Meso-Cenozoicas Interiores. In: L.A. BIZZI, C.SCHOBENHAUS, R.M. VIDOTTI, J.H. GONÇALVES (Eds), **Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil**. Brasília: CPRM– Serviço Geológico do Brasil, v. 2, p. 35-85, 2003.
- SOUZA, C.F.; PERTILLE, C.T.; CORRÊA, B.J.; VIEIRA, F.S. Caracterização Morfométrica da Bacia Hidrográfica do Rio Ivaí – Paraná. **Geoambiente On-Line**, n. 29, p. 93-110, 2017.
- STERNBERG, H.O.R. Vales tectônicos na planície amazônica. **Revista Brasileira de Geografia**, v. 12, n. 4, p. 3-26, 1950.
- STRAHLER, A.N. Hypsometric (area-altitude) analysis and erosional topography. **Geological Society of America Bulletin**, v. 63, n. 10, p. 1117-1142, 1952.
- STRAHLER, A.N. Quantitative analysis of watershed geomorphology. **Transactions: American Geophysical Union**, v.38, p. 913 – 920, 1957.
- TAKIYA, H. **Estudo da sedimentação neogênico-quaternária no município de São Paulo: caracterização dos depósitos e suas implicações na geologia urbana**. São Paulo, 1997. 152p. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- VILLELA, S.M. & MATTOS, A. **Hidrologia aplicada**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 245 p., 1975.

*Submetido em 21 de julho de 2020
Aceito para publicação em 17 de outubro de 2020*

APÊNDICE – TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros morfométricos analisados, com suas respectivas fórmulas, para a Bacia do Rio Vermelho. Elaborada a partir das propostas de Horton (1932; 1945), Miller (1953), Schumm (1956).

Características Geométricas		
Variável	Símbolo	Fórmula
Área da bacia	A	-
Perímetro da bacia	P	-
Comprimento axial da bacia	L	-
Densidade hidrológica	Dr	$Dr = N/A$
Índice de circularidade	Ic	$Ic = 12,57 \times (A/P^2)$
Fator de forma	Kf	$Kf = A/L^2$
Coefficiente de capacidade	Kc	$Kc = 0,28 \times (P/\sqrt{A})$
Características de Relevo		
Amplitude altimétrica máxima da bacia	Hm	$Hm = Hmax - Hmin$
Relação de relevo	Rr	$Rr = Hm/Lc$
Índice de rugosidade	Ir	$Ir = Hm \times Dd$
Índice de sinuosidade	Is	$Is = Lc/Ev$
Características da Rede de Drenagem		
Comprimento total dos canais	Lt	-
Comprimento do canal principal	Lc	-
Comprimento vetorial do canal principal	Lv	-
Altitude da nascente do canal principal	H	-
Altitude da foz do canal principal	h	-
Densidade de drenagem	Dd	$Dd = Lt/A$
Coefficiente de bifurcação	Rb	$Rb = Nu/Nu + 1$
Coefficiente de manutenção	Cm	$Cm = (1/Dd) \times 1000$
Gradiente do canal principal	Gc	$Gc = H-h \times 100 / LC$
Extensão do percurso superficial	Eps	$1/2Dd$
Ordem da bacia	-	-

Tabela 2 - Características morfométricas, quanto à geometria, relevo e rede de drenagem para a Bacia do Rio Vermelho.

Características Geométricas	
Variável	Resultados
Área da bacia	7003,59 km ²
Perímetro da bacia	532,44 km
Comprimento axial da bacia	146,24 km
Densidade hidrológica	0,34 Canais/km ²
Índice de circularidade	0,31
Fator de forma	0,327
Coefficiente de capacidade	1,78
Características de Relevo	
Amplitude altimétrica máxima da bacia	701 m
Relação de relevo	3,89 m
Índice de rugosidade	0,518
Índice de sinuosidade	1,37
Características da Rede de Drenagem	
Comprimento total dos canais	5136,28 km
Comprimento do canal principal	180,15 km
Comprimento vetorial do canal principal	131,66 km
Altitude da nascente do canal principal	131 m
Altitude da foz do canal principal	66 m
Densidade de drenagem	0,73 km/km ²
Coefficiente de bifurcação	4,52
Coefficiente de manutenção	1369,86 m
Gradiente dos canais	36%
Extensão do percurso superficial	0,68 km
Ordem da bacia	6

Tabela 3 – Distribuição das classes de declividade na Bacia do Rio Vermelho.

