

Processos de encouraçamento de leitos fluviais (bed armouring) na perspectiva geomorfológica: o caso do rio Conceição – Quadrilátero Ferrífero/MG

River-bed armouring processes in the geomorphological perspective: the case of Conceição river – Quadrilátero Ferrífero - Iron Quadrangle/MG

Guilherme Eduardo Macedo Cota*, Renata Jordan Henriques*, Antônio Pereira Magalhães Júnior*

* Departamento de Geografia, Universidade Federal de Minas Gerais, e-mail: guilhermebhm@gmail.com, renatajhques@gmail.com, antonio.magalhaes.ufmg@gmail.com

DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/raega.v53i0.78844>

Resumo

Os processos de encouraçamento de leitos fluviais se referem à presença de sedimentos imóveis nas calhas fluviais, impedindo a remoção de grãos potencialmente transportáveis. Em geral, as pesquisas sobre encouraçamento fluvial utilizam critérios hidrológicos para se determinar as condições de fluxo para o rompimento dos pavimentos detríticos, em detrimento de abordagens de cunho geomorfológico acerca do rebatimento da presença dos pavimentos detríticos para as condições geomorfológicas do canal fluvial. De modo a contribuir com os estudos sobre esse tema no país, o presente trabalho propõe investigar a ocorrência dos processos de encouraçamento sob a perspectiva geomorfológica. Para tanto, o rio Conceição (Quadrilátero Ferrífero - MG) é adotado como estudo de caso. Procedeu-se, a partir de técnicas cartográficas e da observação e descrição via aplicação de um check-list, associar o rebatimento da presença dos pavimentos detríticos para as condições geomorfológicas do canal fluvial. A organização dos materiais de calha no rio Conceição aponta para a ocorrência de processos de encouraçamento a partir da confluência com o ribeirão Preto, onde ocorrem pavimentos detríticos intercalados por poços, formando a morfologia em poço-corredeira. Os resultados indicam a formação de pavimentos em porções do perfil longitudinal com predomínio de processos de agradação, o que propiciaria a estabilidade dos materiais. O leito também apresenta couraças ferruginosas que efetuam o papel de blindagem da calha fluvial de maneira mais forte por não dependerem do regime de fluxo e sim das condições eletroquímicas que mantém o material coeso.

Palavras-chave: Pavimentos detríticos; couraças ferruginosas; morfologia e morfodinâmica fluvial.

Abstract

River-bed armouring processes refer to the presence of immobile sediments in river channels, preventing the removal of potentially transportable grains. Research on river-bed armouring mostly use hydrological criteria to determine the flow conditions for the disruption of detrital pavements, instead of following geomorphological approaches regarding the impacts of the detrital pavements on fluvial geomorphology. In order to contribute to the studies on river-bed armouring in Brazil, this work intends to investigate the occurrence of river-bed armouring from a geomorphological perspective. Therefore, the Conceição River (Iron Quadrangle - MG) is used as case study. Based on cartographic techniques, observation and checklist-based descriptions, we proceeded to connect the impacts of detrital pavements to geomorphological conditions of the river channel. Channel material organization identified in the Conceição River points to the occurrence of the river-bed armouring processes from the confluence with Ribeirão Preto on, in which detrital pavements interspersed by pools occur, forming the morphology of riffle-pools. The results indicate the formation of detrital pavements in sections of the longitudinal profile with a predominance of sedimentation processes, which suggests the stability of the materials. There is also, in the river-bed, the occurrence of ferruginous duricrusts, which operates by the effect of relative shielding of the river channel through electrochemical conditions of cohesion, instead of processes essentially dependent on the flow regime.

Keywords: Detrital pavements; iron duricrust; fluvial morphology and morphodynamic.

I. INTRODUÇÃO

Os processos de encouraçamento de leitos fluviais (bed armouring) se referem à presença de sedimentos imóveis nas calhas fluviais, impedindo a remoção de grãos potencialmente transportáveis (BRIDGE, 2003; GOUDIE, 2004; ALMEDEIJ e DIPLAS, 2005). Desse modo, o pavimento detrítico formado na superfície do leito fluvial oferece resistência aos processos abrasivos.

Com a formação do pavimento detrítico, o equilíbrio hidrossedimentológico do canal é alterado, gerando uma perturbação no sistema fluvial, tendo em vista que novas relações entre produção, transporte e deposição de sedimentos passam a vigorar (COTA et al., 2018). As novas condições de transporte, por conseguinte, influenciam e modificam a geometria do canal, em um processo de retroalimentação que também influencia a vazão e o transporte de sedimentos. Consequentemente, o impacto da imobilização dos sedimentos pode ocasionar um colapso na estabilidade do sistema fluvial. O canal tende a migrar lateralmente e a erodir suas margens, aumentando a largura do curso d'água (XU, 1996).

Cota (2017), tomando como base os trabalhos de Charlton (2008), Magalhães Júnior et al. (2008) e Barros (2010), aponta algumas lacunas do conceito de encouraçamento sob a perspectiva geomorfológica, principalmente acerca da configuração dos pavimentos detríticos. Estes não seriam, necessariamente,

compostos somente por seixos e cascalhos imóveis e soltos no leito, mas também pela cimentação de materiais por óxidos e hidróxidos de ferro. A disposição espacial dos pavimentos detríticos, por sua vez, ainda é objeto de discussão na literatura. Não há consenso se somente os agrupamentos de seixos e cascalhos (clusters) ficam encouraçados ou se a morfologia de leito marcada por uma sucessão destes agrupamentos corresponderia ao encouraçamento (COTA et. al., 2018).

Em âmbito nacional, os estudos sobre encouraçamento são escassos, com destaque para os trabalhos de Magalhães Júnior et al. (2008) e Stevaux et al. (2009), que identificam trechos de vale encouraçados e os correlacionam, respectivamente, com a litologia e com a interferência de atividades antrópicas.

Diante da carência de estudos relativos ao tema no âmbito da geomorfologia, o presente trabalho se propõe a abordar as bases teórico-conceituais sobre os processos de encouraçamento de calhas fluviais na literatura nacional e internacional, investigando os seus principais problemas e desafios sob um viés geomorfológico. Para ilustrar a abordagem teórica e fomentar a discussão sobre a dinâmica fluvial de rios em contextos montanhosos, o rio Conceição (Quadrilátero Ferrífero – MG) é adotado como estudo de caso.

Esta escolha deriva de características/organização dos materiais de calha já identificados em estudos pretéritos (BARROS e MAGALHÃES JÚNIOR, 2013; BARROS, 2012, 2015) e que apontam para a ocorrência de processos de encouraçamento associados à paleoníveis deposicionais aluviais com material detrítico concrecionado por ferro. O objetivo consiste, portanto, em discutir as bases teórico-conceituais sobre encouraçamento fluvial e suas consequências para a morfologia e para a morfodinâmica de cursos d'água a partir do estudo de caso do rio Conceição.

Encouraçamento de leitos fluviais (bed armouring): bases teórico-conceituais

A literatura, de maneira geral, descreve os processos de encouraçamento fluvial como a formação de um pavimento detrítico no leito de um curso d'água que, por alterações na capacidade e/ou competência do fluxo, mantém seus grãos imóveis ou temporariamente imóveis (BRIDGE, 2003; GOUDIE, 2004; ALMEDEIJ e DIPLAS, 2005). É possível diferenciar os pavimentos detríticos que caracterizam os processos de encouraçamento em duas classes distintas, a saber: pavimentos formados por grãos soltos (não coesivos), porém imóveis; e pavimentos formados por grãos cimentados por óxidos e hidróxidos de ferro (coesivos).

Apesar dos processos de encouraçamento serem abordados na literatura internacional, com destaque para Almedeij e Diplas (2005) e Charlton (2008), são raros os estudos que estabelecem postulados

metodológicos para a identificação e caracterização de leitos encouraçados. Quando o fazem, se baseiam na dualidade determinística de critérios hidrológicos e estabilidade dos pavimentos detríticos, em detrimento de uma análise de cunho geomorfológico. A formulação e a discussão de técnicas quantitativas de mensuração de dimensões atreladas ao encouraçamento tornaram-se objeto e o próprio fim de muitas pesquisas, afastando-se de discussões sobre as implicações geomorfológicas do processo.

Ainda há pouca definição na associação de pavimentos detríticos imóveis com a morfologia de leito do canal, os padrões fluviais e antigos níveis deposicionais aluviais (diferentes estágios evolutivos da rede de drenagem), bem como carecem discussões de fatores genéticos para a formação dos pavimentos detríticos. Ou seja, para avaliar o papel do encouraçamento na morfodinâmica fluvial é importante investigar as possíveis respostas da presença dos pavimentos detríticos longitudinalmente, buscando evidências da ocorrência de poços-corredeiras, associadas ao gradiente do canal e ao seu perfil longitudinal.

Essa carência de abordagem, principalmente na literatura internacional, é refletida nas técnicas comumente utilizadas nos estudos dos processos de encouraçamento. Tais técnicas visam, principalmente, quantificar o transporte sedimentar fluvial de pavimentos detríticos não coesos e determinar em quais condições hidrológicas o material de calha permanece estável ou é transportado (CHARLTON, 2008). Não obstante, as técnicas comumente apresentadas de quantificação do transporte sedimentar não consideram pavimentos detríticos coesos, como as couraças ferruginosas presentes no Quadrilátero Ferrífero. Pelas condições eletroquímicas que mantém o material coeso, essas não respondem diretamente as variações no regime fluvial.

