Rupturas de declive fluvial em basaltos hipoialinos: natureza e características

Diego Moraes Flores[1]
Adalto Gonçalves Lima
Déborah de Oliveira

RESUMO: *A compreensão sobre a formação de rupturas de declive em perfis longitudinais de leito rochoso, em basaltos continentais ainda é incipiente. A formação de knickpoints e knickzones está atrelada a condições estruturais dos basaltos e de incidência de lineamentos estruturais. Nesta pesquisa foi analisado perfil longitudinal de rio de leito rochoso de basalto hipoialino. O objetivo foi caracterizar as zonas de ruptura do perfil longitudinal do rio Maracujá, que incide sobre os derrames superiores do Grupo Serra Geral localizado na cidade de Guarapuava (PR). A ideia é compreender quais são os controles essenciais desta litologia que embasa o leito do rio. Efetuou-se análise a partir do uso de base cartográfica digital manipulada em ambiente GIS, na escala 1:10.000, com levantamentos de campo e uso da relação declive-área para interpretação dos dados. O perfil do rio é escalonado devido a duas causas principais: lineamentos estruturais transversais ao leito fluvial e a diferença de resistência erosiva entre níveis de derrame dos basaltos. O índice de concavidade (0,5) reportou tendência de equilíbrio fluvial com baixa relação positiva do ajuste (R^2 = 0,4) do modelo de regressão para o perfil integral. Contudo, a separação em segmento de rio mais homogêneo indica tendência de ajuste hidráulico para o índice de concavidade (1,2) e relação mais alta do modelo de regressão (R^2 = 0,7). Os mesmos valores altos de ajustes dos subsegmentos discretizados permitiram interpretar que a potência de escoamento tem se sobressaindo em relação a resistência erosiva dos basaltos hipoialinos, mesmo com a incidência de lineamentos estruturais e diferenciação nos níveis de derrames basálticos.*

Palavras-chave: *Perfil Longitudinal; Basaltos; Rupturas de Declive; Resistência Erosiva.*

Fluvial slope ruptures in basalts: nature and characteristics

ABSTRACT: *The understanding of the formation of slope ruptures, in longitudinal profiles in bedrock rivers about continental basalts is still incipient. The formation of knickpoints and knickzones is linked to structural conditions of basalts and especially incidence of structural lineaments. This research analyzed longitudinal profile at bedrock river of basalt. The goal was characterize the breaks and rupture zones of the longitudinal profile Maracujá River, which focuses on the upper stroke of the Serra Geral Group located in Guarapuava (PR). The idea is to understand what are essential controls this basement riverbed. Analysis was executed with use digital cartographic base manipulated in GIS environment, with scale 1: 10,000 the field surveys and uses slope-area analysis to interpretation of the data compiled. Convexities river profile occurs due two main causes: the transverse structural lineaments in riverbed and difference erosive resistance between basis level layers basalts and basis volcanic stroke. The concavity index (0.5) reported trend of the fluvial equilibrium with low positive relationship adjustment (R2 = 0.4) of the regression model to entire profile. However, the separation into more homogeneous segment,*

[1]Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Geografia Física, FFLCH, Universidade de São Paulo, diegomoraesf@hotmail.com

indicates river hydraulic adjustment tendency toward concavity index (1.2) and higher ratio regression model (R2 = 0.7). The same high value adjustments, the discretized subsegments allowed to interpret that the stream power is protruding with respect to erosive resistance of basalts, even with the incidence of structural lineaments and differentiation levels of basaltics.

Key-words: *Longitudinal Profile; Basalts; Slope Ruptures; Erosive Resistance.*

Introdução

Os perfis longitudinais de rios tendem a evoluir para formas côncavas (PAZZAGLIA *et.al*., 1998). A presença de rupturas de declive (knickpoints) ou zonas de maior declividade (knickzones) é interpretada como uma interferência gerada por mudança na resistência das rochas do substrato (HACK, 1973; SNYDER *et. al*., 2000; KIRBY e WHIPPLE, 2001; WHIPPLE e TUCKER, 2002; LIMA, 2009,2012, 2014), aporte de sedimentos grossos de afluentes, rebaixamentos no nível de base (SEIDL *et. al*., 1994; STOCK e MONTGOMERY, 1999) ou ainda falhamentos e soerguimentos tectônicos (WHIPPLE *et. al*., 2000; WOBUS, *et. al*., 2006; KIRBY *et. al*., 2013).

Em rios desenvolvidos sobre basaltos a morfologia dos perfis longitudinais é essencialmente escalonada (SEIDL *et. al*., 1994), ou seja, com a presença de muitos knickpoints e knickzones. Esse escalonamento é devido, em princípio, às diferenças de erodibilidade entre zonas internas dos derrames vulcânicos (HACK, 1973; KIRBY e WHIPPLE, 2001; WHIPPLE e TUCKER, 2002; LIMA, 2009,2012, 2014; LIMA e BINDA, 2013, 2015). Entretanto, tem sido demonstrado recentemente que a tectônica pretérita e atual tem papel fundamental na geração de grande parte das knickzones fluviais em derrames espessos e tabulares dos basaltos continentais da Bacia do Paraná (LIMA, 2009, 2012, 2014; LIMA e BINDA, 2013, 2015).

Diferente dos grandes derrames tabulares que formam a unidade inferior do Grupo Serra Geral da Bacia do Paraná, os basaltos hipoialinos formam a unidade básica superior do referido grupo (MINEROPAR, 2013) e sua natureza petrológica e petrográfica é bem distinta. Esses basaltos caracterizam-se pela composição hipoialina, altos valores de TiO_2 (MINEROPAR, 2013) e derrames tabulares em multicamadas, com fraturamento vertical denso (~5-20 cm). O tamanho reduzido dos blocos basálticos sugere uma resistência erosiva menor que dos basaltos maciços da unidade inferior, onde o espaçamento médio das fraturas é maior. Outro aspecto que diferencia os basaltos hipoialinos em termos de sua resposta potencial à erosão fluvial é sua homogeneidade estrutural, o que implicaria em desenvolvimento de perfis longitudinais com maior tendência à concavidade. Entretanto, conforme observações de campo e levantamentos topográficos, não foi

o ocorrido. Os rios desenvolvidos em basaltos hipoialinos apresentam perfis frequentemente escalonados. Como se caracterizam essas rupturas e zonas de ruptura em termos do perfil longitudinal e em campo e quais são os controles potenciais sobre elas? Essas são as questões que os resultados da presente pesquisa procuram iniciar a responder.

A morfologia dos perfis longitudinais em basaltos hipoialinos não tem sido ainda contemplada pelos estudos geomorfológicos. As considerações da presente realizada, aqui discutidas de forma ainda que sucinta e preliminar, visam contribuir para o conhecimento geomorfológico dos rios desenvolvidos sobre os basaltos hipoialinos. Além disso, este artigo busca complementar pesquisas já realizadas (LIMA, 2009, 2012, 2014; LIMA e BINDA, 2013, 2015) sobre a geomorfologia fluvial em litologias vulcânicas do Grupo Serra Geral.

Caracterização da área de estudo

O rio Maracujá localiza-se no município de Guarapuava (PR) região centro-sul do estado do Paraná (Fig. 1). O referido rio corre sobre o Membro Três Pinheiros classificado por recente publicação (2013) da Mineropar (Serviço Geológico do Paraná) como pertencente à formação Candoí, formações rochosas que compõem os derrames superiores do Grupo Serra Geral. Como o objetivo aqui não é discutir os critérios de classificação de membros e formações aderiu-se a classificação realizada pela instituição estadual oficial.

