

Contribuições do modelo de regressão não-linear logarítmico aplicado à análise de perfis longitudinais em geomorfologia fluvial

Renata Jordan Henriques
Menstranda em Geografia
Universidade Federal de Minas Gerais

Roberto Célio Valadão
Professor titular do Departamento de Geografia
Universidade Federal de Minas Gerais

Resumo

Este trabalho trata sobre o comportamento geométrico de perfis longitudinais e sua recorrente associação enquanto indicador sobre as condições hidrodinâmicas em geomorfologia fluvial. Na literatura é recorrente a investigação sobre perfis em equilíbrio (graded profile) resultarem em assumir uma curvatura logarítmica linear negativa de concavidade que se atenua em direção jusante. Todavia, a simples observação morfológica do perfil não é suficiente para indicar as condições entre erosão, deposição e distribuição de energia no sistema. Neste contexto este artigo apresenta o método estatístico de regressão não-linear logarítmico como instrumento para avaliar quantitativamente o quanto o perfil longitudinal de dado curso fluvial se aproxima do perfil ideal de equilíbrio, bem como indicar possíveis condicionantes que possam estar influenciando sua geometria. Como cenário são utilizados os principais afluentes que drenam parte do divisor hidrográfico das bacias dos rios das Velhas e Paraopeba, em Minas Gerais. Nesses afluentes o método se revela adequado como instrumento para avaliar a geometria dos perfis longitudinais, bem como o arcabouço geológico é o principal condicionante que sugere influenciar a morfologia dos perfis, ao passo que a variabilidade da cobertura pedológica se revela como indicador da maneira como o curso d'água possa dissecar a superfície.

Palavras-chave: Geomorfologia fluvial;
Modelagem estatística; Regressão não-linear

Abstract:

This paper deals with the investigation of the geometric behavior of longitudinal profiles and its recurrent association as an indicator of hydrodynamic conditions in fluvial geomorphology. In the literature it is recurrent the investigation of graded profile results in assuming a negative linear logarithmic curvature of concavity that attenuates in downstream direction. However, the simple morphological observation of the profile is not sufficient to indicate the conditions between erosion, deposition and distribution of energy in the system. In this context this paper presents the statistic method of non-linear logarithmic regression as an instrument to be evaluating quantitatively how much the longitudinal profile of a fluvial course approaches the ideal equilibrium profile, as well as to indicate possible conditioning factors that could influence its geometry. As a scenario, the main tributaries that drain part of the hydrographic divisor of the Velhas and Paraopeba river basins in Minas Gerais are used. In these tributaries the method is a suitable tool to evaluate the geometry of the longitudinal river profiles. The variability of the pedological cover is an indicator of the way the watercourse can dissect the surface.

Key-Words: Fluvial geomorphology; Statistic model; Non-linear regression

renatajhques@gmail.com
valadao@ufmg.br

Introdução

Em geomorfologia fluvial é recorrente a discussão acerca da geometria do perfil longitudinal como possível indicador das condições hidrodinâmicas de cursos fluviais. Em um modelo ideal, isto é, quando o balanço entre erosão e deposição do curso d'água torna-se equiparado e assume uma condição próxima do equilíbrio hidrodinâmico, a morfologia do perfil plotada em gráfico se assemelharia a uma curvatura logarítmica linear negativa cuja declividade é atenuada em direção jusante (RÃDOANE et al., 2003).

Nesse aspecto o trabalho tem por objetivo apresentar a aplicação do método estatístico de regressão não-linear logarítmico enquanto instrumento para se verificar o quanto a geometria do perfil longitudinal de um curso d'água está próximo do modelo ideal de equilíbrio preconizado na literatura. A partir da aplicação do método é gerado o coeficiente de determinação R^2 que indica a porcentagem de ajuste do modelo em relação às condições reais variando entre valores de 0 e 1, sendo 1 como modelo 100% ajustado, pois, R^2 permite avaliar a coerência do modelo. Além disto, pretende-se identificar e avaliar como possíveis fatores condicionantes possam influenciar a geometria dos perfis dos afluentes investigados.

O método foi aplicado para os principais afluentes dos rios das Velhas e Paraopeba, em Minas Gerais, que drenam parte do trecho centro-sul do divisor hidrográfico entre essas bacias. A discussão acerca das condições de equilíbrio na dinâmica hídrica, por sua vez, permeia variadas concepções explicativas e métodos de investigação que vão para além da observação morfológica dos perfis.

A escala cartográfica utilizada foi a de 1:1.000.000 em razão da extensão dos afluentes investigados além dos dados disponíveis para arcabouço geológico (1:1.000.000), cobertura pedológica (1:610.000) e os modelos digitais de elevação das missões Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) refinado no Projeto TOPODATA (INPE, 2008), de resolução espacial original de 90 metros e tratada para 30 metros, e Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) obtido pelo satélite EOS AM-1, meridiano central 46°W de resolução espacial original de 30 metros.

Perfis longitudinais e seus aspectos geométricos

Desde meados dos anos de 1950 e 1960 há uma atenção à investigação morfológica e matemática de perfis longitudinais (RÃDOANE, et al., 2003). Dada atenção é reflexo da concepção de um modelo ideal preconizado caso o curso d'água esteja em condições de "equilíbrio", ou Quase-equilíbrio. Ou seja, a forma perfil longitudinal se revelar como indicador geomorfológico do balanço erosão/deposição e uniformidade na distribuição de energia no sistema, sendo este estado dependente, também, das condições espaciais onde o curso fluvial esteja inserido (LANGBEIN e LEOPOLD, 1964; CARLSTON, 1969; SINHA e PARKER, 1996; SKLAR e DIETRICH, 1998; SELANDER, 2004; HARTVICH, 2005; BARROS et al., 2010).