Declividade	Intervalo	Área da bacia (%)
Muito baixa	< 2	10,76
Baixa	2 - 5	26,09
Baixa a média	5 - 10	27,06
Média	10 - 20	19,83
Média a alta	20 - 30	10,5
Alta	30 - 50	4,23
Muito alta	>50	1,55

Tabela 4 – Ordem dos canais, número de canais, comprimento total de canais por ordem e comprimento médio dos canais por ordem da Bacia do Rio Vermelho.

Ordem dos Canais	Número de Canais	Comprimento Total (km)	Comprimento Médio dos Canais (km)
1	1846	2528,73	1,37
2	416	1342,64	3,23
3	91	729,43	8,02
4	17	286,25	16,84
5	4	69,08	17,27
6	1	180,15	180,15

Tabela 5 – Relação de bifurcação da Bacia do Rio Vermelho.

Ordem dos Canais	Número de Canais	Relação de Bifurcação
1	1846	-
2	416	4,44
3	91	4,57
4	17	5,35
5	4	4,25
6	1	4
		Média = 4,52

Tabela 6 – Valores para Relação Declividade-Extensão.

Sub-bacias	Cota Superior (m)	Cota Inferior (m)	Diferença Altimétrica (m)	Extensão Sinuosa (m)	Extensão Em Linha Reta (m)	In L	RDE Trecho	RDE Total	RDE Real	CIT
Rio Vermelho	201	92	109	195675	137974	11,835	76,858	9	8,3449	1
B1	109	96	13	28783	137974	11,835	62,317	9	6,9241	1
B2	178	126	52	19491	14777	9,6008	39,424	5	7,2788	1
B3	126	109	17	17637	39410	10,582	37,987	8	5,0246	2
B4	112	109	3	17267	119778	11,693	20,81	9	2,3123	2
B5	257	153	104	31511	23776	10,076	78,471	10	7,603	1
B6	189	126	63	30446	23964	10,582	49,587	8	6,1984	1
B7	118	112	6	30835	106896	11,58	20,8	9	2,3111	2
B8	167	112	55	40800	33495	10,419	45,153	5	8,5537	1
B9	221	119	102	37926	28485	10,257	76,609	10	7,7038	1
B10	127	118	9	26822	85446	11,356	28,671	9	3,1857	2
B11	136	118	18	29509	58235	10,972	35,522	6	5,8173	1
B12	185	136	49	41065	33708	10,972	40,221	6	6,7036	1
B13	221	134	87	28361	25321	10,139	77,675	9	9,0526	1
B14	224	181	43	16685	10834	10,158	27,921	9	3,0496	2
B15	181	131	50	39152	25788	10,158	32,933	9	3,6592	2
B16	138	126	12	24702	65485	11,09	31,812	9	3,5347	2
B17	169	136	33	31245	26326	10,178	27,805	3	8,5759	1
B18	255	132	123	37010	27617	10,226	91,783	12	7,6308	1
B19	186	138	48	21184	16443	9,7077	37,258	5	7,5351	1
B20	146	138	8	26918	46490	10,747	13,817	9	1,5352	3
B21	182	138	44	28139	22625	10,027	35,378	4	8,062	1
B22	227	169	58	30538	22464	10,02	42,665	6	7,3705	1
B23	243	145	98	24190	18129	9,8053	73,445	10	7,3485	1
B24	156	146	10	12613	28941	10,273	22,945	9	2,5495	2
B25	210	169	41	23973	16600	10,237	28,39	5	5,2841	2
B26	169	155	14	14646	27911	10,237	26,68	5	5,336	2
B27	206	155	51	27858	21349	9,9688	39,084	9	4,3427	2

Tabela 7 – Índice FA e variáveis consideradas no seu cálculo para as sub-bacias do Rio Vermelho.