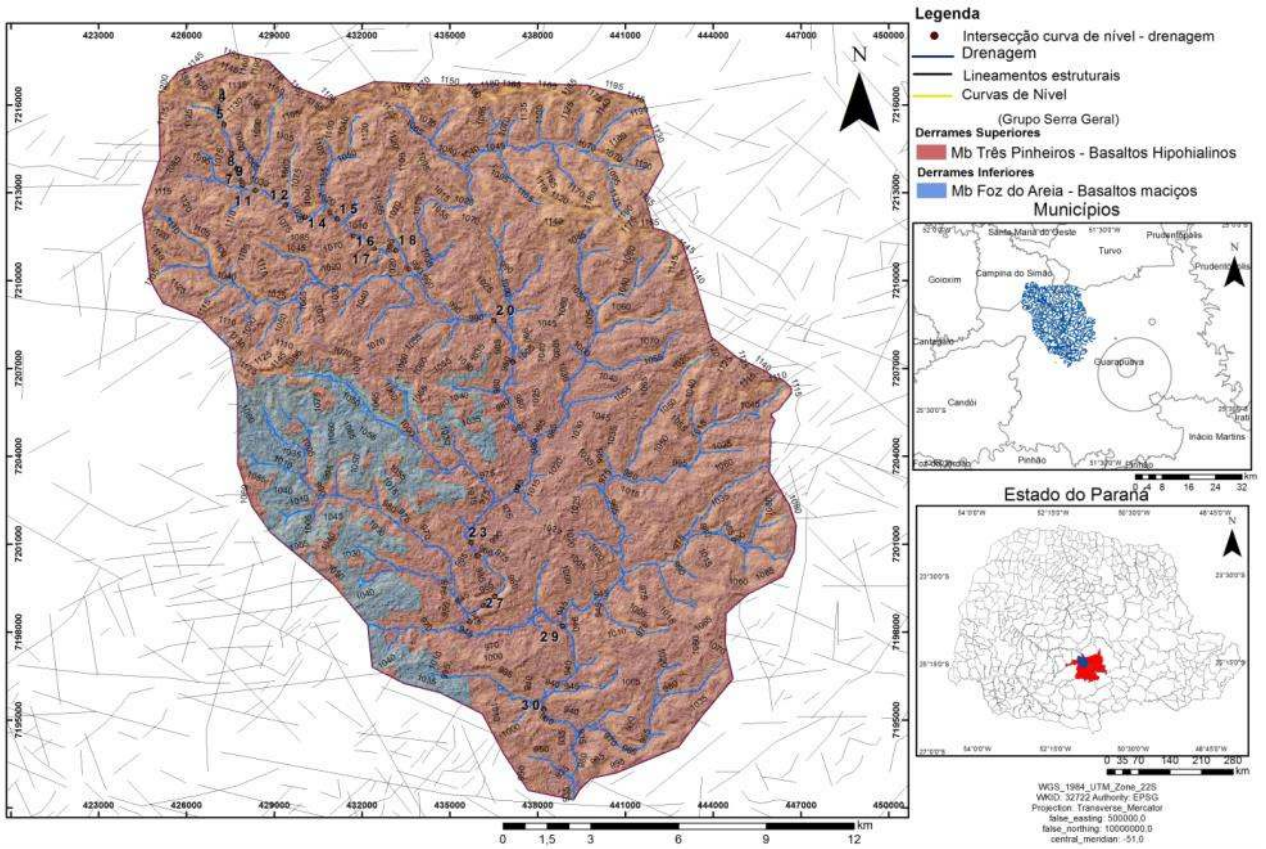


Figura 1: Bacia hidrográfica do Rio Maracujá com as formações litológicas subjacentes, segundo Mineropar (2013).
Fonte: Autores (2017).

Segundo a Mineropar (2013) o membro Três Pinheiros que abrange o leito do rio Maracujá apresenta duas litologias distintas quanto ao tipo do derrame: derrames tabulares de base e derrames delgados de basalto hipoialino. Os basaltos hipoialinos, são mais comuns ao longo do leito e são evidentes nestes, os entablamentos em leque e em blocos prismáticos irregulares, pertencentes à zona central do derrame vulcânico. Onde isortemas de contração de fluxo criadas pela percolação da água formaram colunatas de menor espaçamento entre as fraturas de resfriamento. A rocha do leito possui textura afanítica com pouco ou quase nenhum mineral cristalizado.

Os derrames tabulares e espessos de basalto com textura mais fanerítica, possuem disjunção colunar mais regular, compõem as colunatas inferiores de base do derrame e são menos comuns ao longo do leito fluvial (mas não inexistentes). Os basaltos hipoialinos podem constituir a cobertura dos derrames tabulares, bem como, ocorrerem isolados, assumindo localmente feições de derrames lobados (MINEROPAR, 2013), (Fig. 2).



Figura 2: Na imagem A, exemplar de basalto hipoialino do leito do rio com marcas de fraturamento por resfriamento rochoso (marcas de bisel). Localização: 437167E; 7205944S. Na imagem B, basalto de outro trecho do rio Maracujá com aspecto textural mais fanerítico e com menor densidade de fraturas pertencente a base do derrame. Localização: 435934.19 m E; 7209119.64 m S.
Fonte: Autores (2017).

Observações sobre trechos do leito do rio Maracujá indicaram que a calha do rio sobre os basaltos hipoialinos corre predominantemente sobre zona de núcleo dos derrames (Fig. 3), mais especificamente sobre zona de entablatura.

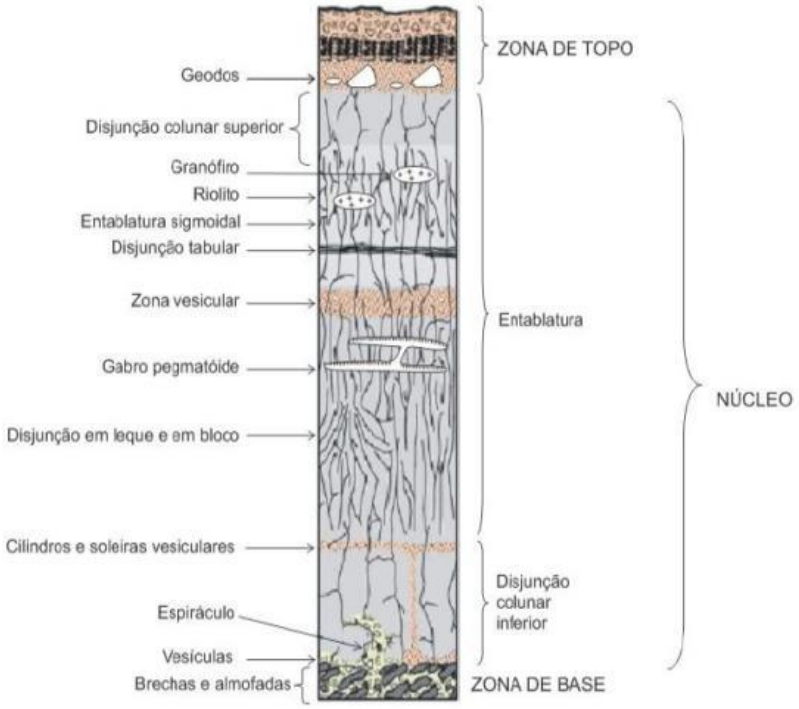


Figura 3: Modelo usual para os derrames máficos existentes na bacia sedimentar do Paraná.
Fonte: Mineropar (2013) modificado de Martin *et. al*. (2005).

A disjunção em leque é uma característica observada em pontos de afloramento de perfil rochoso de encosta ou em cavas de mineração do basalto hipoialino (Fig. 4 A-B). Nestes locais, as colunatas da zona de entablatura chegam a 20 cm de dimensão vertical e 7 cm de largura entre as fraturas de resfriamento (Fig. 4 C). Na média, apresentam pelo menos 25 fraturas a cada 2 m de extensão horizontal (medido nos afloramentos de perfis desta e de outras localidades visitadas), sem identificação clara de transição com zona de topo de derrame ou base.

Apenas em trechos específicos do leito fluvial são identificadas características de disjunção colunar com maior espaçamento das fraturas e com densidade de fraturas menor do que o observado em afloramentos de zona de entablatura. Trechos de leito fluvial, exposto e contíguos ao leito apresentam vesículas e/ou amígdalas com preenchimento de minerais silicáticos (Fig. 4 D). Mas não em quantidade e disposição estrutural suficiente, que se possa afirmar como zona de transição para o topo ou base de derrame. A possibilidade seja que estes minerais estejam associados a zonas restritas de soleiras ou cilindros vesiculares, conforme modelo de Martin *et. al*. (2005), com alguma cristalização de minerais silicáticos.