Consoante, apesar de os pavimentos coesos e não coesos possuírem características distintas, eles podem exercer o mesmo papel de “blindagem” dos fundos de vale e resistência aos processos abrasivos. Deste modo, ambos os pavimentos são considerados como típicos do processo de encouraçamento fluvial. Poucos trabalhos, no entanto, abordam o tema dos pavimentos detríticos de modo integrado, associado à morfodinâmica e/ou à morfogênese dos sistemas fluviais. Assim, processos geomorfológicos que poderiam auxiliar no entendimento de alterações nas condições hidrossedimentológicas do canal fluvial permanecem relativamente estagnadas em decorrência da priorização de investigações sob perspectivas essencialmente hidrológicas.

No que tange à disposição espacial dos clusters, Heays (2011) afirma que estes agrupamentos de sedimentos decorrem do transporte seletivo que caracteriza os pavimentos detríticos e que são mais estáveis do que os materiais circundantes. Deste modo, há um favorecimento aos processos de oscilação do fluxo na

medida em que há a sua convergência, no contato com os clusters, e a sua posterior divergência a jusante desses (FERNANDEZ, 2009). Este processo vai de encontro à discussão de Montgomery e Buffington (1998), que afirmam que esta oscilação no fluxo é responsável pela formação de leitos em poço-corredeira (pool-riffle) e que estes encontram-se comumente encouraçados (Figura 1).

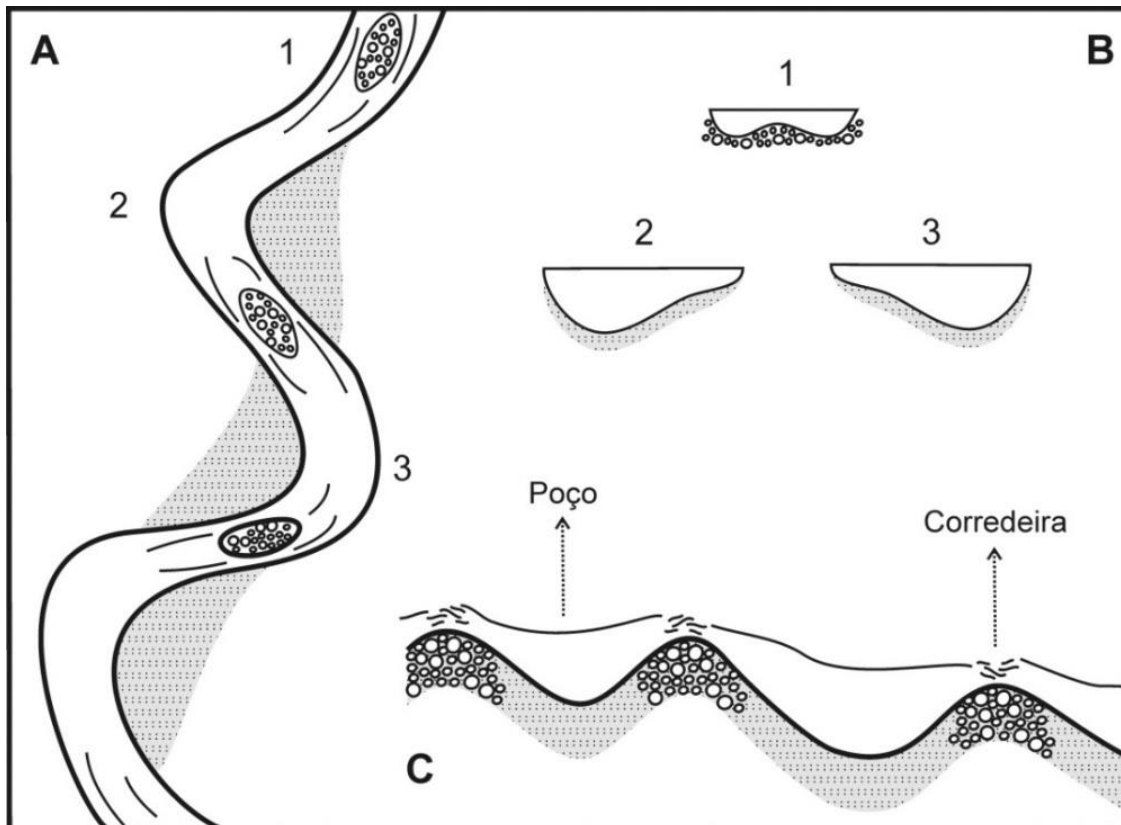


Figura 1: Morfologia em poço-corredeira transversalmente e longitudinalmente em um canal sinuoso.

Fonte: Cota et al. (2018).

A configuração espacial dos clusters, portanto, está associada às células de fluxos internos (convergência nos riffles e divergência nos pools). Para explicar este fenômeno, Keller (1971) estabeleceu a hipótese da reversão da velocidade do fluxo (hypothesis of velocity reversal) partindo do pressuposto que, sob vazões reduzidas, a velocidade do fluxo é maior nas corredeiras do que nos poços, mas em condições de maior vazão essa lógica se inverte, tornando a velocidade do fluxo maior nos poços.

Nesse sentido, trechos de leitos encouraçados não estariam associados somente aos materiais imóveis in situ, mas sim a uma morfologia de leito que caracterize segmentos encouraçados. Montgomery e Buffington (1998), Magalhães Júnior et al. (2008) e Cota et al. (2018) corroboram com esta afirmação ao associarem a ocorrência de processos de encouraçamento a leitos em poço-corredeira.

II. MATERIAIS E MÉTODOS

Área de Estudo

O rio Conceição está inserido na bacia do Alto Rio Doce, tendo como principais afluentes o córrego das Flechas, o córrego do Engenho e o ribeirão Preto (Figura 2). Segundo Barros (2012), a bacia do rio Conceição é delimitada de diferentes maneiras por diversos órgãos federais e estaduais, sendo que para fins deste trabalho, o estudo de caso contempla o rio principal até sua confluência com o ribeirão Caraça.

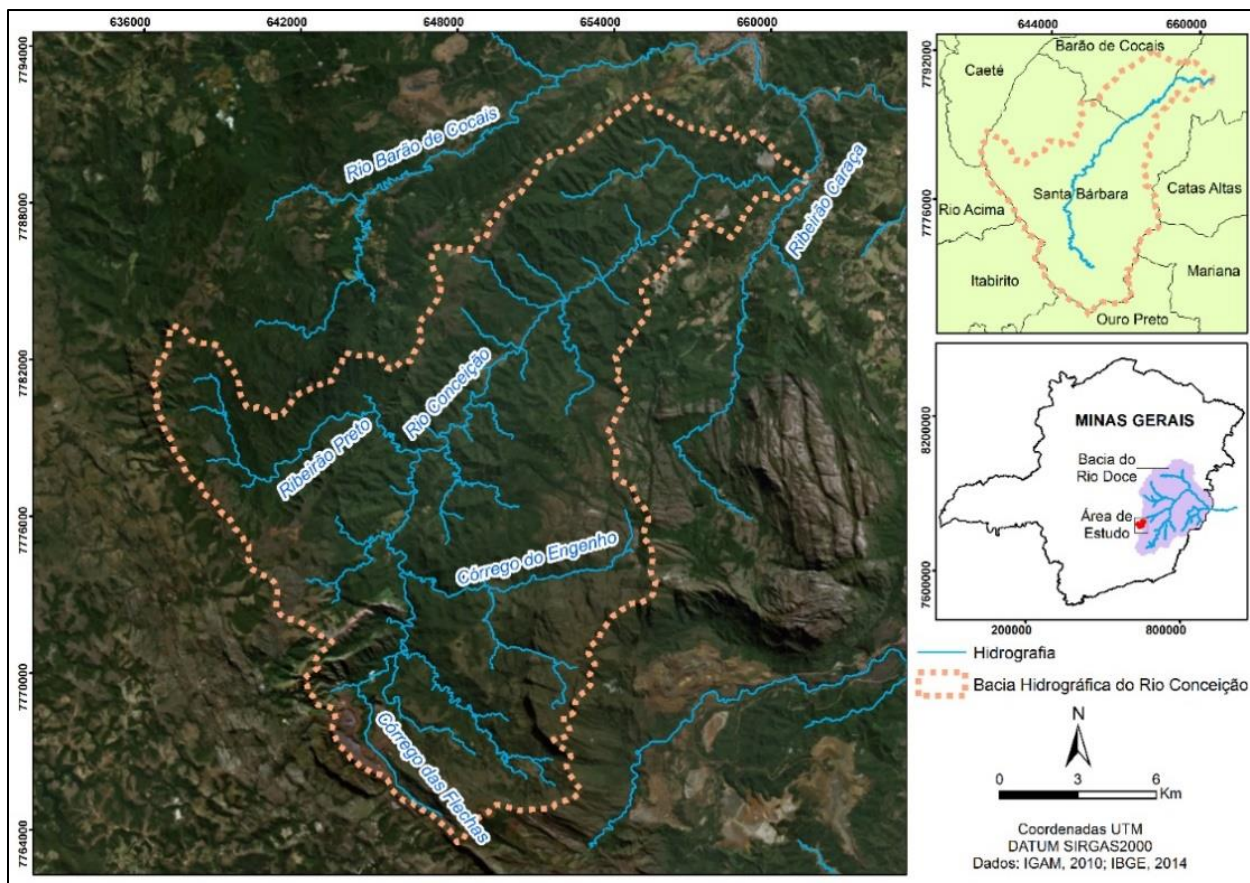


Figura 2: Localização da bacia do rio Conceição.