Em linhas gerais o perfil é nada mais que a representação bidimensional de um corpo d'água lótico e revela a relação entre altimetria, extensão e geometria da seção. A curvatura do perfil longitudinal ao ser plotada em um gráfico, em casos de um curso fluvial estar em um estágio mais avançado de evolução e, por consequência, mais próximo das condições de equilíbrio hídrico entre fatores internos e externos, assumiria uma curvatura logarítmica linear negativa cuja concavidade é atenuada em direção jusante conforme Figura 1 (DAVIS, 1899; CHRISTOFOLLETTI, 1980; RÃDOANE et al. 2003; SELANDER, 2004).

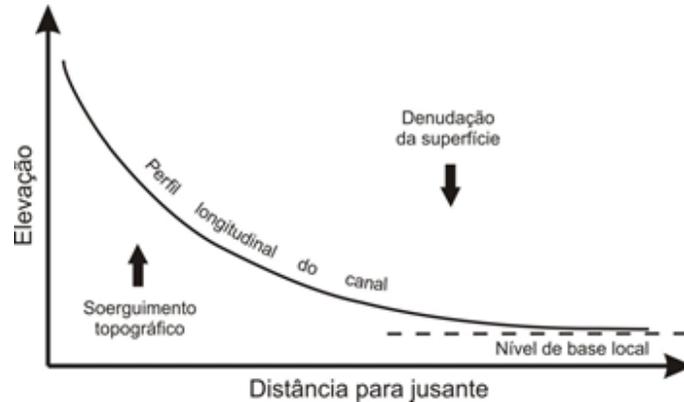


Figura 1: Representação geral do modelo ideal de um curso d'água em condições de equilíbrio entre a denudação superficial e reativações tectônicas. Esse modelo assume a geometria de uma curvatura logarítmica linear negativa

Fonte: Adaptado de Selander (2004)

Esta representação está associada às formulações matemáticas e estimativas que, de acordo com Rãdoane et al. (2003), são modelagens equacionais baseadas em reconstituições paleomorfológicas e formulações de tendências evolutivas no contexto superficial. Por exemplo, Howard e Kerby (1983) relacionam o modelo evolutivo do curso fluvial em função da potência do escoamento fluvial (stream power) estar condicionando à erosão em leitos rochosos.

Para a geomorfologia fluvial o uso de modelagem estatística para se investigar as condições pretéritas e modelar cenários futuros é uma abordagem tratada desde Gilbert (1877) e Davis (1899). Para esses autores o estágio de perfil em equilíbrio, também denominado graded profile, corresponde ao estágio evolutivo de maturidade do curso fluvial. Este estágio de senilidade seria atingido progressivamente no sentido jusante para montante a partir da contínua estabilização entre erosão, sedimentação e condições da superfície. Neste estágio, segundo Davis (1899), as áreas de cabeceiras de drenagem e, por conseguinte, o perfil longitudinal assumem declividades menos acentuadas além da atenuação progressiva da velocidade do escoamento hídrico.

Ainda para Davis (1899), a condição de equilíbrio do curso fluvial pode estar associada ao próprio estágio de evolução geomorfológica da superfície de longo-termo, cujo modelado tende a um estágio de maturidade resultando em morfologias relativamente mais planas e contínuas, isto é, tendência à homogeneidade. Todavia, o estágio ideal de equilíbrio, seja para o sistema fluvial ou para as condições geomorfológicas do modelado do relevo, apresentam distúrbios que refletem em uma heterogeneidade das condições hidrológicas e morfológicas da superfície (GILBERT, 1877; DAVIS, 1899; KING, 1956).

Em relação aos distúrbios em perfis longitudinais, são considerados como anomalias o que foge à regra do modelo ideal da curvatura logarítmica linear negativa. Isto é, anomalias geralmente estão associadas a knickpoints e/ou knickzones responsáveis por gerar rupturas abruptas na declividade do perfil em curtos espaçamentos longitudinais (SINHA e PARKER, 1996; SELANDER, 2004). O termo knickzone refere-se a um conjunto de knickpoints manifestos em considerável proximidade no talvegue de um canal (DOWNS e SIMON, 2001).

Para autores como Carlston (1969) e Hartvich (2005) são principalmente essas rupturas, também tratadas como anomalias, responsáveis por alterar o modelo ideal de perfil em equilíbrio (graded profile). Hartvich (2005) sugere sistematizar generalizadamente cinco principais comportamentos geométricos que os perfis longitudinais assumem independente de seus fatores condicionantes (Figura 2), sendo elas: (A) perfil comum (normal profile); (B) perfil com trecho final íngreme (steep-end-profile); (C) Perfil linear (linear profile); (D) curva acentuada (pointed curve); e (E) Perfil escalonado (staircase profile)

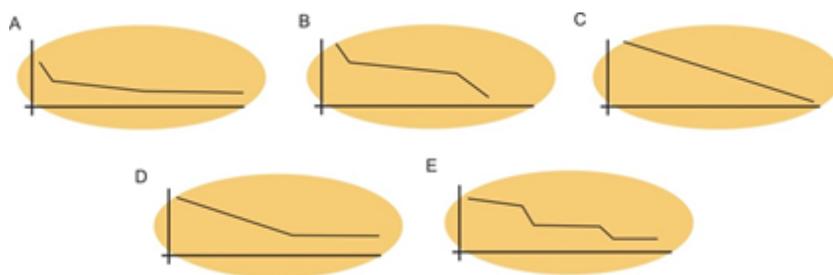


Figura 2: Tipos geométricos básicos de perfis longitudinais

Fonte: Adaptado de Hartvich (2005)

Morfologicamente há similitudes entre os perfis identificados por Carlston (1969) e aqueles sintetizados por Hartvich (2005). Para ambos os autores os perfis que possuem maior recorrência de rupturas acentuadas na declividade são tratados como cursos fluviais em não-equilíbrio (ungraded profile). Ao passo que os mais próximos de condições de equilíbrio, (graded profile) têm sua morfologia semelhante ao modelo ideal para perfis longitudinais.