Os basaltos do membro Foz do Areia, embora aflorem na porção oeste da bacia não foram visualizados no leito fluvial do rio Maracujá.

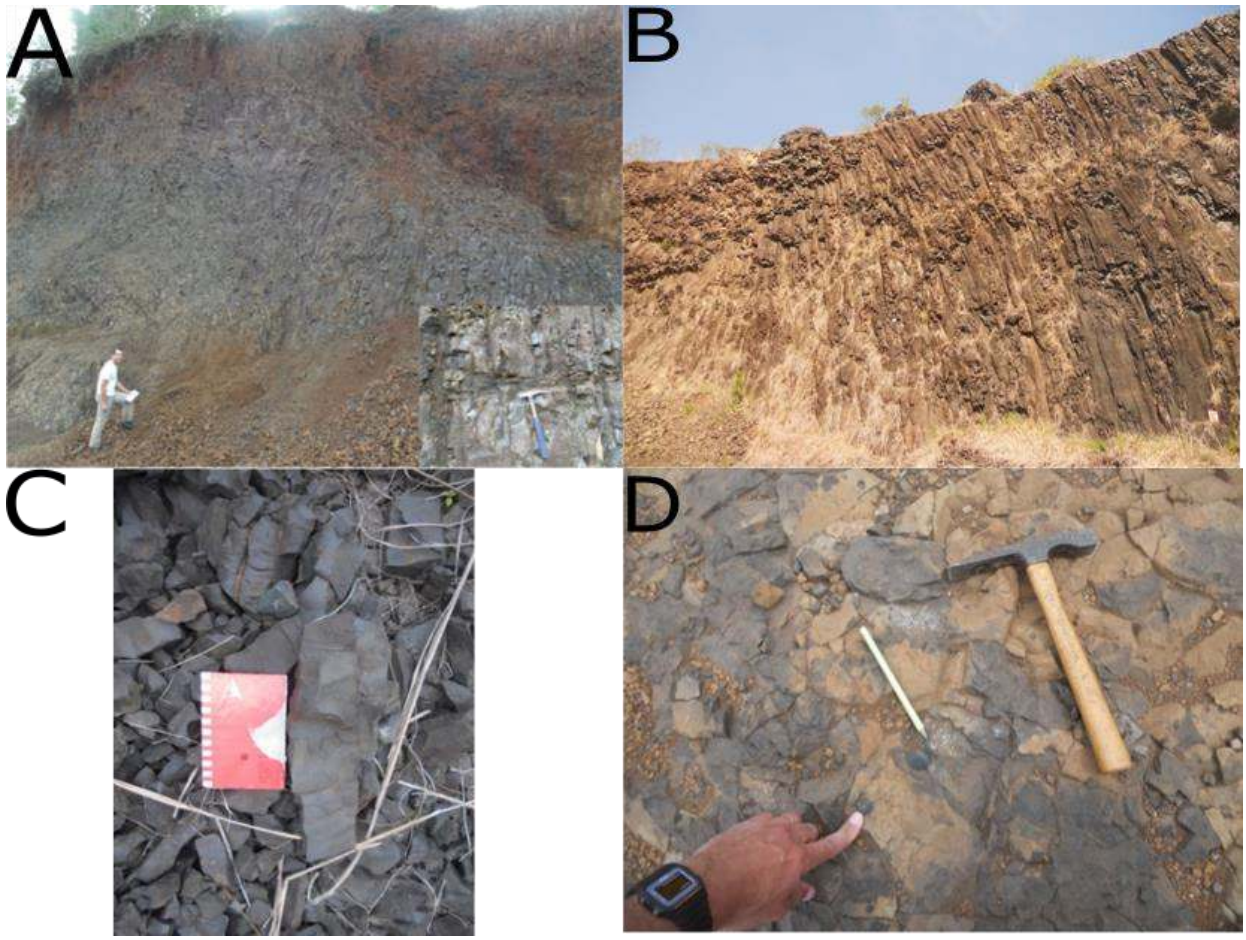


Figura 4. Em A, Afloramento de basalto hipovítreo localizado em pedreira (cota 1018 m), com disjunção em leque ao centro e fraturado em colunas e blocos prismáticos, característicos desta litologia. O mesmo pode ser visto em B, divisor de bacia do rio Campo Real e bacia do rio Maracujá (cota 978 m). Em C colunata de aproximadamente 20 cm, desprendida de perfil em área de cava da foto B. Em D, trecho às margens do rio Maracujá, com fraturamento em blocos característicos dos basaltos hipoialinos. Neste ponto (cota 997 m) foi observada a presença de mineral silicático (celadonita), mas sem a constatação precisa se em zona de topo ou base do derrame. Localização: 438781m E; 7205529 m S. Fonte: Autores (2017).

Metodologia

A partir de imagens SRTM (30 m), confeccionou-se carta topográfica digital na escala 1: 10.000, com curvas de nível de equidistância de 5 m, através de ferramentas em ambiente GIS. Ainda sobre com as imagens SRTM foram identificados os lineamentos estruturais presentes na área de estudo, complementando com os dados de lineamentos obtidos pela Mineropar (2013). Sobre a carta topográfica gerada foi delimitada a drenagem do rio Maracujá e extraído seu perfil longitudinal. Para cada trecho do perfil, situado entre duas curvas de nível consecutivas, foi calculada a declividade. Posteriormente, delimitou-se a área de drenagem de cada ponto de interseção das curvas de nível com o rio. Os valores gerados para cada trecho (distância da nascente, declividade e área de drenagem) foram, então, exportados para uma planilha eletrônica.

Os dados de declividade e área de drenagem permitiram estabelecer a chamada relação declive-área. Esta é obtida por uma função potência (equação 1), onde S é a declividade (m/m) e A é área de drenagem (km²):

$$S = k_s A^{-\theta} \quad (1)$$

Nessa equação, k_s representa o índice de declividade e θ é o índice de concavidade do perfil. Os dados obtidos da relação permitem interpretar a evolução erosiva dos perfis e seus ajustes morfológicos em função da ação hidráulica. Em ambiente sem atividade tectônica ou com uniformidade de soerguimento, a tendência dos dados de plotagem é indicar diminuição das declividades à jusante, ao passo que aumenta a área de drenagem. Caso haja diferenciação acerca da resistência erosiva, fornecida pela litologia do leito e/ou interferência tectônica ao longo do perfil do rio a tendência côncava do perfil longitudinal do rio não ocorrerá. Isto se mostrará na relação declive-área, com maior dispersão dos pontos na plotagem dos dados. Neste caso, o coeficiente de determinação (R^2), que mede o ajuste dos dados à linha de tendência produzida pelo modelo de regressão, terá valor mais baixo (LIMA, 2012, 2014).

Foram realizadas diversas campanhas de campo, que serviram para averiguar as características litológicas dos derrames, seu padrão de fraturamento e intemperismo. No rio Maracujá os campos permitiram a identificação das formas e processos de erosão nos trechos rochosos, sobretudo nas knickzones.

Resultados

Morfologia do perfil longitudinal e características estruturais de fraturamento dos basaltos

O rio Maracujá apresenta morfologia escalonada ao longo do seu perfil longitudinal, esse escalonamento ocorre em função da presença de zonas de ruptura de declive associadas à ocorrência de lineamentos estruturais ou a área de resistência litológica diferencial presente no leito fluvial.

Foram identificadas com mais precisão no perfil do rio, pelo menos, seis rupturas de declive, formadoras de zonas convexas (Fig. 5). Destas apenas três parecem ligadas diretamente a incidência de lineamentos no traçado do rio, sendo estes trechos convexos, pertinentes aos pontos 9, 24-25 e 28 do perfil do rio.