A bacia se insere quase totalmente no município de Santa Bárbara, abrangendo uma pequena porção, no Baixo curso, do município de Barão de Cocais. O rio Conceição está a cerca de 100 km de Belo Horizonte (MG) via BR-381, havendo ainda outros acessos por estradas rurais passando pelos municípios de Caeté e Rio Acima.

No tocante ao arcabouço geológico, há duas unidades principais: o Supergrupo Rio das Velhas (Grupo Nova Lima e Grupo Maquiné) e o Supergrupo Minas (Grupo Caraça, Itabira, Piracicaba e Tamanduá). O

Supergrupo Minas ocorre principalmente nas cabeceiras dos cursos d'água e corresponde a uma unidade metassedimentar proterozóica, com cerca de 2,58 a 2,04 Ga (HARTMANN et al., 2006), em descontinuidade erosiva em relação ao Supergrupo Rio das Velhas. Suas formações ferríferas bandadas (BIF's) são adotadas como critério de delimitação do Quadrilátero Ferrífero (ALKMIM e MARSHAK, 1998). O Supergrupo apresenta pacotes sedimentares diversificados e subdivididos em inúmeras formações. Na bacia do rio Conceição ocorrem os grupos Caraça (Formação Moeda e Batatal), Itabira (Formação Cauê e Gandarela), Piracicaba (Formação Cercadinho) e Tamanduá.

Preenchendo quase todo o vale estão as rochas do Supergrupo Rio das Velhas, uma seqüência vulcano-sedimentar tipo greenstone belt com cerca de 2,76 Ga (ALKMIM e MARSHAK, 1998; HARTMANN et al., 2006). Essa unidade é subdividida nos grupos Nova Lima e Maquiné (formações Casa Forte e Palmital), com predomínio de xistos e filitos. Há ainda, ao longo de toda a bacia, a ocorrência de diques de diabásio e coberturas cenozóicas associadas a cangas e, secundariamente, aluviões quaternários.

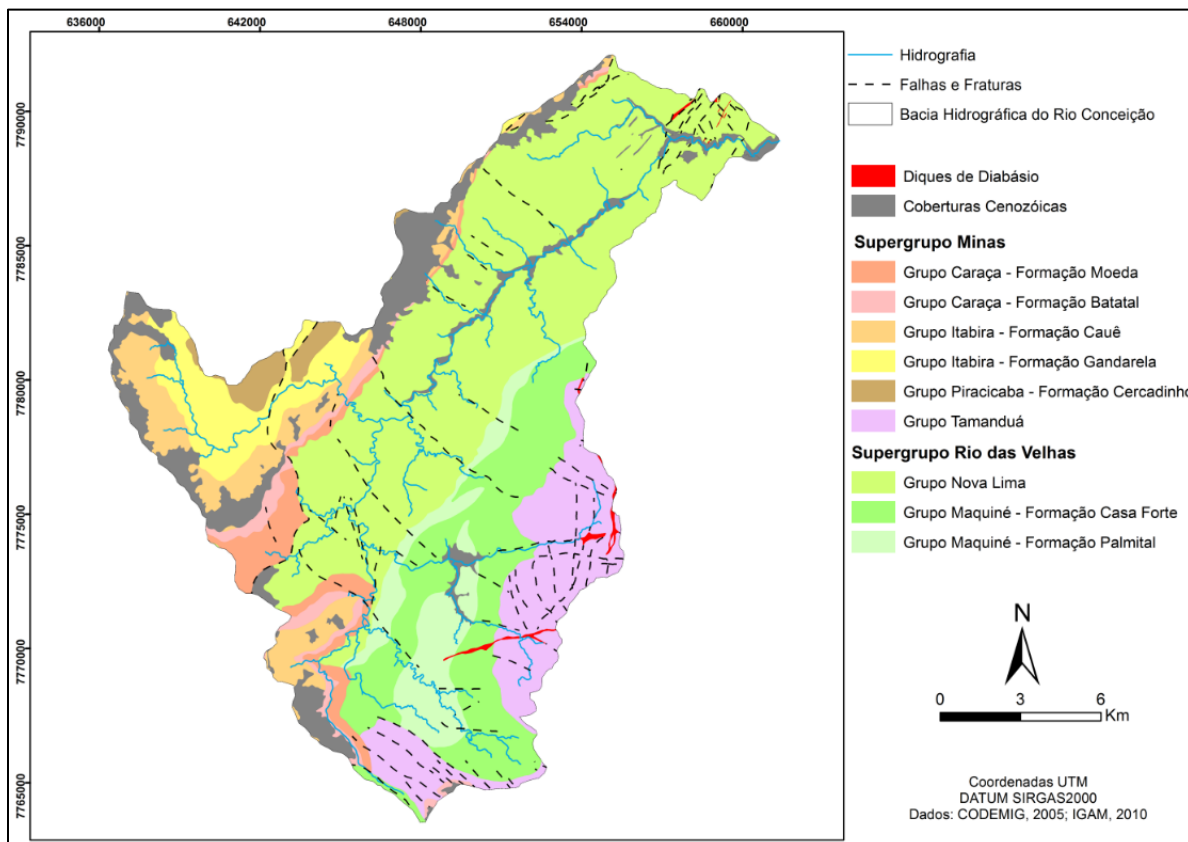


Figura 3: Mapa geológico da bacia do rio Conceição.

Diversos estudos apontam para a importância da tectônica cenozóica na evolução do modelado do Quadrilátero Ferrífero, sobretudo no tocante a momentos de intensa dissecação do relevo provocados por soerguimentos epirogenéticos do Escudo Brasileiro e a movimentos diferenciais de blocos (MEDINA et al., 2005; BARROS e MAGALHÃES JÚNIOR, 2018).

Essas variações nos inputs e outputs energéticos da bacia ocasionam a formação de distintos registros deposicionais aluviais escalonados (BARROS e MAGALHÃES JÚNIOR, 2013). Esses depósitos podem ser cimentados por ferro mobilizado das formações ferríferas bandadas, precipitando em ambiente de calha pela oscilação do nível freático (BARROS et al., 2016). Couraças ferruginosas em calhas fluviais são uma singularidade do Quadrilátero Ferrífero, indicando a ocorrência de uma forma de encouraçamento distinta da comumente tratada na literatura. Neste caso, seixos e cascalhos imóveis e cimentados por óxi-hidróxidos de ferro, fornecem resistência aos processos abrasivos (MAGALHÃES JÚNIOR et al., 2008; BARROS, 2012).

Segundo a classificação climática de Köppen, as áreas mais elevadas do Quadrilátero Ferrífero possuem clima Cwb (tropical de altitude, com verão chuvoso e ameno) e as áreas mais deprimidas apresentam Cwa (tropical de altitude, com verão chuvoso e quente). Diversos estudos apontam para a ocorrência de flutuações climáticas ao longo do Quaternário no Quadrilátero Ferrífero (BARROS et al., 2016), as quais tiveram papel significativo na formação dos pacotes sedimentares aluviais preservados nos diferentes níveis deposicionais e até mesmo na calha atual.

Procedimentos e técnicas adotadas

Os procedimentos realizados em gabinete envolveram o levantamento de informações sobre a área de estudo, visando um conhecimento do “estado-da-arte” das pesquisas na região, bem como a aquisição de dados cartográficos disponíveis e seu tratamento pelo software ArcGIS®, em sua versão 10.6. Posteriormente, foi realizada a aplicação de parâmetros morfométricos que visam auxiliar na compreensão dos processos de encouraçamento e sua relação com a morfologia e a morfodinâmica fluvial.

Para contribuir com novas técnicas para a investigação dos processos de encouraçamento, foram aplicados o (i) Índice de Concentração da Rugosidade (ICR), (ii) densidade de lineamentos, (iii) o Índice de Gradiente (I_g) e o (iv) coeficiente de determinação R² sobre o modelo de regressão simples não-linear logarítmico.

O ICR é uma técnica que possibilita a identificação de unidades homogêneas em termos morfológicos, quantificando e compartimentando o relevo a partir da distribuição espacial da declividade das vertentes. Para o cálculo do ICR, foi utilizado o estimador de densidade de Kernel e atribuído valores entre 1 e 5 para o intervalo de classes de densidade.

Para a análise de densidade de lineamentos foi utilizado o modelo digital de elevação disponibilizado pelo Advanced Land Observing Satellite (ALOS) através do sensor Phased Arrayed type L-Band SAR (PALSAR) (de resolução espacial de 12,5m), sendo extraídos os sombreamentos do relevo nos azimutes 45, 315 e 359, com ângulo de inclinação solar de 35°. Posteriormente foram traçados os principais lineamentos identificados na superfície, sendo muitos acompanhando linhas de talvegue e interflúvio. Com a base de lineamento foi utilizado o estimador de densidade de Kernel, sendo atribuídos valores de 1 a 5, sendo quando mais próximo de 5, maior a densidade de linhas mapeadas por unidade de área.