São diversos os condicionantes que podem influenciar na configuração morfológica dos perfis longitudinais. Bem como convexidades ou rupturas podem ser o resultado de fatores condicionantes distintos ainda que em um mesmo perfil (PHILLIPS e LUTZ, 2008). Tais condicionantes dependem do contexto espacial que um curso d'água esteja inserido, da dinâmica hidrológica, sedimentar fluvial, climática e movimentos crustais tectônicos (e.g., SINHA e PARKER, 1996; SELANDER, 2004; PHILLIPS e LUTZ, 2008; THEULE et al., 2015).

Para Sklar e Dietrich (1998), Charlton (2008) e Phillips e Lutz (2008), a morfologia dos perfis é condicionada geralmente por: (i) aspectos relacionados ao arcabouço geológico como discontinuidades crustais ou resistência diferencial litológica frente aos processos de denudação; (ii) perturbações no nível de base capaz de alterar a dinâmica hidráulica e sedimentar do curso fluvial; (iii) movimentos crustais de subsidência ou soerguimento tectônico; e, (iv) a própria dinâmica sedimentar e hidráulica fluvial que pode estar associado às condições climáticas de fornecimento hídrico ou não ao sistema. Selander (2004) sistematiza três principais causas de perturbações no perfil longitudinal de cursos fluviais associados, sobretudo, aos movimentos crustais e à resistência diferencial litológica (Figura 3).

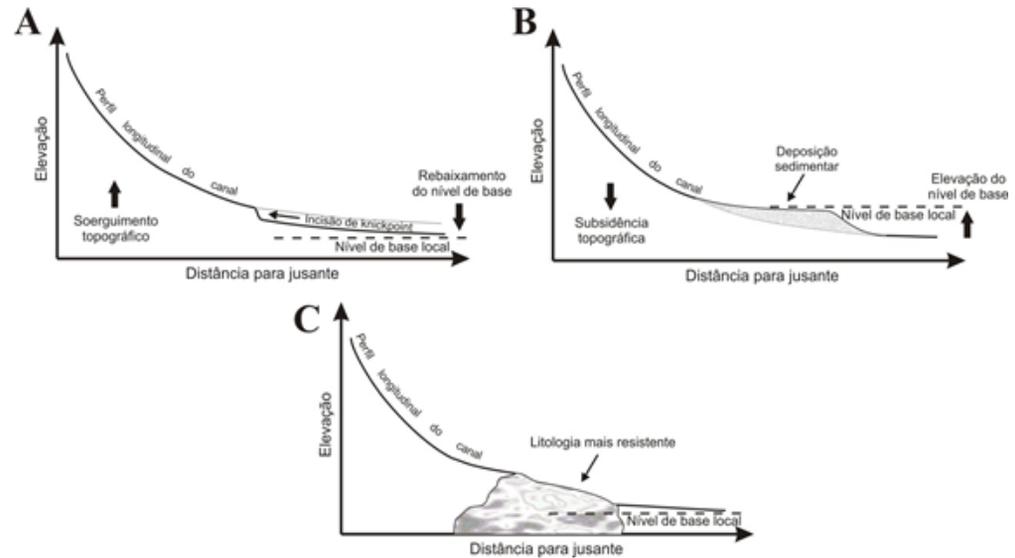


Figura 3: Principais condicionantes que possam alterar a geometria ideal de perfis longitudinais
 Fonte: Adaptado de Selander (2004)

Na primeira situação A, a anomalia no perfil é produto de input energético que favorece o soerguimento tectônico regional e, por consequência, alterando-se o nível de base do respectivo curso d'água afetado. Em B a anomalia é resultado de movimento crustal de subsidência que interfere na dinâmica sedimentar fluvial. Dessa maneira, o acúmulo de materiais por deposição aluvial provoca a anomalia no perfil longitudinal originando um trecho de ruptura de declividade. No terceiro caso (C) o perfil longitudinal tem sua forma associada, sobretudo, pela diferença de resistência erosiva do arcabouço geológico.

Para as interpretações dos motivos da variabilidade morfológica que assumem perfis longitudinais, para além das condições de equilíbrio ideal, é necessário recorrer ao contexto espacial que dado curso d'água esteja inserido, bem como às características hidrológicas fluviais. Isto implica em buscar evidências na organização e dinâmicas inerentes ao próprio sistema fluvial. O sistema fluvial, por sua vez, é um componente dinâmico que compõe a superfície que se adapta ao arcabouço litoestrutural, contribui à esculturação do modelado do relevo, além de ser sensível a qualquer perturbação crustal do contexto que esteja inserido (SCHUMM e LICHTY, 1965, 1973; GREGORY e WALLING, 1979; CHARLTON, 2008).

Modelo de regressão simples não-linear logarítmico

A análise de regressão é um tipo de método de modelagem estatística que visa descrever e prever o comportamento funcional entre uma variável aleatória dependente Y em função de variáveis explicativas, covariáveis ou independentes X (X_1, X_2, \dots, X_n). Caso seja considerada uma variável independente para a realização do método, a regressão é do tipo simples, em caso de duas ou mais variáveis, regressão múltipla (RODRIGUES, 2012; ZEVIANI et al., 2013).

Conforme Zeviani et al. (2013), como tais modelos pretendem identificar padrões de homogeneidade dentre a heterogeneidade observada a partir do conjunto de observações de Y , o procedimento permite (i) tentar explicar o comportamento de Y ; (ii) quantificar quais as influências das variáveis explicativas X sobre Y ; (iii) selecionar as condicionantes relevantes; (iv) estimar o comportamento de Y para estados observados e não observados das covariáveis X ; (v) avaliar a incerteza associada a esse processo.

O comportamento de Y em relação a X pode se apresentar de várias maneiras, isto é, o gráfico de dispersão gerado pode ser linear, quadrático, cúbico, exponencial, logarítmico, etc. O qual a escolha do modelo para explicar o fenômeno depende do comportamento condizente com as condições reais, bem como o modelo deve compreender apenas as variáveis que sejam relevantes para explicar o fenômeno (PETERNELLI, 2004). No caso do perfil longitudinal, as variáveis analisadas correspondem pela variação entre altura e extensão, sendo a curvatura logarítmica o modelo mais adequado para discussões e análises.