Nestes intervalos de pontos e outros com incidência indireta de lineamentos, constatou-se a partir do mapeamento, pela observação do perfil longitudinal construído e saídas a campo, que a

migração a montante de knickpoints pertencentes às frentes de rupturas já se encontram, em alguns casos, em estágio relativamente avançado de retração, em relação aos pontos onde foram traçados alguns dos lineamentos. Caso, por exemplo, do ponto 28, distante pelo menos 1 km da linha do lineamento estrutural.

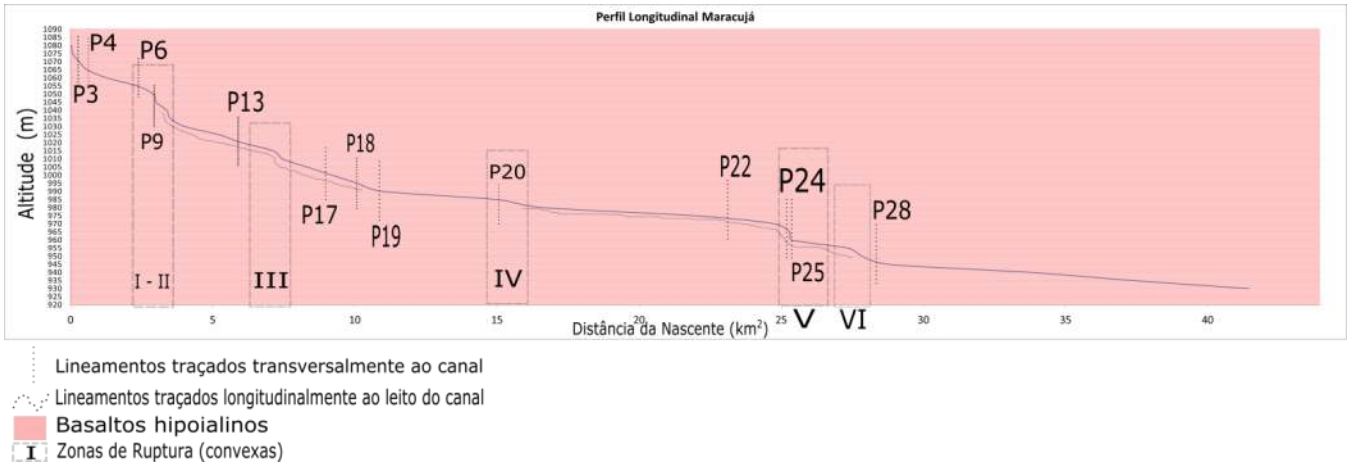


Figura 5: Perfil Longitudinal do rio Maracujá com os lineamentos estruturais traçados e identificação de áreas de knickzones e knickpoints.
Fonte: Autores (2017).

A outras zonas de convexidade, estas não ligadas diretamente a lineamentos estruturais afloram em seu leito basalto pertencente a base do derrame. Caso notório foi o observado nos pontos 13-14 e 19-20 do perfil do rio (Fig. 6). Foi identificado no leito fluvial relativo a estes pontos (13-14 e 19-20), afloramento de basalto tabular espesso, classificado pela Mineropar (2013) como fanerítico e de base de derrame do membro Três Pinheiros. Este basalto de base de derrame apresenta maior resistência erosiva se comparado aos derrames sobrejacentes hipoialinos, sua densidade de fraturamento é menor e essencialmente vertical, com proximidade de 130 fraturas em área circular de 2 m^2, pouco mais que a metade de áreas circulares medidas em trechos do leito fluvial nos basaltos hipoialinos (230 em média).



Figura 6: Em A, trecho de ruptura no leito do rio Maracujá com afloramento de basalto tabular fanerítico de base de derrame formando área de knickzone, sua localização ocorre entre os pontos 13-14 do perfil do rio. Localização: 430460.00 m E; 7212653.00 m S. Em B, mesmo basalto tabular de base formando knickpoint entre os pontos 19-20 do perfil longitudinal. Localização: 435934.19 m E; 7209119.64 m S.
Fonte: Autores (2017).

Medições em campo indicaram que a densidade de fratura da rocha hipoialina, quando maior, ou seja, menor espaçamento entre colunatas e blocos rochosos, apresentava pelo menos, 3 cm de distância entre as fraturas, tendo sua dimensão vertical (colunata) aproximadamente de 10 cm em média. A quantidade de fraturas do leito dobra em relação aos perfis verticais, passando em alguns casos, de 50 fraturas a cada 2 m de extensão lateral.

Sobre os trechos de leitos fluviais expostos, o padrão de densidade maior (menor espaçamento entre fraturas) formam patamares de colunatas com disjunção em blocos prismáticos (de 3 a 5 cm de largura), onde a densidade de fraturamento rochoso se aproxima de 231 fraturas em área circular. Este arranjo de disjunção, principalmente, em blocos com fraturamento denso da rocha visualizados nos trechos de leito do rio Maracujá, imprime a este, aparentemente, resistência erosiva menor frente à ação fluvial.

A facilidade de remoção de material do leito fluvial, portanto, parece estar diretamente ligada à densidade de fraturas do leito nos basaltos hipoialinos. Em trechos onde o escalonamento em degraus, segue a priori, o padrão acima citado de disjunção em colunatas e blocos, o intemperismo generalizado prepara o leito fluvial para o arranque (Fig. 7 C).

A morfologia resultante é de pequenos patamares escalonados associados ou não a trechos de knickpoints (Fig. 7 A). Quando associados a falhas (Fig. 7B), a remoção de blocos é maior e a formação de knickzones é favorecida contígua à área de knickpoint.

Nesta configuração, em alguns trechos foram visualizadas morfologias de leito do tipo degrau-depressão (*step-pool*), pertencentes a áreas de maior declividade ou de convexidade do perfil do rio, (Fig. 7 D). Antes da ruptura de declive mais acentuada, sendo em alguns casos, o canal inserido ao longo de lineamentos foi possível observar pequenas áreas de knickzones com a presença das mesmas morfologias *step-pool* (degrau-depressão) em trechos anteriores a zonas de convexidade do perfil longitudinal (Ponto 21-22 do perfil do rio).