Por sua vez, o I_g resulta da relação entre a amplitude altimétrica do canal (A_c), ou de algum segmento fluvial, e o comprimento do mesmo (C_c), indicando o potencial energético do curso d'água a partir da declividade (CHRISTOFOLETTI, 1981) (Equação 1).

Equação 1: Índice de Gradiente.

$$I_g = A_c \div C_c$$

Para a aplicação do modelo de regressão simples não-linear logarítmico, seguiu-se os pressupostos estabelecidos por Henriques e Valadão (2017). Segundo os autores, a análise de regressão linear corresponde a uma modelagem estatística que permite explicar o comportamento de Y em relação a X (variação entre altimetria e extensão) e representação bidimensional da extensão total dos canais fluviais. É gerada, portanto, uma linha de tendência logarítmica linear negativa, que representaria a geometria ideal para perfis longitudinais em condições de relativo equilíbrio, conforme apresentado por Christofolleti (1980) e Rãdoane et al. (2003). Após realizar a regressão entre as variáveis Y e X, isto é, altitude por comprimento do canal entre sua cabeceira e foz, foi aplicado o coeficiente de determinação R^2 para verificar quantitativamente a associação entre o perfil longitudinal do canal fluvial e o modelo de regressão que representaria as condições mais próximas do ideal. Para se obter o coeficiente, foi aplicada a equação 2, seguindo os pressupostos apresentados por Henriques e Valadão (2017):

Equação 2: Coeficiente de determinação R^2 .

$$R^2 = \frac{\left[(\beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2) - \frac{\sum (\beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2)}{n} \right]^2}{(y - \bar{y})^2}$$

Sendo: β_0 como constante de regressão correspondente ao ponto onde a reta de regressão x intercepta o eixo y ; β_1 e β_2 enquanto coeficiente de regressão, o qual representa a variação de y em função da variação de uma unidade da variável x ; e X_i como i -ésimo nível da variável independente X ($i = 1, 2, \dots, n$). O valor de R^2 , por sua vez, varia de 0 a 1, cujos valores próximos a 1 indicam uma proximidade do perfil longitudinal com o modelo de regressão logarítmico ideal.

Etapa de campo

Foram realizadas campanhas de campo ao longo do vale do rio Conceição para uma melhor compreensão das características físicas da área, bem como para a identificação in loco de segmentos fluviais potencialmente encouraçados. Para tanto, foi investigada visualmente a disposição espacial dos pavimentos detríticos no leito (seixos e cascalhos) e mapeados os locais de sua ocorrência. Em seguida, foram investigadas as características gerais destes trechos quanto à presença de couraças ferruginosas, aos ambientes marginais, posição na bacia/vale, arcabouço litoestrutural e relação com paleoambientes deposicionais aluviais.

Para o levantamento de informações em campo foi aplicado um check-list voltado à identificação de feições de fundos de vale (barras deposicionais e barras detríticas erosivas) e à caracterização de material de calha, tomando como base descrições de leito feitas por Rosgen (1994) e Brierley e Fryirs (2005), e que já foram adotadas no estudo de processos de encouraçamento por Cota et al. (2018).

Após a aplicação do check-list e o mapeamento das ocorrências de pavimentos detríticos, foi investigada a disposição espacial dos clusters e as relações com a morfodinâmica e a morfologia do canal, bem como com os sistemas poço-corredeira. Para subsidiar as análises sobre a distribuição espacial dos pavimentos detríticos nos trechos fluviais investigados, foram confeccionados modelos representativos sob a forma de blocos-diagrama, a partir do software CorelDRAW X8®.

III. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Morfologia do perfil longitudinal e do leito e a distribuição dos encouraçamentos

Foram selecionados e investigados sete segmentos fluviais no rio Conceição (Figura 4), que se distribuem ao longo do Alto curso (S1), do Médio curso (S2, S3 e S4) e do Baixo curso (S5, S6 e S7). Foi possível distinguir três morfologias de leito nos segmentos investigados, a saber: leito em degrau-poço, leito com dunas e ripples e leito em poço-corredeira.

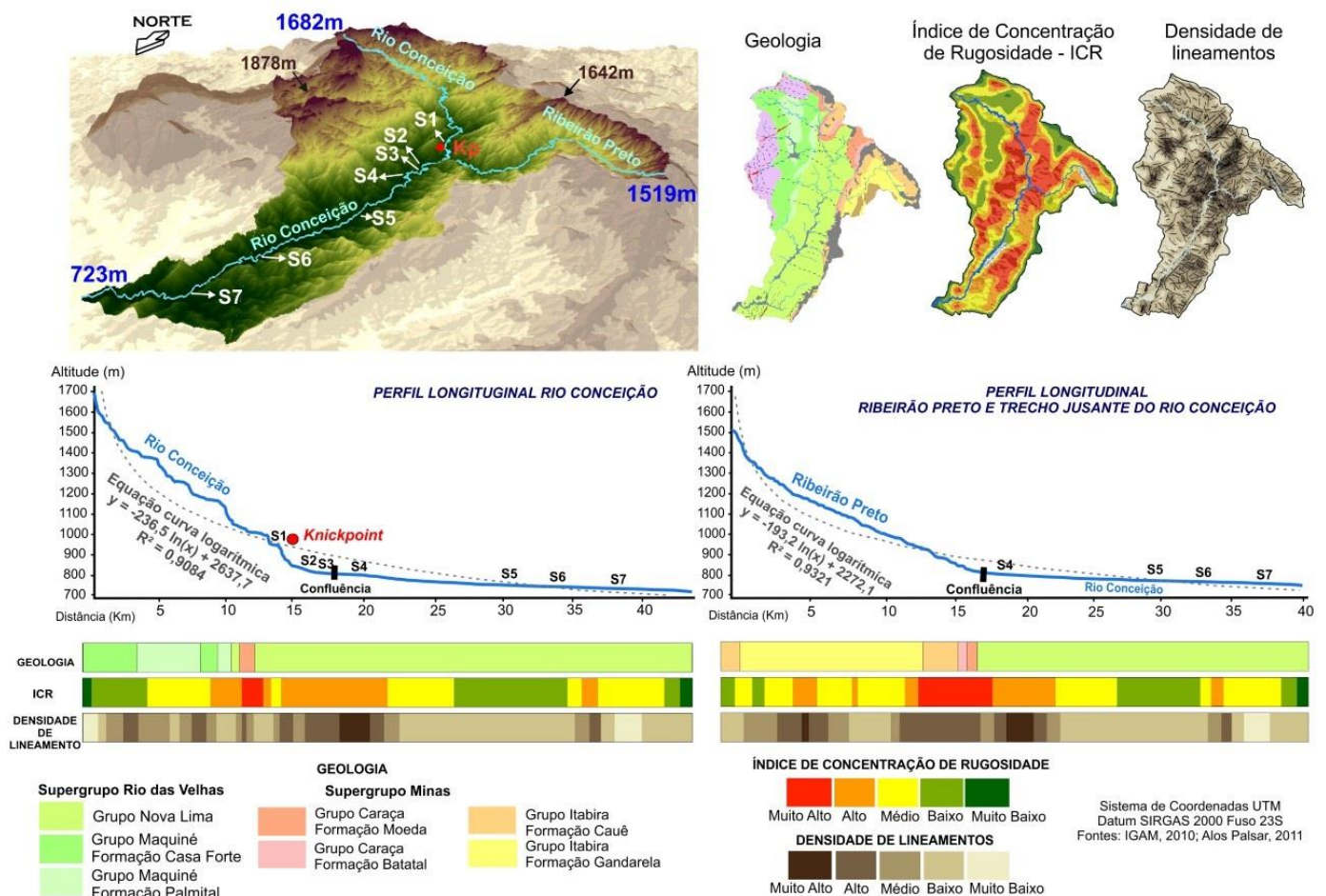


Figura 4: Aplicação do coeficiente R^2 , do ICR e da densidade de lineamentos nos segmentos fluviais investigados.

Apesar de o valor do coeficiente R^2 ser de 0,9084 para todo o perfil longitudinal, ou seja, próximo de 1, o perfil apresenta características distintas ao longo do vale, tendo comportamento positivo em relação à linha de tendência logarítmica no S1, e comportamento negativo nos demais trechos após o knickpoint (Figura 4).

No primeiro segmento fluvial (S1) ocorre a maior declividade dentre os trechos investigados, com valores do lg de 2,4% que, por sua vez, favorece maior energia do fluxo e impossibilita a formação de agrupamentos de

seixos e cascalhos, sendo a morfologia de leito característica deste trecho em degrau-poço (Figura 5). O leito apresenta uma transição abrupta de morfologia antes e após o knickpoint, sendo o segundo segmento fluvial investigado (S2) uma representação da configuração do leito que permanece até a confluência com o ribeirão Preto. Apesar de a densidade de lineamentos permanecer alta no trecho investigado, não foram encontradas evidências de movimentos de soerguimento ou rebaixamento do nível de base. Assim, a ocorrência do knickpoint à montante do S2 possivelmente está associada à erosão diferencial proporcionada pelo afloramento do Grupo Caraça (Figura 4).