As variações no modelo de regressão podem se apresentar direta ou indiretamente proporcionais entre si e são representadas por uma equação da reta. Como em geral as variáveis aleatórias não apresentam valores exatamente lineares, ainda pode ser adicionado o erro aleatório ao modelo para o par de observações. Desse modo, o modelo pode ser representado sob as seguintes equações da reta equivalentes (equações 1,2 e 3):

$$(1) Y_i = f(x) + e_i ; \quad \text{ou} \quad (2) Y_i = \alpha + \beta X + e_i ; \quad \text{ou} \quad (3) Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_i + e_i$$

O qual (i) Y_i representa o valor observado para a variável dependente Y no i -ésimo nível da variável independente X ; (ii) α ou β_0 como constante de regressão sendo correspondente ao ponto onde a reta de regressão intercepta o eixo y ; (iii) βX ou β_1 enquanto coeficiente de regressão, isto é, representa a variação de Y em função da variação de uma unidade da variável X ; (iv) X_i como i -ésimo nível da variável independente X ($i = 1,2,\dots,n$); e (v) e_i como erro aleatório associado à distância entre o valor observado de Y_i e seu ponto correspondente na curva para o mesmo nível i de X . A Figura 4 mostra a representação esquemática da reta gerada a partir da equação da reta.

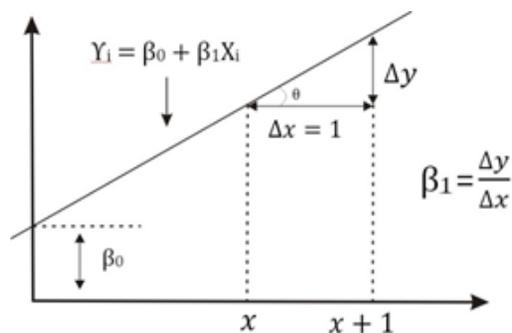


Figura 4: Modelo da regressão linear simples e sua respectiva equação da reta

Fonte: Adaptado de Rodrigues (2012)

Para o caso da regressão não-linear simples do tipo logarítmica, sua equação é dada como a regressão linear simples, todavia, ao invés de utilizar $Y_i = \alpha + \beta X + \epsilon_i$, transforma-se para a função linear $Y_i = \alpha + \beta \cdot \ln X + \epsilon_i$. Isto é, transforma as observações de X_i em logaritmo de X_i . Em ambas as equações da reta, ao gerar o modelo por meio de um gráfico de dispersão e sua linha de tendência, cada ponto representa uma variável aleatória o qual é considerado seu desvio padrão (Figura 5). Esse atributo é dado em razão da maioria das variáveis aleatórias de fenômenos naturais possuírem comportamento semelhante à distribuição normal do modelo aleatório contínuo, isto é, o desvio padrão.

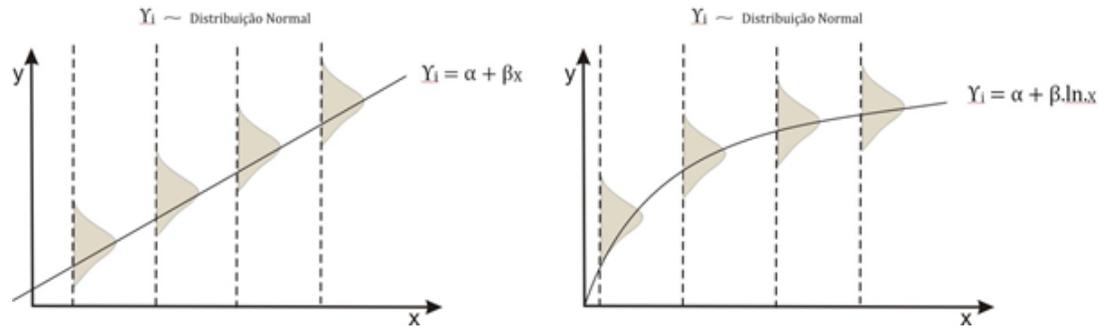


Figura 5: Linhas de tendência linear e logarítmica conforme respectiva equação da reta. Nota-se que cada ponto lançado no diagrama representa a distribuição normal da variável aleatória

Fonte: Adaptado de Zeviani et al. (2013)

Após realizar a regressão entre as variáveis X e Y pode ser utilizado o coeficiente de determinação R^2 para verificar o grau de associação entre ambas as variáveis. Esse coeficiente fornece uma informação auxiliar de validação estatística do resultado do grau de adequação do modelo à realidade por meio da análise de variância da regressão. O coeficiente, por sua vez, é representado pela equação (4), também equivalente a (5):

$$(4) R^2 = \frac{\left[(\beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2) - \frac{\beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2}{n} \right]^2}{(y - \bar{y})^2} \quad \text{ou} \quad (5) \Sigma = \frac{(\hat{y} - \bar{y})^2}{(y - \bar{y})^2}$$

O valor de R^2 varia no intervalo entre 0 e 1 no qual quanto mais próximos de 1, mais o modelo proposto está mais próximo de 100% adequado para descrever o fenômeno. Ou seja, R^2 indica a proporção da variação de Y que é explicada pela regressão, ou quanto da variação na variável dependente Y está explicada pela variável independente X .

Área de estudo

Os afluentes investigados compõem parte do trecho centro-sul do divisor das bacias hidrográficas dos rios das Velhas e Paraopeba, em Minas Gerais (Figura 6). Os rios das Velhas e Paraopeba e sua rede de drenagem formam duas extensas bacias alongadas em sentido norte-sul que drenam uma porção crustal relativamente estável tectonicamente e são importantes tributários que formam o Alto Rio São Francisco. O trecho centro-sul do divisor entre essas bacias compreende cerca de 30 municípios, dentre eles a capital Belo Horizonte e parte de sua região metropolitana, sobretudo, o vetor-norte.