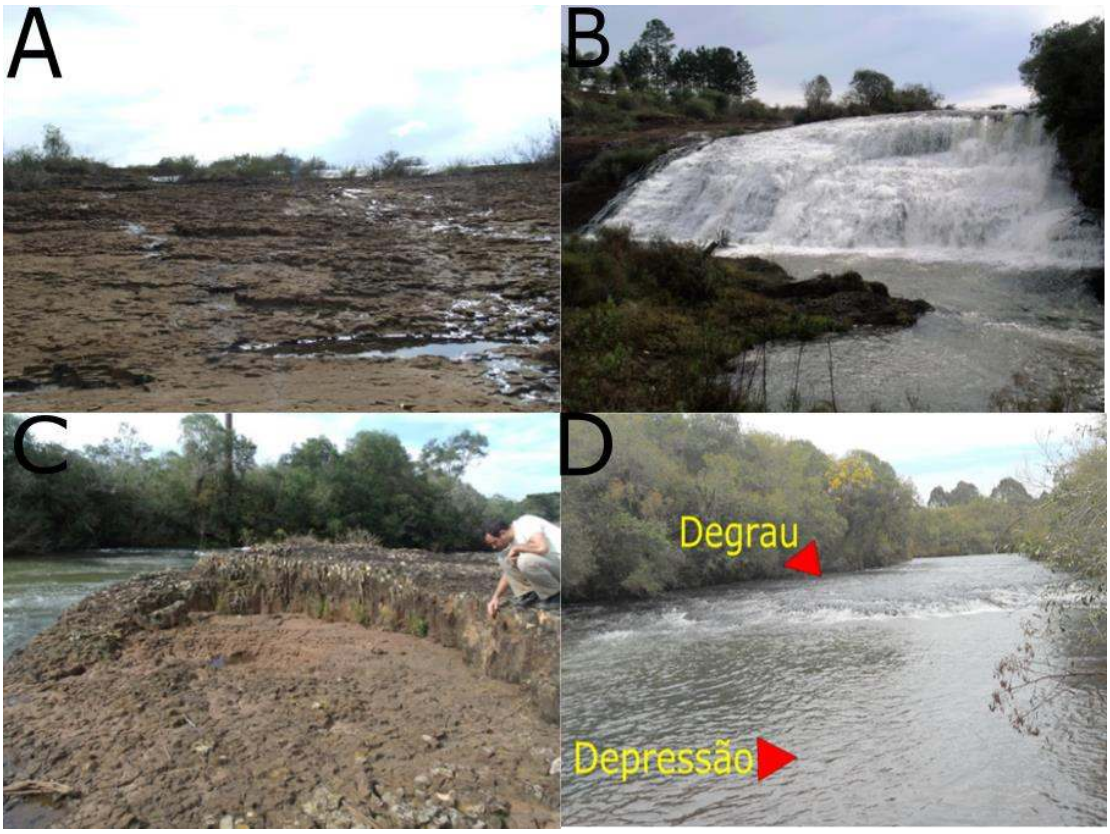


Figura 7: Sequências de imagens A, B e C, pontos 24-25 do perfil longitudinal e do leito fluvial do rio Maracujá. Em A, área de knickzone com escalonamento sucessivo de patamares de disjunção colunar em blocos e com características de entablatura de zona central de derrame de basalto hipoialino. Em B, vista frontal de zona de ruptura em trecho do rio Maracujá, com pelo menos dois patamares de queda. Exemplo em detalhe em C de dimensão vertical de um dos patamares. Trecho atrelado à interferência de lineamento estrutural que gera a ruptura de declive. Localização: 435932 m E; 7200705 m S. Em D, referente ao ponto 21 do perfil do rio, presença de morfologia degrau-depressão, característica de trechos de maior declividade (*step-pool*). Localização: 437167 m E; 7205944 m S.
Fonte: Autores (2017).

No perfil longitudinal do rio Maracujá, as falhas transversais formadoras de knickpoints, por sua vez, correspondem aos valores de maior declividade para o conjunto, por representarem áreas ativas de resistência erosiva, como ilustrado na figura 7. As quebras de relevo mapeadas ao longo do perfil e associadas aos lineamentos estruturais condicionam não só o relevo, mas também os afluentes do rio Maracujá a segmentos relativamente retilinizados, com inflexões abruptas.

Os trechos que não se inserem em zonas de convexidade, portanto, de baixo declive do perfil do rio, não foram visitados até o momento. Dificultando a precisão das características de leito fluvial e peculiaridades dos basaltos. Observações em rios afluentes desta e de outras bacias hidrográficas vizinhas a do Maracujá indicam que estes alcances do perfil apresentam morfologia do tipo *pool-riffle* (blocos-depressão), concernente a pesquisas realizadas em outros rios da região (LIMA e BINDA, 2013, 2015; LIMA, 2009, 2014).

Lineamentos estruturais

Os lineamentos estruturais estão diretamente ligados a formação dos knickpoints, como exemplificado no item anterior, através dos pontos 9, 24-25 e 28, os casos mais evidentes de formação de ruptura de declive associada aos lineamentos.

Os demais lineamentos existentes no perfil do rio quando não atrelados às rupturas de declive condicionam totalmente o alinhamento do canal fluvial, criando traçados com ângulos relativamente obtusos, quase que retos em alguns trechos. Como exemplo, o trecho do rio que coincidem com os pontos 12 a 19 apresenta este condicionamento da drenagem em relação aos lineamentos transversais e lineares ao leito fluvial, (Fig. 8).

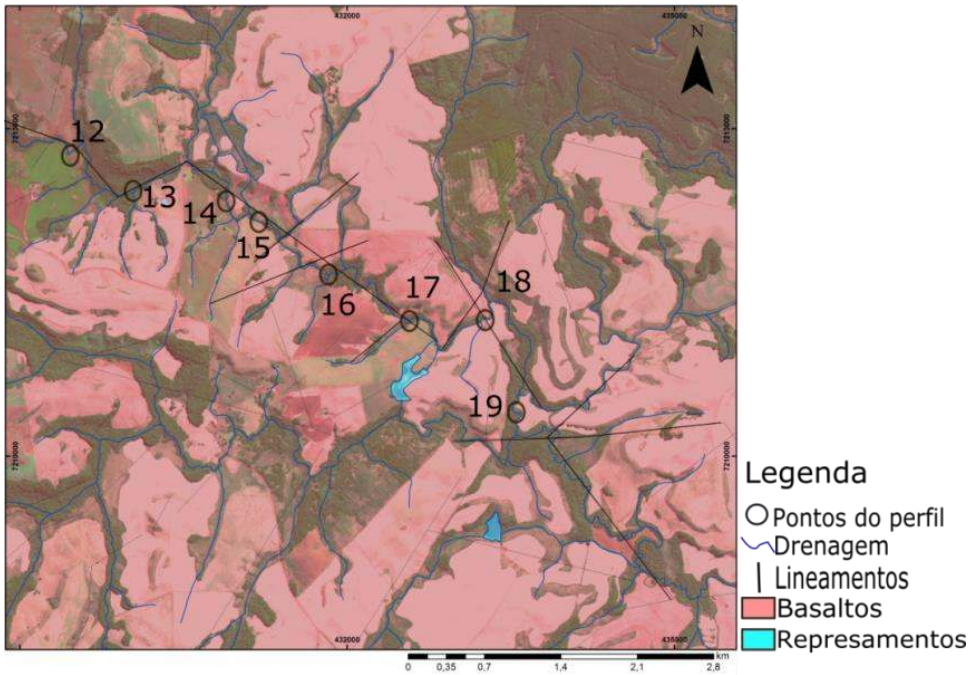


Figura 8: Trecho do rio Maracujá fortemente condicionado por lineamentos transversais e lineares ao canal fluvial. Os pontos representam a intersecção curva de nível e drenagem, bem como, os pontos delimitados no perfil longitudinal. Fonte: Autores (2017).

Análise geral da relação declive-área do rio Maracujá

Os dados obtidos da relação declive-área para o perfil do rio Maracujá indicam, segundo a bibliografia (KIRBY e WHIPPLE, 2001), estado de equilíbrio entre as forças hidráulicas de incisão e a resistência erosiva da litologia subjacente. O valor do índice de concavidade de 0,5 é representativo de rios com tendência a um ajuste hidráulico (SKLAR e DIETRICH, 1998). Como a área de drenagem equivale ao aumento da vazão a jusante do rio é de se esperar que os valores de concavidade fossem mais altos.

O ajuste relativamente mais baixo, da linha de tendência R^2 de 0,46, e a visualização do gráfico da relação declive-área produzido, a partir dos dados indicam perturbações sobre o perfil longitudinal. Correlacionando de forma geral, os pontos de dispersão na linha de tendência no gráfico da relação declive-área, estes coincidem com as zonas de convexidade do perfil longitudinal (Fig. 9).

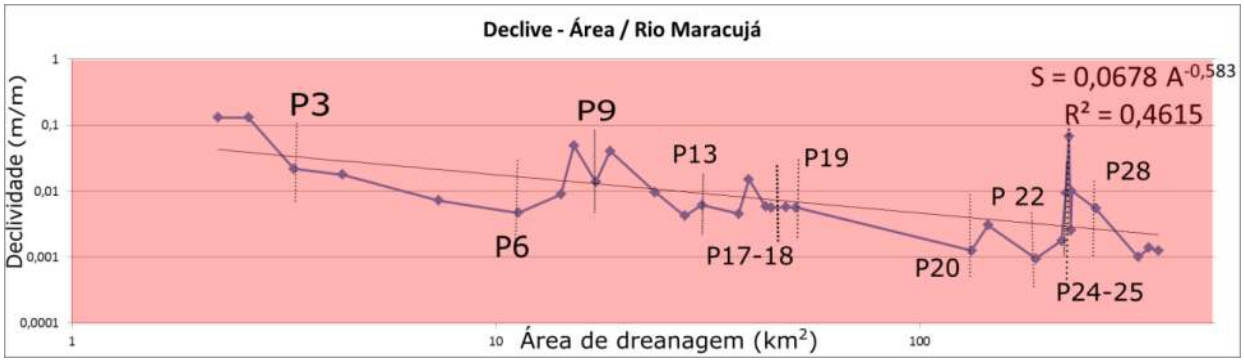


Figura 9: Gráfico da relação declive-área para o perfil longitudinal do rio maracujá. As linhas tracejadas transversais ao gráfico são os lineamentos traçados ao longo do perfil longitudinal e que perturbam os pontos de dispersão na análise de regressão. Contudo, observações de campo, aliaram a esta perturbação oriunda dos lineamentos, também a exposição dos derrames de base do basalto que surgem de forma pontual ao longo do leito fluvial. Cada ponto representa topologicamente valores organizados de área de drenagem e declividade.
Fonte: Autores (2017).