Após o knickpoint, o perfil longitudinal do canal deixa de ter um comportamento positivo e passa a ter um comportamento negativo em relação a curva logarítmica (Figura 4). Deste modo, há uma alteração nas condições energéticas do curso d'água, que passa a apresentar valores do Ig de 1,3%, indicando baixa declividade e predomínio de processos de agradação, fato este refletido na morfologia do leito e nas características do escoamento, que apresenta condições de fluxo lântico. Neste sentido, o material de calha composto principalmente por depósitos de areia é o que condiciona a ocorrência da morfologia em dunas e ripples (Figura 5).

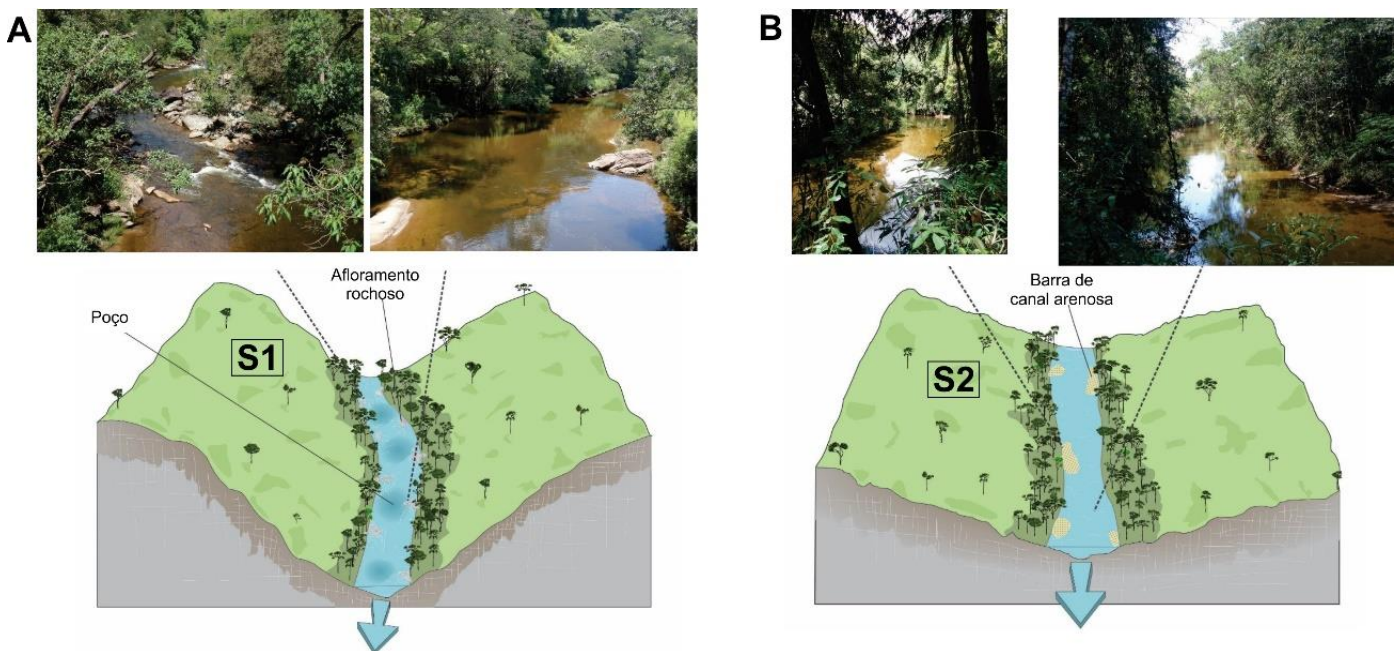


Figura 5: Aspectos dos segmentos S1 e S2.

O terceiro segmento fluvial investigado (S3) se localiza na confluência do rio Conceição com o ribeirão Preto, e possui morfologia de leito distinta dos segmentos à montante. No S3 evidencia-se o papel do tributário no fornecimento de carga sedimentar para o curso d'água principal, o qual passa a apresentar predomínio de

seixos e cascalhos até a confluência do rio Conceição com o ribeirão Caraça. Ou seja, contempla o restante dos segmentos fluviais investigados. Estes sedimentos de calha encontram-se agrupados e separados por poços, caracterizando a morfologia poço-corredeira (Figura 6).

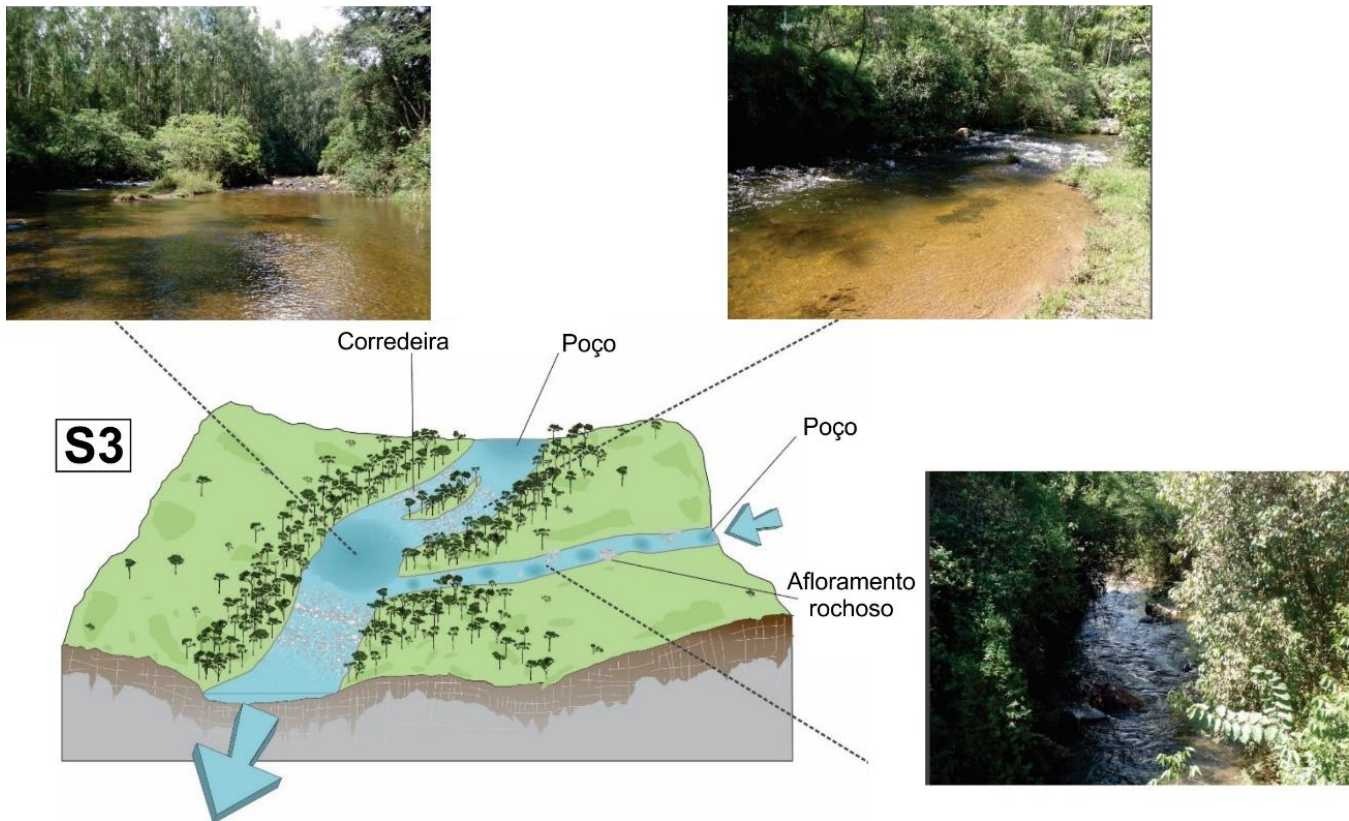


Figura 6: Aspectos do segmento S3.

O fato da calha do Rio Conceição começar a ser pavimentada por clastos somente a partir da confluência com o ribeirão Preto levantou questionamentos acerca do papel do tributário no fornecimento de material sedimentar. O perfil longitudinal de ambos os cursos d'água se assemelham (Figura 4), tendo comportamento negativo em relação à curva logarítmica na confluência e comportamento positivo em direção às cabeceiras.

Ao se analisar o traçado do ribeirão Preto, é possível identificar duas mudanças abruptas na direção do escoamento (cotovelos de drenagem), com angulações próximas a 90° (Figura 71). Essa configuração pode sinalizar capturas fluviais (BISHOP, 1995) que, no caso, envolveriam capturas de segmentos da drenagem da bacia do rio Barão de Cocais.

¹ Com base no alinhamento de cristas foram traçados possíveis paleodivisores de drenagem.