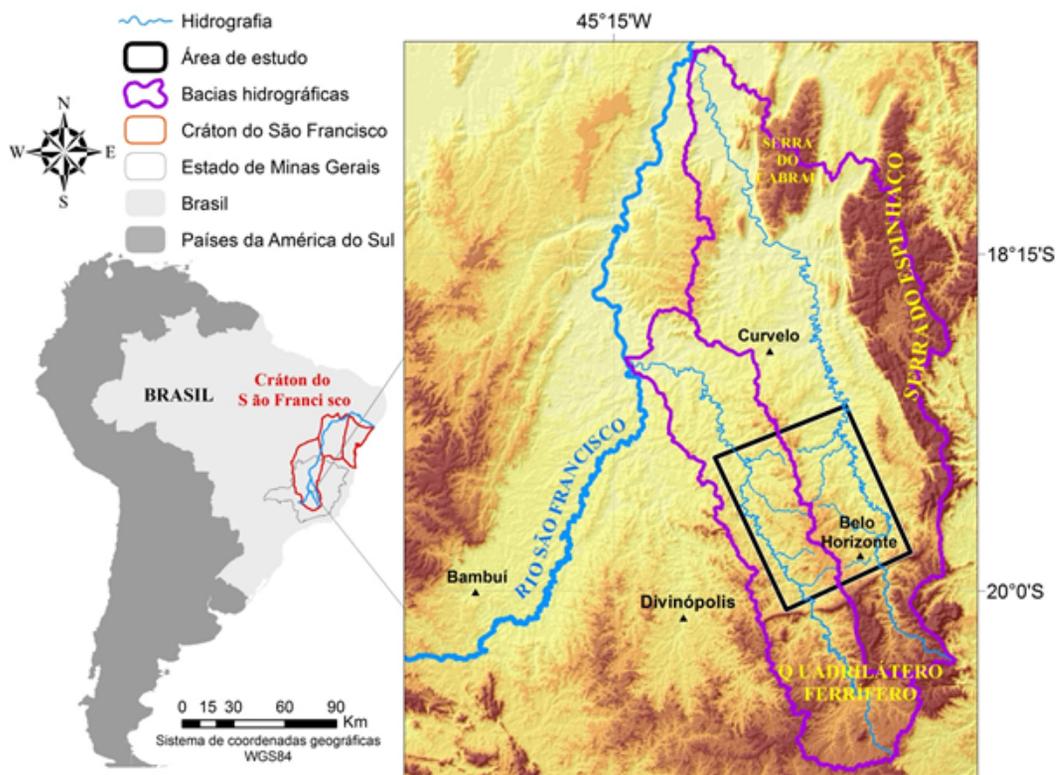


Figura 6: Localização da área de estudo e afluentes investigados

Os cursos fluviais e suas respectivas bacias hidrográficas drenam uma área de aproximadamente 7.000 km² e compreendem pelo menos três unidades geotectônicas distintas, sendo estas também integradas por variadas composições de seu arcabouço geológico. Em relação à mobilidade tectônica pretérita, toda a área está inserida em um fragmento litosférico consolidado até o Mesoproterozóico que se comporta durante o Ciclo Brasileiro no Neoproterozoico como fragmento intraplaca e, posteriormente, como cráton após o evento Sul-Atlântico no Paleozoico (SHOBBENHAUS e CAMPOS, 1984; HASUI, 2012), sendo esta porção crustal denominada Cráton do São Francisco (Figura 6).

A partir desse breve histórico geotectônico, a área de estudo compreende, ao norte, a unidade geotectônica da bacia sedimentar do São Francisco, esta integrada por coberturas sedimentares neoproterozoicas do Supergrupo São Francisco. O Grupo Bambuí pertencente ao Supergrupo São Francisco é integrado, sobretudo, por rochas pelito-carbonáticas depositadas em mar raso sobre uma plataforma continental tectonicamente estável no Neoproterozoico sobre um embasamento cristalino de composição gnáissico-migmatítico (RIBEIRO et al., 2003), o modelado do relevo nessa porção assume a maior regularidade topográfica de sua superfície e corresponde à Depressão Sanfranciscana (COPAM/CETEC, 1982). Ao sul o rio Betim e ribeirão Onça drenam inteiramente o embasamento cristalino, também definido como unidade geotectônica de escudo cristalino exumado, sendo este trecho com forte influência litoestrutural de colisões e deformações que culminaram no antigo orógeno que atualmente forma a borda setentrional do maciço antigo do Quadrilátero Ferrífero (HASUI, 2012). O relevo nesse trecho também reflete pela maior dissecação

de sua superfície e está inserida no contexto da Depressão de Belo Horizonte. Enquanto a porção central da área de estudo representa a transição entre o escudo cristalino e o início da área recoberta por sedimentos da bacia sedimentar (CODEMIG, 2014). Nesse trecho o relevo, em comparação com a porção norte e sul, possui suas formas relativamente regulares que variam ora mais dissecadas, ora mais planas (COPAM/CETEC, 1982).

A cobertura pedológica, por sua vez, apresenta cinco classes de solo identificadas na área (FEAM, 2010) classificadas conforme o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2006). Sendo essas classes Argissolo Vermelho-Amarelo ocorrendo nas imediações do município de Belo Horizonte, Cambissolo Háplico, Latossolo Vermelho e Latossolo Vermelho-Amarelo manifestando-se de maneira intercalada no centro-norte da área, além de Neossolos Litólicos coincidentes com o Planalto do São Francisco, este inserido ao norte e modelado sobre a bacia sedimentar do São Francisco.

Materiais e métodos

Para a elaboração dos perfis longitudinais a partir dos afluentes investigados foi utilizado o software ArcGIS 10.1 (ESRI, 2012) e os programas Excel 2010 e CorelDRAW X3. Os perfis foram confeccionados conforme base hidrográfica do IBGE (2010) sobre o Modelo Digital de Elevação (MDE) SRTM refinado no Projeto TOPODATA (INPE, 2008).