O valor do índice de declividade (0,0678) isoladamente não fornece base para uma interpretação completa do perfil do rio. Pois, seu valor baixo só pode ser utilizado, no conjunto do rio, como indicativo de menor resistência da rocha frente à vazão fluvial (WOBUS, et. al., 2006).

Desta forma, a segmentação do perfil em um trecho de homogeneidade litológica e com menor interferência tectônica se torna imprescindível. A análise da distribuição dos pontos de forma segmentada do perfil inteiro, para cada trecho homogêneo ou de maior homogeneidade possibilita maiores inferências acerca das tendências de resistência erosiva dos derrames de basalto e/ou da efetividade da ação fluvial sobre o leito do rio.

Foi selecionado o trecho entre os pontos 8 e 22 do perfil longitudinal completo (Fig. 10), por apresentar maior homogeneidade litológica dos basaltos (não totalmente, mas maior) e menor quantidade de lineamentos existentes ao longo e transversalmente ao leito.

O índice de concavidade (1,2) para o segmento (pontos 8-22) apresentou valores mais ajustados, indicando tendência erosiva mais acelerada por parte da vazão (WHIPPLE, 2000). Isto imprime ao trecho do rio uma tendência evolutiva de concavidade do perfil ou pelo menos no trecho em questão. O valor de ajuste dos dados, R^2 igual a (0,7) se mostrou mais elevado, podendo confirmar a tendência erosiva relatada anteriormente. O índice de declividade um pouco mais elevado (0,61) remete também as possíveis interferências sobre este trecho discretizados, dispersando alguns pontos nesta nova segmentação.

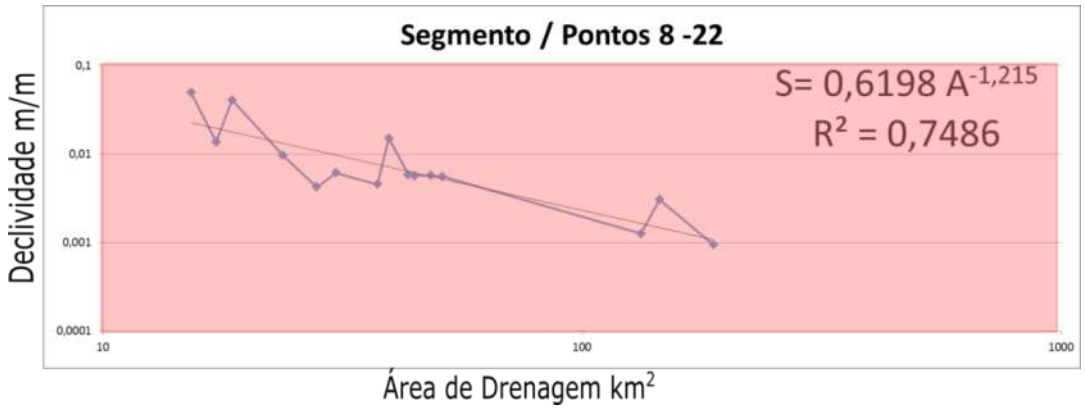


Figura 10: Segmento do perfil longitudinal mais homogêneo litologicamente e com menos interferências tectônicas para a análise da relação declive-área.
Fonte: Autores (2017).

A fim de depreender se a tendência erosiva mais elevada no trecho se confirma de fato, foram separados os pontos que configuram a zona superior ou pontos relativos às maiores declividades no segmento 8 a 22, formando nesta nova segmentação, um novo gráfico declive-área. O mesmo foi feito para os pontos referentes às menores declividades do segmento, com a finalidade de observar se a tendência erosiva relativamente mais ajustada se confirma em ambos os subsegmentos discretizados.

A segmentação do perfil que corresponde aos limites superiores retornaram valores ainda mais ajustados para o índice de concavidade (1,2) e de R^2 (0,9), confirmando a tendência erosiva relativamente alta do trecho para um perfil côncavo de equilíbrio fluvial (LIMA, 2009), mesmo compondo pontos de alta declividade.

O valor do índice de declividade, também elevado corrobora a maior resistência erosiva destes pontos, que possivelmente correspondam a frentes erosivas expostas no leito do rio perturbando a tendência geral do rio no seu processo de rebaixamento das declividades, (Fig. 11).

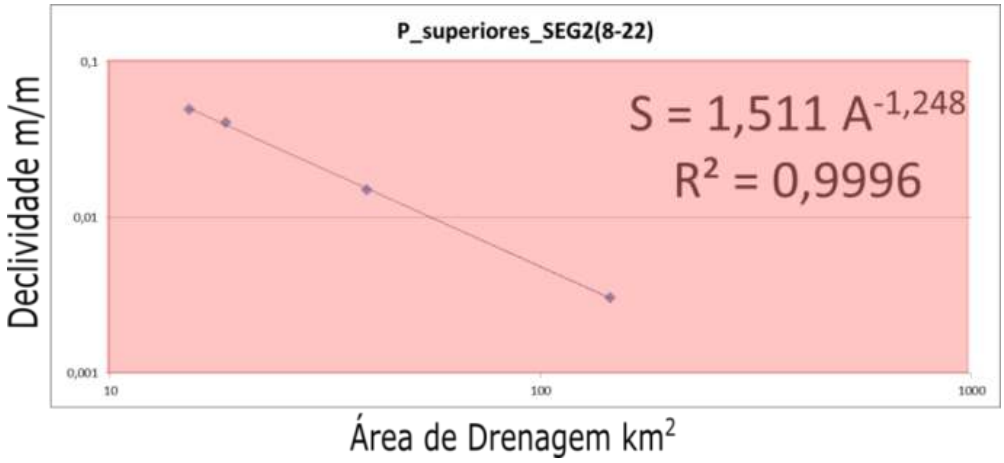


Figura 11: Subsegmentação do trecho entre os pontos 8 a 22 do rio Maracujá, utilizando apenas os dados dos limites superiores da relação declive-área.
Fonte: Autores (2017).

Os valores reportados pelos pontos inferiores que representam as baixas declividades do subsegmento, também indicaram tendência ao rebaixamento do trecho do perfil longitudinal em direção a uma concavidade. (Fig. 12). Mesmo apresentando índice de concavidade (0,8) menos ajustado, se comparado ao segmento superior, e R^2 (0,7) também menor, a mesma situação de ajuste hidráulico ou de potência do escoamento sobressalente a rocha pôde ser vislumbrada pela interpretação dos dados e confirmada em observações de campo. O valor do índice de declividade (0,12) demonstra a menor interferência sobre os pontos que compõem o limite inferior.

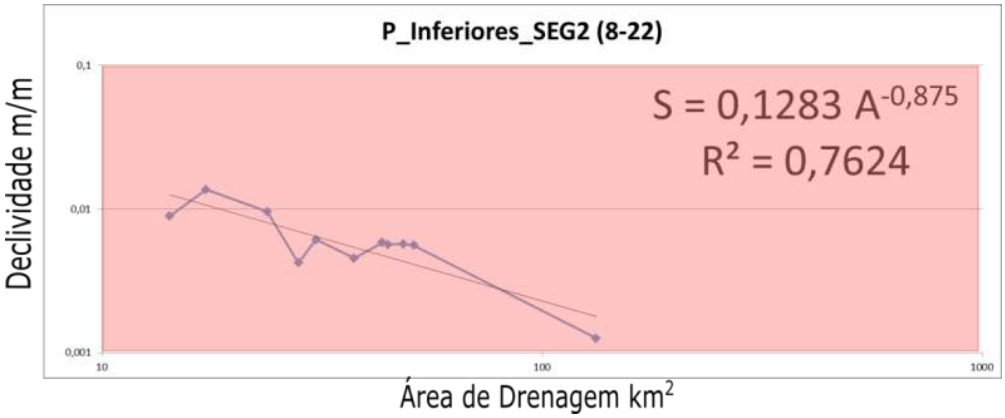


Figura 12: Relação declive-área de subsegmento de limite inferior entre os trechos 8 e 22 do perfil longitudinal do rio Maracujá.
Fonte: Autores (2017).