Sub-bacias	Área a direita (km ²)	Área da bacia (km ²)	FA	Fa-50	CIT
B1	220,74	442,57	49,87834281	0	3
B2	37,66	93,74	40,17322411	10	2
B3	63,95	91,34	70,01198705	20	1
B4	81,61	199,53	40,90392246	9	2
B5	66,62	199,73	33,35834214	17	1
B6	80,79	169,55	47,64983551	2	3
B7	309,32	400,56	77,22175002	27	1
B8	252,97	423,12	59,78739347	10	2
B9	188,93	361,30	52,29177731	2	3
B10	314,68	399,73	78,72308929	29	1
B11	275,64	453,60	60,76761655	11	2
B12	208,20	346,92	60,01330267	10	2
B13	102,01	214,61	47,53099865	2	3
B14	155,81	203,60	76,52894423	27	1
B15	136,51	307,03	44,46027346	6	3
B16	112,54	314,60	35,77189418	14	2
B17	194,67	422,15	46,11501802	4	3
B18	95,14	173,49	54,8380776	5	3
B19	72,82	124,03	58,71309911	9	2
B20	170,53	334,30	51,01008826	1	3
B21	139,03	227,77	61,04137503	11	2
B22	74,56	225,12	33,1207744	17	1
B23	40,14	194,09	20,68059909	29	1
B24	18,51	117,46	15,76035915	34	1
B25	51,15	194,61	26,28249012	24	1
B26	41,91	79,81	52,51345075	3	3
B27	76,23	264,96	28,76997797	21	1

Tabela 8 – Valores para a Integral Hipsométrica.

Sub-bacias	Cota Mínima	Cota Máxima	Cota Média	IH	CIT
B1	50	315	102	0,20	3
B2	95	457	188	0,26	3
B3	76	315	121	0,19	3
B4	75	275	107	0,16	3
B5	119	699	268	0,26	3
B6	93	547	155	0,14	3
B7	76	355	127	0,18	3
B8	79	219	131	0,37	3
B9	91	672	182	0,16	3
B10	81	516	140	0,14	3
B11	82	234	141	0,39	3
B12	105	239	159	0,40	2
B13	105	514	206	0,25	3
B14	154	735	260	0,18	3
B15	104	570	184	0,17	3
B16	97	412	143	0,15	3
B17	105	383	157	0,19	3
B18	105	751	225	0,19	3
B19	109	359	178	0,28	3
B20	109	393	151	0,15	3
B21	109	247	159	0,36	3
B22	143	502	215	0,20	3
B23	121	413	183	0,21	3
B24	120	433	167	0,15	3
B25	144	361	192	0,22	3
B26	127	217	154	0,30	3
B27	128	432	172	0,14	3

Tabela 9 – Índice SFR e variáveis consideradas no cálculo para as sub-bacias da área de estudo.

Sub-bacias	Frentes	LMF	LS	SFR	CIT
B2	F1	2.568	2.537	1,021621	1
	F2	5.816	5.641		
B5	F4	5.852	5.750	1,0177391	1
B6	F3	3.505	3.462	1,0183624	1
	F5	2.613	2.551		
B9	F6	2.561	2.365	1,0828753	1
B10	F7	3.172	3.051	1,0396591	1
B14	F8	2.718	2.427	1,0825322	1
	F10	4.701	4.310		
	F11	2.524	2.434		
B14/B15	F9	7.155	6.969	1,0376215	1
	F12	3.153	3.007		
B15	F13	3.231	3.060	1,0558824	1
B16	F14	3.672	3.368	1,0902613	1
B17	F15	5.393	3.648	1,4783443	2
B18	F17	3.303	2.977	1,1095062	2
B19	F16	4.709	2.016	2,3358135	3

Tabela 10 – Índice de Atividade Tectônica para as sub-bacias da área de estudo.

Sub-bacias	RDE	FA	SFR	IH	Média das CIT	IAT
B1	1	3	0	3	1,75	2
B2	1	2	1	3	1,75	2
B3	2	1	0	3	1,50	1
B4	2	2	0	3	1,75	2
B5	1	1	1	3	1,50	1
B6	1	3	1	3	2,00	2
B7	2	1	0	3	1,50	1
B8	1	2	0	3	1,50	1
B9	1	3	1	3	2,00	2
B10	2	1	1	3	1,75	2
B11	1	2	0	3	1,50	1
B12	1	2	0	2	1,25	1
B13	1	3	0	3	1,75	2
B14	2	1	1	3	1,75	2
B15	2	3	1	3	2,25	3
B16	2	2	1	3	2,00	2
B17	1	3	2	3	2,25	3
B18	1	3	2	3	2,25	3
B19	1	2	3	3	2,25	3
B20	3	3	0	3	2,25	3
B21	1	2	0	3	1,50	1
B22	1	1	0	3	1,25	1
B23	1	1	0	3	1,25	1
B24	2	1	0	3	1,50	1
B25	2	1	0	3	1,50	1
B26	2	3	0	3	2,00	2
B27	2	1	0	3	1,50	1