Por meio da ferramenta 3D Analyst do ArcGIS 10.1 (ESRI, 2012) foi utilizada a linha de interpolação (interpolate line) para elaborar o traçado do canal sobre o MDE. A partir dessa linha foi gerado o gráfico do perfil longitudinal pelo profile graph. Os valores para os eixos x (distância longitudinal) e y (altimetria) foram exportados para o Microsoft Office Excel 2010. Nesse programa os dados foram convertidos em gráfico cartesiano e tiveram sua escala horizontal normalizada em porcentagem para fins de padronização.

A partir do gráfico confeccionado foi adicionada a linha de tendência logarítmica no Excel e marcada a opção de visualização tanto da equação da curva quanto o coeficiente de determinação R^2 . O programa Excel dispõe dessa opção de inserir linha de tendência a qual pode ser ajustada de maneira automática nos gráficos de barra, colunas, linhas ou de dispersão xy, bem como pode ser inserida linhas de tendência linear, exponencial, polinomial, potência e média móvel. Além de verificar como o modelo de regressão não-linear simples pode contribuir à verificação do comportamento geométrico do perfil longitudinal, dada a escala espacial utilizada ser 1:1.000.000, foram utilizadas as variáveis de geologia, geomorfologia e pedologia. Bem como extraídos lineamentos morfoestruturais da superfície e aplicado o Índice de Concentração de Rugosidade (ICR).

O ICR é uma técnica de análise tridimensional por meio de classificações morfométricas. Conforme metodologia de Sampaio e Augustin (2014), é uma ferramenta que quantifica e compartimenta o relevo a partir da distribuição espacial da declividade das vertentes e é calculado pelo estimador de densidade de Kernel. Para o ICR também foi atribuída uma varredura espacial circular de 7.000 km² e valores entre 1 e 5 para o intervalo de classes de densidade.

Os lineamentos, por sua vez, foram gerados conforme metodologia de Filho e Fonseca (2009) a partir do modelo digital de elevação ASTER de resolução 30x30m. O sombreamento do relevo foi extraído em Azimutes 45, 315 e 359 com elevação do ângulo solar em 35° para identificação dos lineamentos na superfície. Extraídos os lineamentos utiliza-se o estimador de densidade de Kernel. Este é um tipo de interpolador estatístico que calcula a frequência de repetição de pontos ou linhas

por unidade de área, que neste trabalho aplica uma varredura circular de 7.000 km² e definidas 5 classes de densidade (Muito Baixo, Baixo, Médio, Alto e Muito Alto).

A morfologia dos perfis longitudinais e seus principais pontos de rupturas, por fim, foram plotados em gráfico e tratados no programa CorelDRAW X3. São correlacionadas as bases de arcabouço geológico (CODEMIG, 2014), cobertura pedológica (FEAM, 2010), unidades de relevo (COPAM/CETEC, 1982) e os resultados da extração de lineamentos e ICR.

Resultados e discussões

Em um total de oito perfis longitudinais elaborados a partir de afluentes dos rios das Velhas e Paraopeba, a tabela 1 sinaliza ajustes do modelo estatístico de até 98% em relação às condições reais, o que indica que o modelo de regressão não-linear logarítmico representa um modelo passível para comparar as condições reais condições geométricas dos perfis longitudinais em relação ao modelo ideal de perfil em equilíbrio preconizado na literatura.

Tabela 1: Modelagem estatística dos perfis longitudinais a partir do método de regressão não-linear simples logarítmico

<i>Principal curso d'água</i>	<i>Afluente</i>	<i>Equação da reta</i>	<i>Coefficiente de determinação (R²)</i>
Rio das Velhas	Ribeirão Onça	$y = -58,99\ln(x) + 1154,2$	0,8053
	Ribeirão da Mata	$y = -70,13\ln(x) + 1231,7$	0,9160
	Ribeirão Jequitibá	$y = -66,16\ln(x) + 1128,4$	0,9654
	Ribeirão das Tabocas	$y = -71,29\ln(x) + 1149,4$	0,9747
Rio Paraopeba	Rio Betim	$y = -47,41\ln(x) + 1102,7$	0,6279
	Ribeirão das Abóboras	$y = -68,19\ln(x) + 1201,9$	0,8917
	Ribeirão dos Macacos	$y = -78,65\ln(x) + 1284,6$	0,9138
	Ribeirão do Cedro	$y = -64,93\ln(x) + 1142$	0,9857

Ao comparar o perfil de menor R², isto é, o rio Betim (0,6279) e o mais ajustado, o ribeirão do Cedro (0,9857), ambos afluentes do rio Paraopeba, nota-se que o segundo possui a geometria de seu perfil longitudinal mais próximo ao modelo linear logarítmico ideal, enquanto o rio Betim possui maior irregularidade no traçado geométrico de seu perfil (Figura 7).

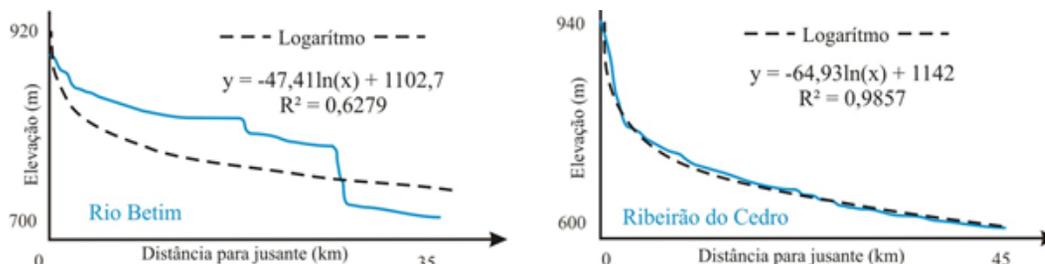


Figura 7: Perfis longitudinais de afluentes do rio Paraopeba, ambos revelam os modelos de menor e maior ajuste

Para além de verificar os ajustes entre o modelo e as condições reais, a discussão sobre perfil em estado de equilíbrio ou não-equilíbrio faz necessária a investigação de fatores associados ao meio em que o curso d'água esteja inserido. Cursos fluviais possuem sensibilidade quanto às condições espaciais que drenam (GREGORY e WALLING, 1979), desse modo, o perfil pode revelar aspectos relacionados ao arcabouço geológico, sobretudo, quando observado em escalas de maior abrangência espacial e menor detalhamento cartográfico.