Processos erosivos preponderantes no leito fluvial do rio Maracujá

Os processos erosivos identificados como prevalecentes sobre o leito do rio Maracujá são a abrasão / macro abrasão e arrancamento. Fato é que, o intemperismo generalizado sobre a rocha prepara o leito para a incidência maior destes processos na modificação gradual da morfologia do leito. Isto condiz com estudos do gênero em diversas localidades (SKLAR e DIETRICH, 1998; WHIPPLE, et. al., 2000; KIRBY e WHIPPLE, 2001; LIMA, 2009, 2012, 2014; LIMA e BINDA, 2013, 2015; LANE et. al., 2015). Os processos citados são os responsáveis pelo rebaixamento gradual das declividades ao longo do perfil do rio potencializado sazonalmente pela variação da vazão.

Discussão dos resultados

Os basaltos hipoialinos existentes na área de estudo e que sustentam o canal fluvial do rio Maracujá não fogem a regra de uma configuração escalonada do seu perfil longitudinal, também comum, a outros rios desenvolvidos sobre rochas vulcânicas (SEIDL e DIETRICH, 1992; SEIDL et. al., 1994; STOCK e MONTGOMERY, 1999; LIMA, 1999, 2009, 2012, LIMA E BINDA, 2013, 2015).

Os rios regionais adjacentes à área de estudo, pesquisados sobre basaltos dos derrames inferiores (LIMA, 2009, 2012, 2014; LIMA e BINDA, 2013, 2015) do Grupo Serra Geral, também apresentam perfis escalonados. Tal escalonamento ocorre em função das áreas de maior resistência erosiva devido ao padrão diferenciado de fraturamento estrutural dos leitos rochosos (LIMA, 2012), que criam zonas de menor e/ou maior resistência erosiva relativa, frente à ação da potência de escoamento fluvial.

O perfil longitudinal do rio Maracujá, que corre quase que preferencialmente, sobre basaltos hipoialinos, aqui brevemente estudados, incluem-se nesta configuração de escalonamento. A tendência a uma concavidade, situação considerada como de perfil em equilíbrio fluvial, ou seja, ponto máximo da ação erosiva, potencializada pela vazão, não é evidente, em uma primeira análise ao rio Maracujá. Quando se observa os trechos discretizados na relação declive-área, construída para a sua análise, esta tendência se torna mais clara. O rio apresenta pelo menos duas características básicas que ajudam a explicar a formação de zonas escalonadas ou trechos escalonados em seu perfil longitudinal.

A primeira é incidência direta ou indireta de lineamentos estruturais, oriundos de falhas regionais e locais. Estas promovem por sua vez, o aparecimento rupturas de declive ou frentes de

resistência erosiva. Além disso, os lineamentos direcionam estruturalmente, quase todo o rio Maracujá, com trechos específicos ao qual o canal fluvial realiza inflexões abruptas em seu curso.

As rupturas de declive podem ter incidência direta do lineamento ou podem ocorrer em distância anterior à falha. A regressão remontante destas rupturas é comum quando a potência do escoamento já efetua o trabalho erosivo ao longo do tempo (LIMA, 2014).

A segunda causa é a diferenciação estrutural no nível de derrame basáltico, onde o grau de fraturamento litológico exerce o controle erosivo no leito fluvial em relação à vazão. Cada nível de derrame distinto estruturalmente se configura como ponto elementar na resposta geomorfológica apresentada pelo leito fluvial em termos de resistência erosiva (LIMA, 2012).

Rupturas de declive pontuais como knickpoints e as zonas de resistência erosivas mais alongadas em trechos do rio, como as knickzones, comportam-se como feições de escalonamento e de trechos de maior declividade no perfil do rio. A migração dos knickpoints e das knickzones nos basaltos hipoialinos destas áreas de maior resistência erosiva parecem ocorrer pela remoção gradual de blocos em patamares, e em frentes de erosão delineadas pelo fluxo do rio.

Os basaltos hipoialinos apresentam maior densidade de fraturas se comparados com os basaltos regionais já identificados (LIMA. 2009, 2012, 2014; LIMA e BINDA, 2013) e pertencentes a outras formações do Grupo Serra Geral. As medidas diretamente realizadas no leito fluvial e em afloramentos verticais levam a crer que a resistência desta litologia frente à vazão é efêmera. Pois, sua estruturação em blocos, de disjunção colunar leva a uma remoção ligeiramente rápida no tempo, pelo processo de arrancamento de blocos efetivados pela ação hidráulica do rio, sobretudo, em períodos de maior vazão.

O próprio acúmulo de blocos arrancados em áreas contiguamente à frente ou próximas dos knickpoints e/ou knickzones contribui com o processo de arranque nos períodos de cheia. Além de fomentar a macro abrasão nos períodos onde a vazão não é intensa, estes participam conjuntamente com o intemperismo, no preparo do leito fluvial para a erosão.

Mesmo sem a presença de zonas de vesicularidade/amigdaloidal no leito fluvial, marcantes nos derrames inferiores, constatado em estudos (LIMA. 2009, 2012, 2014; LIMA e BINDA, 2013; MINEROPAR, 2013), como zonas de menor resistência erosiva, por conta da estruturação heterogênea dos derrames. O basalto hipoialino aparenta ser correspondente a e estes, em termos de vulnerabilidade, por conta do seu alto grau de fraturamento rochoso o que o torna suscetível à denudação.

Algumas zonas convexas de resistência erosiva, no entanto, como as de proximidade do ponto 20 do perfil longitudinal do rio Maracujá, no qual, afloram basaltos faneríticos de base de derrame, se assemelham em termos de resistência erosiva aos basaltos do Membro Foz do Areia, pesquisados regionalmente em outros estudos (LIMA. 2009, 2012, 2014; LIMA e BINDA, 2013; MINEROPAR, 2013). Sua estruturação de fraturamento segue um padrão vertical, que apenas com um fluxo fluvial muito intenso sobre as fraturas da rocha ao longo do tempo, possibilita a remoção dos blocos.

A análise a partir da relação declive-área permitiu inferir que os lineamentos estruturais possuem papel relevante na formação das maiores rupturas de declive do rio. Os pontos 9 e 24-25 são os trechos do perfil longitudinal, onde esta interferência é mais clara. Estes somados aos demais lineamentos influenciam de sobremaneira a formação das rupturas de declive. Mas não as únicas, pois a resistência litológica dos basaltos tabulares faneríticos, também se mostrou controle de resistência erosiva importante.

A grande dispersão dos pontos no gráfico de regressão, diminuindo o valor geral do índice de concavidade (0,5) e mantendo o valor de R^2 relativamente baixo (0,46) não foi suficiente para esclarecer o escalonamento do perfil do rio. Apenas com a discretização do perfil foi possível vislumbrar uma tendência à concavidade do rio Maracujá. A interpretação de que a potência do escoamento se ajusta à resistência erosiva dada pela rocha, só pode ser inferida quando se analisa trechos do rio aplicados à relação declive-área sobre eles e confrontados com as observações de campo.

Quando é aplicada a regressão (relação declive-área) sobre intervalos de pontos segmentados do perfil longitudinal integral. Verificando separadamente, os pontos referentes a trechos de maior ou menor declividade, como realizado entre os pontos 8 a 22 do perfil. É possível observar uma tendência alta de ajuste hidráulico sobre o leito fluvial rochoso.