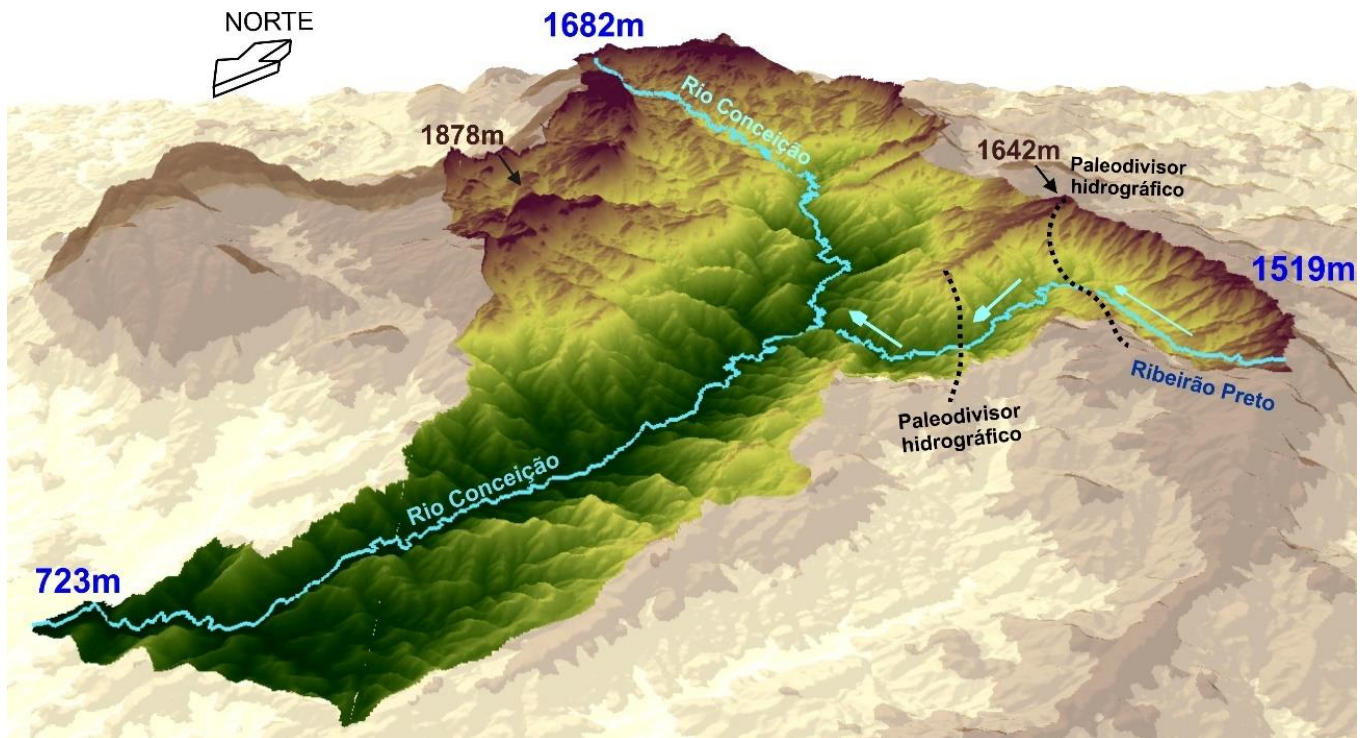


Figura 7: Mudanças na direção do escoamento do Ribeirão Preto.

Medina et al. (2005) e Barros (2012) corroboram com esta premissa ao afirmarem que um antigo afluente direto do rio Conceição capturou o ribeirão Preto, então afluente do rio Barão de Cocais. Essa expansão da bacia do rio Conceição sobre a bacia do rio Barão de Cocais representou a disponibilização de novas áreas fonte de sedimentos do Supergrupo Minas, distintas das do rio Conceição à montante da confluência. Nas cabeceiras do rio Conceição, as rochas do Supergrupo Minas estão restritas a pequenas porções próximas aos interflúvios da bacia, enquanto toda a sub-bacia do ribeirão Preto drena esta unidade geológica (Figura 4). Assim, torna-se evidente que a erosão das rochas do Supergrupo Minas pelo ribeirão Preto esteja fornecendo os clastos que pavimentam a calha do rio Conceição.

O comportamento negativo do perfil longitudinal em relação à linha de tendência logarítmica permite valores de I_g entre 1,3% e 1,6% no S3 e demais segmentos investigados, indicando baixa declividade e acúmulo de material aluvial. Consoante, todos os segmentos investigados localizados à jusante da confluência apresentam seixos e cascalhos em ambiente de calha, e uma morfologia marcada por uma sucessão de poços e corredeiras. No quarto (S4), quinto (S5) e sexto segmento fluvial (S6) há o afloramento de couraças ferruginosas no leito e nas margens do canal (Figura 8).

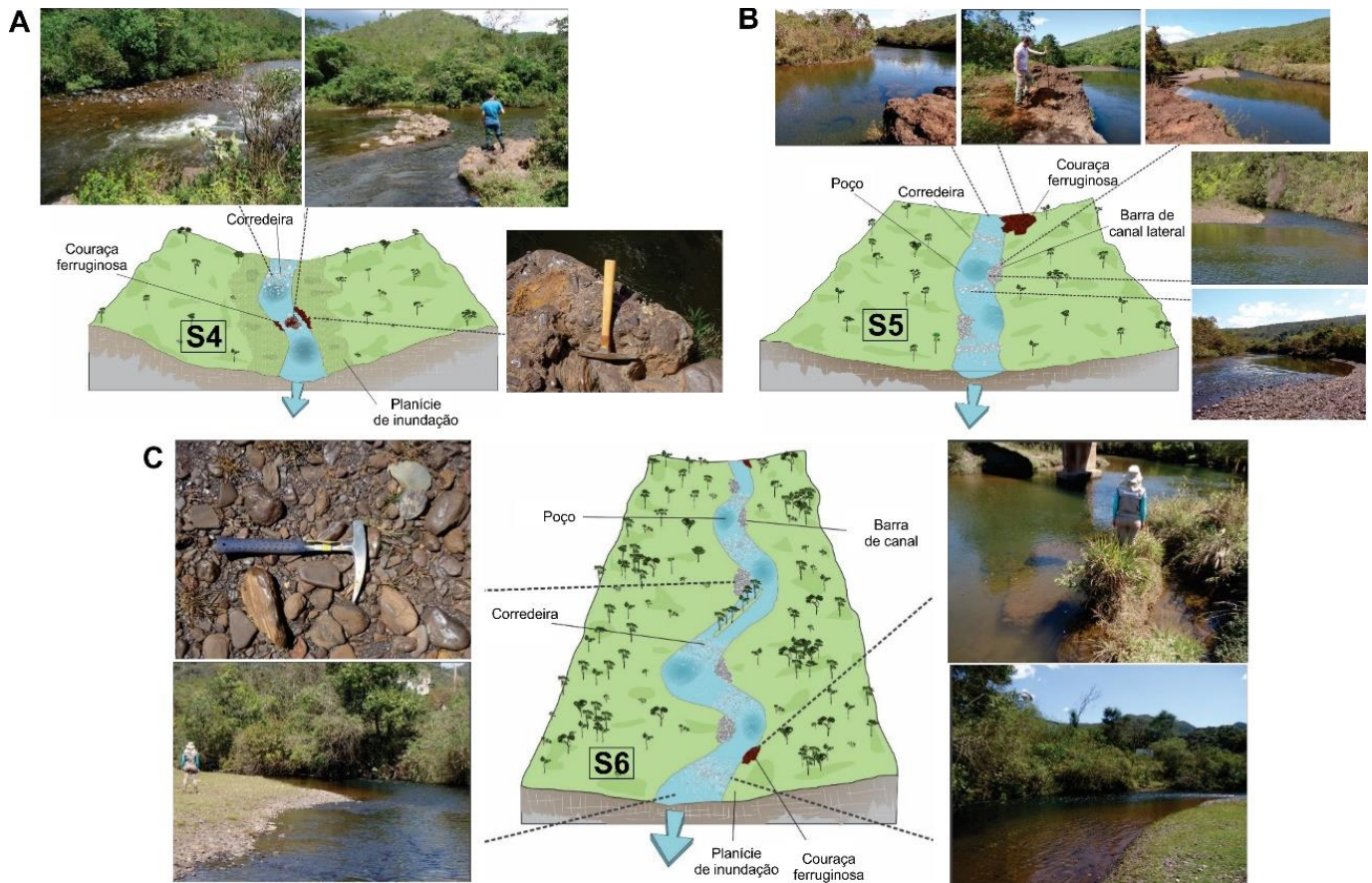


Figura 8: Aspectos dos segmentos S4, S5 e S6.

Destaca-se o predomínio de processos de erosão na margem côncava e deposição na margem convexa, fornecendo indícios de que as condições de fluxo típicas da morfologia em poço-corredeira estão condicionando a morfodinâmica do canal. Esse aspecto se torna mais evidente de montante para jusante.

A posição das couraças cercada por BIFs que sustentam as porções elevadas do relevo, algo típico no Quadrilátero Ferrífero, indica que a origem do material cimentante é alóctone em relação à calha. Segundo Barros (2015), que analisou a micromorfologia e a gênese das couraças do rio Conceição, a cimentação do material grosso de forma contínua indica que as couraças foram formadas pela chegada do ferro em solução na calha, ocupando os poros entre os sedimentos inconsolidados.