A Figura 8 representa os perfis que possuem as maiores irregularidades no traçado de seu perfil. Ambos os cursos d'água, isto é, rio Betim e o ribeirão Onça, são os afluentes que situados mais próximos da borda setentrional do maciço antigo do Quadrilátero Ferrífero. Nesse contexto, fatores associados ao arcabouço litoestrutural sugerem condicionar a irregularidade do perfil e seus knickpoints em razão de uma maior complexidade de estruturas e deformações influenciadas pela colisão herdada do ciclo Brasileiro no pré-cambriano (HASUI, 2012).

Os knickpoints nesses perfis são responsáveis por originar quedas d'água de aproximadamente 10m, bem como outros trechos foram utilizados para construção de barragens de abastecimento de água, sendo elas Várzea das Flores no município de Betim e a princípio a Lagoa da Pampulha em Belo Horizonte (Figura 8).

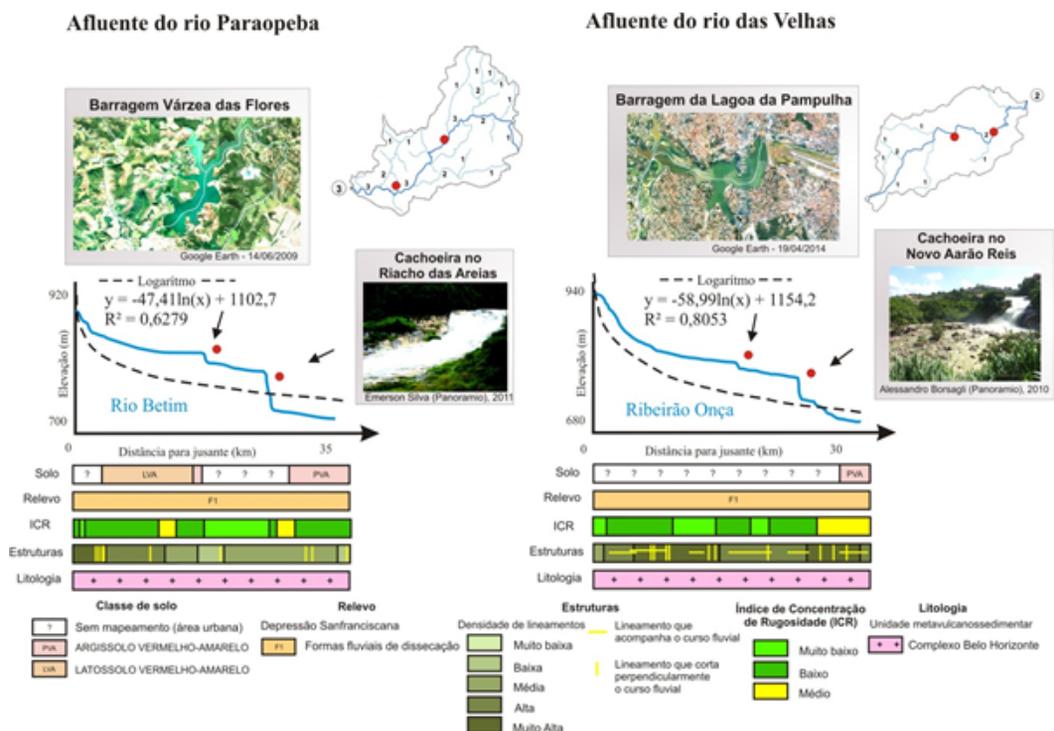


Figura 8: Perfis longitudinais que correspondem ao menos ajuste ao modelo ideal. Ambos situam-se mais próximos do contato com a borda setentrional do Quadrilátero Ferrífero

Em contraponto aos perfis anteriores, aqueles que apresentam maior ajuste em relação ao modelo ideal de equilíbrio estão situados em contexto geológico modelado sobre rochas sedimentares do Grupo Bambuí. Litologias carbonáticas possuem maior resposta frente a influências hídricas, o que pode contribuir para maior homogeneidade ao perfil longitudinal ao drenar tal contexto geológico. Rupturas podem ocorrer em trechos que representem contatos entre

diferentes litotipos dada diferentes composições de sedimentos à época da deposição da bacia sedimentar (HOFFMAN, 2014). Para o caso dos ribeirões do Cedro e das Tabocas, R^2 representa ajustes de 98 e 97%, respectivamente. Isso significa que os perfis longitudinais se ajustam quase perfeitamente ao modelo de regressão logarítmico, o que não quer dizer que estejam necessariamente em condições de equilíbrio hídrico.

Em relação à cobertura pedológica, é possível identificar que há variabilidade na distribuição dos tipos de solo ao longo do perfil longitudinal. À montante nos dois perfis, a existência da classe de Neossolo Litólico na cabeceira do ribeirão das Tabocas e Cambissolo no ribeirão do Cedro podem sugerir diferentes intensidades de dissecação, isto é, pode haver uma dissecação mais intensa na cabeceira do ribeirão das Tabocas responsável por exumar rochas. Condição esta diferente do que se observa no ribeirão do Cedro (Figura 9).

Ainda na perspectiva pedológica, há maior variabilidade de classes de solo identificadas na extensão do perfil do ribeirão das Tabocas, ao passo que tal variabilidade é consideravelmente reduzida na extensão onde drena o ribeirão do Cedro. Esses aspectos sugerem que, apesar dos afluentes possuírem a geometria mais próxima de perfis em equilíbrio, não necessariamente esses afluentes estejam em condições de equilíbrio (Figura 9).