Seus valores altos de ajuste do R^2 de (0,9) para o limite superior e (0,7) para o limite inferior, com índices de concavidade também elevados (1,2 no primeiro e 0,8 no segundo), confirmam esta tendência de que a drenagem consegue suplantar de forma relativamente acelerada as forças de resistência erosivas, impostas pela litologia e tectônica.

As saídas a campo ao longo do leito fluvial do Maracujá serviram para confirmar que tanto lineamentos estruturais como litologia diferenciada entre camadas de derrames são a causa inicial

da dispersão dos pontos na relação declive-área como também causa da morfologia escalonada do perfil do rio.

Uma lacuna que ainda não foi possível responder refere-se à morfologia dos trechos de baixa declividade do canal do rio. No modelo de regressão estas morfologias são representadas pelos valores de baixa declividade, ou seja, o alinhamento inferior do segmento 8 a 22, por exemplo. E no perfil correspondem a trechos de aspecto côncavo (por exemplo, o intervalo entre os pontos 12 a 20 do perfil). Em campo ainda não se pôde observar quais características incidem sobre eles. Os estudos regionais já efetuados (LIMA. 2009, 2012, 2014; LIMA e BINDA, 2013) indicam para estes trechos morfologias do tipo pool-riffle (blocos-depressão), com ou material colúvio-aluvial sobre extensões do leito. Sendo relativamente comum nos basaltos dos derrames inferiores do Grupo Serra Geral. Esta lacuna será pesquisada em estudos futuros para melhor elucidação.

Assim, observa-se que mesmo a incidência de lineamentos sobre o leito fluvial e a diferenciação erosiva entre os níveis de derrame do basalto hipoialino, têm sido suplantados pela potência de escoamento (vazão) do rio. Sobretudo, nos trechos onde o rio avança sobre as zonas de entablatura com disjunção colunar e de maior nível de fraturamento rochoso dos basaltos hipoialinos.

Apenas os dados da relação declive-área, organizados integralmente para o perfil longitudinal como um todo, não permite elucidar tal tendência de perfil em equilíbrio. Podendo ser apenas identificada, quando os dados passam a ser segmentados em trechos específicos e confrontados com análises de campo.

Agradecimentos

Agradecemos aos proprietários rurais ao longo dos percursos trilhados, que nos permitiram acesso aos leitos fluviais e adjacências.

Agradecimentos ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo financiamento à pesquisa através da bolsa de doutoramento (nº 162331/2015-0).

Referências bibliográficas

HACK, J.T. Stream profile analysis and stream gradient index. **J. Res. US Geol. Survey**, v.1, n.4, p.421-429, 1973.

HOWARD, A. D.; KERBY, G. Channel changes in badlands. **Geol. Soc. Amer. Bull.**, New York, v. 94, p. 739-752, 1983.

HOWARD, A. D.; DIETRICH, W. E.; SEIDL, M. A. Modeling fluvial erosion on regional to continental scales. **J. Geophys. Res**., v. 99, no. B7, p. 13971-13986, 1994.

KIRBY, E.; WHIPPLE, K. X. Quantifying differential rock-uplift rates via stream profile analysis. **Geology**, Boulder, v. 29, p. 415-418, 2001.

KIRBY, E., WHIPPLE, K., TANG, W., CHEN, Z. Distribution of active rock uplift along the eastern margin of the Tibetan Plateau: inferences from bedrock channel longitudinal profiles. **Journal of Geophysical Research** 108(B4), 2217. 2003. http://dx.doi.org/10.1029/2001JB000861.

LIMA, A.G.; BINDA, A.L. Differential control in the formation of river potholes on basalts of the Paraná Volcanic Province . **J. South Am. Earth Sci**. v.59, p.86-94, 2015. doi:10.1016/j.jsames.2015.02.004

LIMA, A.G., BINDA, A.L. Lithologic and structural controls on fluvial knickzones in basalts of the Parana Basin, Brazil. **J. South Am. Earth Sci**. v. 48, p. 262-270, 2013. doi:10.1016/j.jsames.2013.10.004

LIMA, A. G. **Controle geológico e hidráulico na morfologia do perfil longitudinal em rio sobre rochas vulcânicas básicas da Formação Serra Geral no Estado do Paraná.** Tese de doutorado. UFSC. Florianópolis – SC. 2009.

LIMA, A.G. Rios de leito rochoso: aspectos geomorfológicos fundamentais. **Ambiência.** v.6, p.339 – 354. 2010.

LIMA, A. G. Erosão fluvial sobre rochas vulcânicas: algumas inferências a partir de segmentos côncavos de perfis longitudinais. **Rev. Bras. Geocienc.**, São Paulo, v. 42, suppl. 1, p. 34-41, 2012.

LIMA, A.G. Uso da relação declive-área para avaliação de interferências neotectônicas em perfil longitudinal de rio. **Boletim de Geografia**, v. 32, n. 2, p. 158-172. 2014.

MARTIN, B.S.; PETCOVIC, H.L.; REIDEL, S.P. **Goldschmidt Conference 2005: Field trip guide to the Columbia River Basalt Group**. U.S. Department of Energy, Pacific Northwest National Laboratory, Richland (WA), May 2005, 62 p. 2005.

MINEROPAR. Serviço Geológico do Paraná. **O Grupo Serra Geral no Estado do Paraná**. Vol. 1 e 2, Curitiba: Mineropar, 2013.

PAZZAGLIA, F.J.; GARDNER, T.W.; MERRITS, D. J. Bedrock fluvial incision and longitudinal profile development over geologic time scales determined by fluvial terraces. In: TINKLER, K. & WOHL, E. E. (eds.). ***Rivers over rock*: fluvial processes in bedrock channels.** Washington: American Geophysical Union: Washington, DC, 1998, p. 207–235. (Geophysical monograph 107).

SEIDL, M.A.; DIETRICH, W.E. The problem of bedrock channel erosion. **Catena Suppl.** 23, p.101-124, 1992.

SEIDL, M.A.; DIETRICH, W.E.; KIRCHNER, J.W. Longitudinal profile development into bedrock: an analysis of Hawaiian channels. *J.* **Geology**, v. 102, p. 457-474, 1994. doi: 10.1086 /629686.

SKLAR, L.; DIETRICH, W. E. River longitudinal profiles and bedrock incision models: stream power and the influence of sediment supply. In: TINKLER, K. J.; WOHL, E.E., (eds.), **Rivers over rock***:* fluvial processes in bedrock channels. American Geophysical Union: Washington, DC, p. 237-260. (Geophysical monograph 107). 1998.

SNYDER, N. P.; K. X. WHIPPLE; G. E. TUCKER; D. J. MERRITTS. Landscape response to tectonic forcing: Digital elevation model analysis of stream profiles in the Mendocino triple junction region, northern California, **Geol. Soc. Am. Bull**., 112, 1250–1263, 2000.

STOCK, J. D.; MONTGOMERY, D. R. Geologic constraints on bedrock river incision using stream power law. *J.* **Geophys. Research**, v.104, p. 4983-4993, 1999.

WHIPPLE, K.X.; HANCOCK, G.S.; ANDERSON, R.S. River incision into bedrock: mechanics and relative efficacy of plucking, abrasion, and cavitation. ***Geol. Soc. Am. Bull***., v.112, n.3, p. 490–503, 2000.

WHIPPLE, K.X. TUCKER, G.E. Implications of sediment flux dependent river incision models for landscape evolution. *J. Geophysical Research*, v.107, n.B2, 2002. doi: 10.1029/2000JB000044.

WHIPPLE, K. X. Bedrock rivers and the geomorphology of active orogens. **Annual Review Earth Planetary Science**, Palo Alto, v. 32, p. 151-185, 2004.

WHIPPLE, K.X., DIBIASE, R.A., CROSBY, B.T., Bedrock rivers. In: Shroder, J. (Editor in Chief),

WOBUS, C.W., HODGES, K.V., WHIPPLE, K.X.. Has focused denudation sustained active thrusting at the Himalayan topographic front? **Geology** 31, 861–864. 2003.