Proveniente do intemperismo geoquímico das formações ferríferas bandadas, o ferro foi levado em solução para o fundo do vale e precipitado nos depósitos temporariamente saturados das planícies. Sob um regime hidrológico fortemente sazonal, a planície foi submetida a sucessivos processos de saturação (nas inundações) e formação de ambientes insaturados (nas estiagens). Com tais condições favoráveis aos processos de oxirredução (Redox), o ferro pôde cimentar os clastos, formando as couraças. Deste modo, a sua ocorrência

no leito atual do rio Conceição se deve à dinâmica fluvial de migração lateral que está expondo continuamente as couraças formadas em contexto de planície.

O segmento S7 apresenta características semelhantes aos outros em poço-corredeira já apresentados, sendo selecionado devido à presença de um nível deposicional aluvial marginal ao curso d'água que apresenta um nível basal de seixos e cascalhos que se estende para a calha fluvial (Figura 9). Barros (2012) e Barros e Magalhães Júnior (2013) descrevem esse depósito marcado pela ocorrência de couraças na base como o terceiro nível deposicional mais antigo da bacia (N3). Os autores propõem, ainda, que o material arenoso e argilo-siltoso que recobre a coureira pode ser parte da fácies superior do N3 e/ou decorrente da formação de um ou dois níveis deposicionais aluviais (N2 ou N1) embutidos no N3, apesar de não haver uma correlação exata em termos estratigráficos.

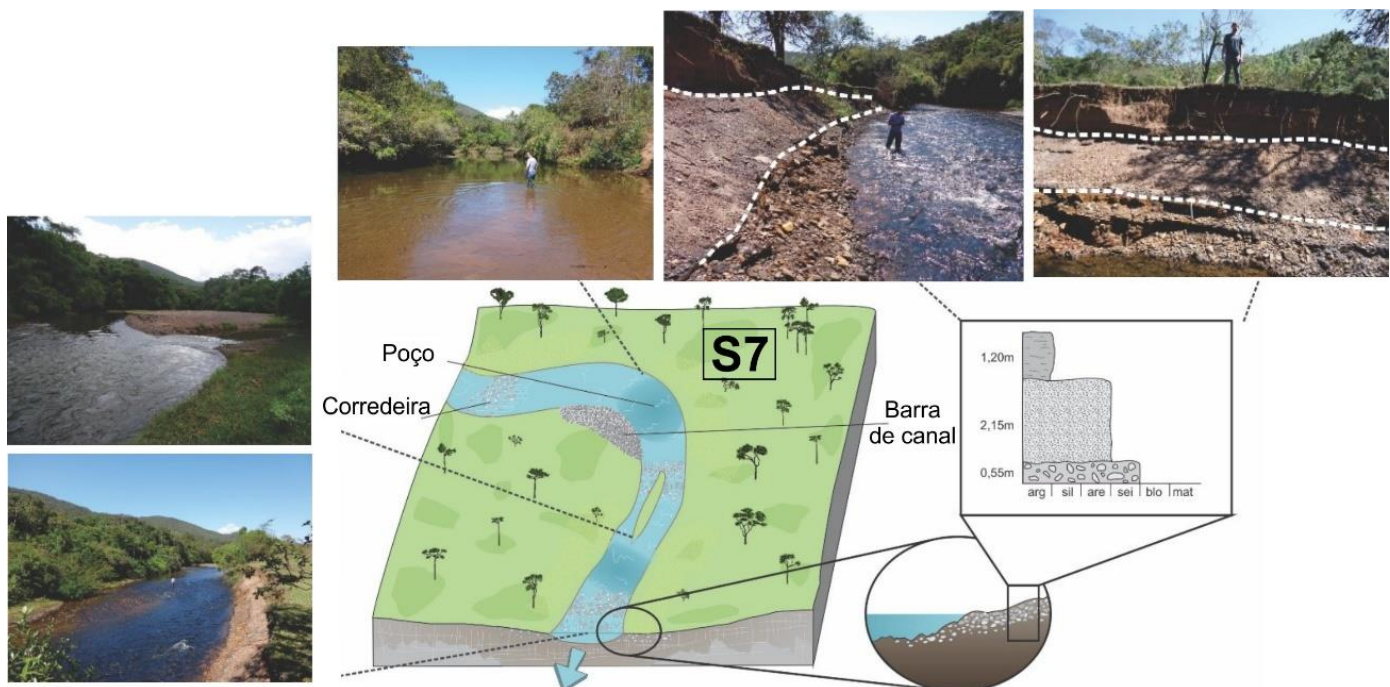


Figura 9: Aspectos do segmento S7.

Consoante, o pavimento de clastos na calha atual está na mesma posição da base do N3, ou seja, o rio não sofreu encaixamento a partir do evento que formou este nível, o qual está sendo desmontado pela dinâmica atual. Portanto, as diversas couraças que afloram no leito e nas margens são remanescentes do N3.

Implicações do encouraçamento das calhas para a morfodinâmica dos cursos d'água

As distintas configurações de fundo de vale ao longo do rio Conceição levam a diferentes reflexões acerca das implicações da morfologia de leito para a morfodinâmica do curso d'água, bem como sua associação com fatores estruturais.

O S1 se assemelha a leitos rochosos identificados por Cota et al. (2018) no Córrego do Rio Grande, afluente do ribeirão do Chiqueiro (Serra do Espinhaço Meridional). Neste caso, os afloramentos rochosos condicionam a morfologia em degrau-poço, não ocorrendo os processos de encouraçamento. A jusante do S1, há o knickpoint que altera a dinâmica erosiva e sedimentar do curso d'água, tornando o perfil longitudinal negativo em relação à curva de tendência logarítmica. Esse aspecto é determinante para a morfologia e para a morfodinâmica do rio Conceição, que passa a apresentar declividade baixa e linear. Assim, passam a predominar processos de agradação, sendo os depósitos de calha do S2 compostos majoritariamente por areia e com morfologia ondulada com dunas e ripples. Por outro lado, o S2 não apresenta depósitos expressivos de cascalhos, típicos de leitos encouraçados, não havendo nenhum indício de que algum material grosso esteja “blindando” o leito.

A partir da confluência do rio Conceição com o ribeirão Preto, o curso d'água apresenta morfologia em poço-corredeira, típica de leitos com depósitos de clastos. Essas características persistem do S3 até a confluência com o ribeirão Caraça, abrangendo o restante dos trechos investigados. A simples presença de clusters na calha altera as condições de fluxo, proporcionando um rearranjo na disposição do material grosso no leito. O fluxo converge quando entra em contato com esse material (corredeira) e diverge quando supera o pavimento detrítico (poço) (FERNANDEZ, 2009). Essas variáveis hidrológicas são responsáveis por desenvolver a morfologia de leito em poço-corredeira. Os clusters podem adquirir diversas formações espaciais que, por sua vez, são determinadas pelas condições de fluxo atuantes (HEAYS, 2011). Deste modo, mesmo que durante seu processo de formação os clusters estivessem dispostos linearmente ao longo do vale (sem a presença de poços), a dinâmica fluvial (ação do fluxo) condicionaria um rearranjo na distribuição espacial deste material, favorecendo a formação de uma morfologia em poço-corredeira. Com base neste pressuposto, é possível inferir que os conceitos comumente trabalhados na literatura, que associam encouraçamento à simples presença de um material imóvel ou temporariamente imóvel in situ (BRIDGE, 2003; ALMEDEIJ e DIPLAS, 2005), são limitados sob a perspectiva geomorfológica. A própria ação do fluxo altera, sazonalmente ou não, a disposição espacial dos

clusters e favorece a formação de uma morfologia de leito de poço-corredeira (MONTGOMERY e BUFFINGTON, 1998).

Nesta perspectiva, portanto, somente os pavimentos detríticos que condicionam alterações na morfologia do leito se configurariam como encouraçados. Os seixos e cascalhos imóveis presentes nas concreções ferruginosas, por exemplo, também se enquadram neste cenário, pois executam papel similar ao das corredeiras por serem resistentes à ação do fluxo. Não obstante, por serem compostas por sedimentos concrecionados por ferro, as couraças não possuem a estabilidade associada diretamente às condições de fluxo, mas sim às condições eletroquímicas que mantém o material coeso. Assim, o encouraçamento proporcionado pelas couraças possui um maior grau de resistência, justamente por sua estabilidade não depender das variações do regime fluvial. Esse aspecto, por sua vez, revela que as técnicas de mensuração de transporte fluvial adotadas comumente não são adequadas para o contexto do rio Conceição, pois a remobilização dos seixos que compõem as couraças não depende diretamente das vazões.

IV. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho apresentou uma revisão do conceito de encouraçamento atualmente adotado nas pesquisas geomorfológicas, evidenciando as limitações do arcabouço teórico presente na literatura, sobretudo internacional, e da adoção de critérios puramente hidrológicos para a investigação dos pavimentos detríticos. Este panorama teórico não considera as consequências dos clusters para a morfologia e para a morfodinâmica do canal fluvial.

Consoante, há uma difusão de estudos voltados para a validação de técnicas, sendo este aspecto evidente nas pesquisas sobre encouraçamento. A grande maioria dos trabalhos promove a investigação das técnicas hidrológicas de quantificação do transporte sedimentar fluvial, não fazendo correlações com a morfologia e/ou a morfodinâmica do canal. Por conseguinte, há um desafio nas investigações geomorfológicas acerca do papel dos pavimentos detríticos para a morfologia e para a morfodinâmica do canal fluvial. Nesse sentido, a investigação dos pavimentos detríticos presentes ao longo do rio Conceição possibilitou analisar as consequências da presença dos clusters para a morfologia e para a morfodinâmica do curso d'água.

Evidências de campo apontam que a partir da confluência com o ribeirão Preto, os clusters dispostos em ambiente de calha condicionam, pelas condições de fluxo no contato com os pavimentos detríticos, a morfologia do canal em poço-corredeira e sua morfodinâmica marcada por processos de erosão na margem côncava e

deposição na margem convexa. Não obstante, baseado em aspectos hidrossedimentares atuantes, o papel da morfodinâmica resulta em uma maior sinuosidade do canal.

As couraças ferruginosas presentes no rio Conceição, pelas condições eletroquímicas que mantêm o material coeso, exercem papel similar ao das corredeiras, sendo resistentes à ação do fluxo e blindando o leito fluvial. O encouraçamento, portanto, é marcado pela ocorrência de seixos soltos, porém imóveis, e pelas couraças. A pesquisa revela, ainda, que as técnicas hidrológicas adotadas nos estudos sobre encouraçamento não são válidas para o contexto do rio Conceição, pois as couraças não respondem diretamente às variações de fluxo, podendo permanecer imóveis mesmo em condições de altas vazões.

Foi possível fazer uma associação da ocorrência dos pavimentos detríticos com as diferentes características do perfil longitudinal. Deste modo, nos locais onde o perfil apresenta comportamento negativo em relação à linha de tendência logarítmica há o predomínio de processos de agradação, formando os pavimentos detríticos. Este fato pode ser percebido após o knickpoint, onde as formas de leito encontradas são marcadas pela deposição de material aluvial. Para a formação destes pavimentos é necessário, além do ambiente de baixa energia, o aporte sedimentar de clastos, que só ocorre após a confluência com o ribeirão Preto.

Reflexões sobre a gênese dos pavimentos detríticos, contudo, são mais complexas e exigem novas investigações baseadas nos fatores condicionantes do entulhamento dos fundos de vale. Aferições de campo e análises baseadas nos dados geológico-geomorfológicos disponíveis associam a origem dos pavimentos a capturas fluviais (disponibilização de novas áreas fonte de sedimentos) e à dinâmica atual do rio Conceição. O canal remobiliza clastos presentes em paleoníveis deposicionais e expõe, pela migração lateral, as couraças ferruginosas formadas em contexto de planície.

V. REFERÊNCIAS

ALKMIM, F. F.; MARSHAK, S. Transamazonian Orogeny in the Southern São Francisco Craton Region, Minas Gerais, Brazil: evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero. *Precambrian Research*, v. 90, n. 1-2, p. 29–58, 1998.

ALMEDEIJ, J.; DIPLAS, P. Bed load sediment transport in ephemeral and perennial gravel bed streams. *Eos*, v. 86, n. 44, p. 429-434, 2005.

BARROS, L. F. P.; COE, H. H. G.; SEIXAS, A. P.; MAGALHÃES JÚNIOR, A. P.; MACARIO, K. C. D. Paleobiogeoclimatic scenarios of the Late Quaternary inferred from fluvial deposits of the Quadrilátero Ferrífero (Southeastern Brazil), *Journal of South American Earth Sciences*, v. 67, p. 71-88, 2016.

- BARROS, L. F. P. Eventos sedimentares do quaternário e evolução morfodinâmica do vale do rio Conceição – Quadrilátero Ferrífero/MG. 2012. Dissertação (Mestrado em Análise Ambiental) - Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.
- BARROS, L. F. P. Implicações Geomorfológicas e Paleoambientais de Registros Sedimentares Fluviais do Quadrilátero Ferrífero – Minas Gerais. 2015. Tese (Doutorado em Análise Ambiental) - Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.
- BARROS, L. F. P.; MAGALHÃES JÚNIOR, A. P. Morfogênese no Quadrilátero Ferrífero/MG no Quaternário Superior: Processos Fluviais e Condicionantes Paleoambientais na Bacia do Rio Das Velhas. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 19, n. 3, p. 547-565, 2018.
- BARROS, L. F. P.; MAGALHÃES JÚNIOR, A. P. Quaternary alluvial sedimentation in the Conceição river valley, southeastern Brazil. *Brazilian Journal of Geology*, v. 43, n. 3, p. 535–554, 2013.
- BARROS, P. H. C. A. Processos de encouraçamento de calhas fluviais: Panorama teórico-conceitual e o exemplo do Rio Conceição (Quadrilátero Ferrífero-MG). 2010. Monografia (Graduação em Geografia) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.
- BISHOP, P. Drainage rearrangement by river capture, beheading and diversion. *Progress in Physical Geography*, v. 19, n. 4, p. 449-473, 1995.
- BRIDGE, J. S. *Rivers and Floodplains*. Blackwell Science, Oxford, 2003. 492 p.
- BRIERLEY, G. J.; FRYIRS, K. A. *Geomorphology and River Management: Applications of the River Styles Framework*. Oxford, UK: Blackwell Publications, 2005. 398 p.
- CHARLTON, R. *Fundamentals of fluvial geomorphology*. London; New York: Routledge, 2008. 234 p.
- CHRISTOFOLLETTI, A. *Geomorfologia*. São Paulo: Edgard Blucher, 1980. 188 p.
- CHRISTOFOLETTI, A. *Geomorfologia fluvial*. São Paulo: Edgar Blucher, 1981. 313 p.
- COTA, G. E. M.; MAGALHÃES JÚNIOR, A. P.; BARROS, L. F. P. Processos de Encouraçamento de Leitões Fluviais: sistematização de bases teóricas e estudo de caso na Serra do Espinhaço Meridional (MG). *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 19, n. 4, p. 777-791, 2018.
- COTA, G. E. M. Processos de encouraçamento de leitos fluviais: sistematização de bases teóricas e estudo de caso na Serra do Espinhaço Meridional. 2017. Monografia (Graduação em Geografia) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.
- FERNANDEZ, O. V. Q. Discriminação de habitats aquáticos no Córrego Guavirá, Marechal Cândido Rondon (PR). *Geografias*, v. 5, n. 1, p. 22-36, 2009.
- GOUDIE, A. S. *Encyclopedia of Geomorphology*. Londres: Routledge, 2004. 1156 p.
- HARTMANN, L. A.; ENDO, I.; SUITA, M. T. F.; SANTOS, J. O. S.; FRANTZ, J. C.; CARNEIRO, M. A.; MCNAUGHTON, N. J.; BARLEY, M. Provenance and age delimitation of Quadrilátero Ferrífero sandstones based on zircon U-Pb isotopes. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 20, n. 4, p. 273-285, 2006.
- HEAYS, K. G. Cluster formation and Stream-bed Armouring: A photogrammetric study. 2011. Tese (Doutorado) – The University of Auckland, Auckland (Nova Zelândia), 2011.

HENRIQUES, R. J.; VALADÃO, R. C. Contribuições do modelo de regressão não-linear logarítmico aplicado à análise de perfis longitudinais em geomorfologia fluvial. Revista Geografias, Edição Especial - II Simpósio Modelagem de Sistemas Ambientais e Gestão da Paisagem: Desafios e aplicações, p. 54-70, 2017.

KELLER, E. A. Areal sorting of bed load material: the hypothesis of velocity reversal. Bulletin of the Geological Society of America, v. 82, p. 753-756, 1971.

MAGALHÃES JÚNIOR, A. P.; SANTOS, G. B.; CHEREM, L. F. S. Processos de Encouraçamento da Calha do Alto Rio das Velhas e seus Reflexos na Dinâmica Fluvial Moderna, Quadrilátero Ferrífero, MG. In: II Encontro Latino Americano de Geomorfologia e VII Simpósio Nacional de Geomorfologia, 2008, Belo Horizonte. Anais do VII SINAGEO. Belo Horizonte: Tec Art, 2008. v. 1. p. 120-130.

MEDINA, A. I.; DANTAS, M. E.; SAADI, A. Geomorfologia. In: PROJETO APA SUL RMBH -Estudos do Meio Físico. v. 6. Belo Horizonte: CPRM/SEMAD/CEMIG, 2005. 45 p.

MONTGOMERY, D. R.; BUFFINGTON, J. M. Channel processes, classification, and response. In: NAIMAN, R. J.; BILBY, R. E. River Ecology and Management: Lessons from the Pacific Coastal Ecoregion. New York: Springer, 1998. p. 13-42.

RĂDOANE, M.; RĂDOANE, N. DUMITRIU, D. Geomorphological evolution of longitudinal river profiles in the Carpathians. Geomorphology, v. 50, n. 4, p. 293-306, 2003.

ROSGEN, D. L. A classification of natural rivers. Catena, v. 22, n. 3, p. 169-199, 1994.

STEVAUX, J. C.; PAES, R. J.; FRANCO, A. A.; ETCHEBEHERE, M. L.; FUJITA, R. H. Morphodynamics in the confluence of large regulated rivers: the case of Paraná and Paranapanema rivers. Latin American Journal of Sedimentology and Basin Analysis. v. 16, n. 2, p. 101-109, 2009.

XU, J. Underlying gravel layers in large sand bed river and their influence on downstream-dam channel adjustment. Geomorphology, v. 17, p. 351-359, 1996.