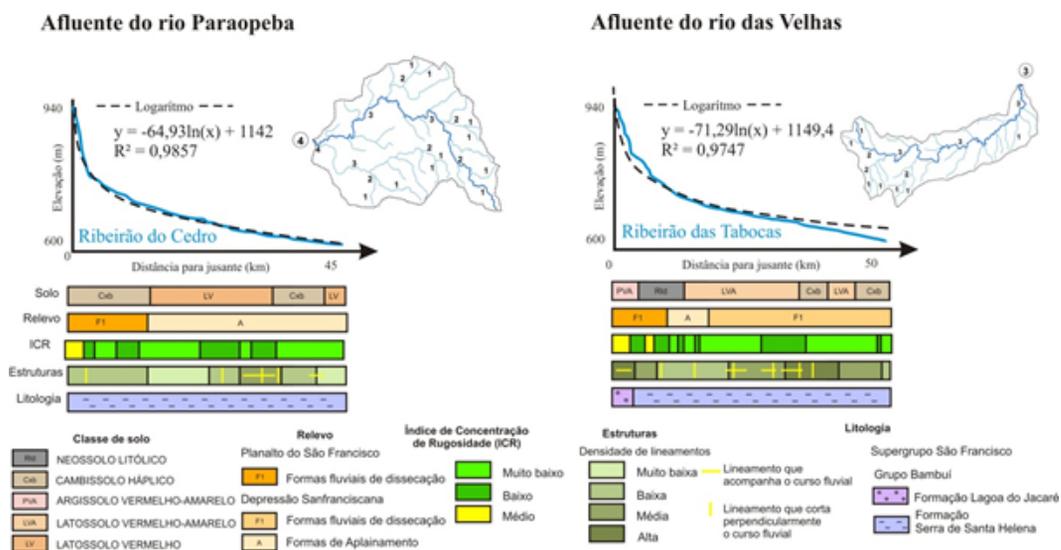


Figura 9: Perfis longitudinais cuja geometria se aproxima das condições de modelo ideal. Suas variáveis condicionantes, por sua vez, apresentam diferentes comportamentos

Os demais perfis longitudinais de afluentes que se encontram na zona de transição entre o escudo exumado do Complexo Belo Horizonte e as coberturas sedimentares do Grupo Bambuí, a geometria dos perfis apresentam ajustes que variam entre 89 a 96% (Figura 10 e Figura 11). Ou seja, possuem a configuração próxima do perfil linear logarítmico ideal, todavia, com variações que dependem de especificidades das condições espaciais de cada curso fluvial.

O ribeirão dos Macacos e o ribeirão Jequitibá apresentam seu traçado ajustado em cerca de 91% e 96%, respectivamente, sendo o trecho mais próximo da cabeceira de drenagem apresentando concavidade no perfil. No caso do ribeirão dos Macacos essa concavidade ainda está associada a um knickpoint responsável por gerar uma queda d'água. Essa morfologia é coincidente com o trecho

drenado diretamente sobre o embasamento cristalino, bem como o ICR e a densidade de lineamentos são mais adensados corroborando por mais discontinuidades crustais (Figura 10).

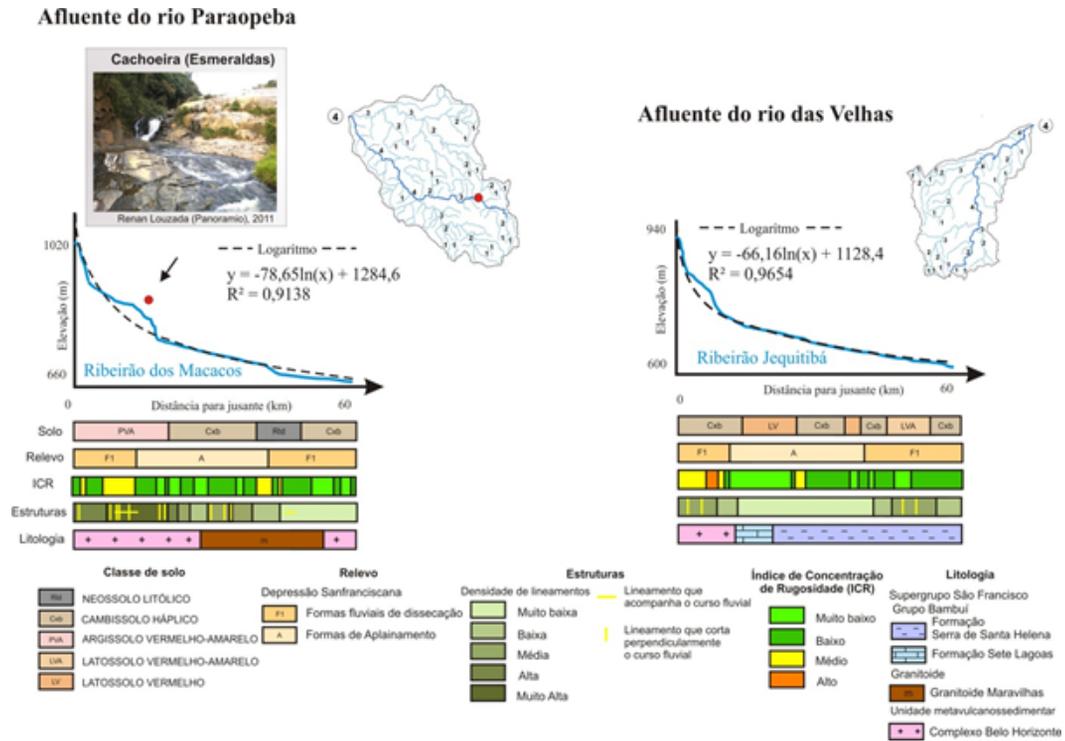


Figura 10: Perfis longitudinais de afluentes dos rios das Velhas e Paraopeba no contato entre embasamento cristalino exumado e recoberto por sedimentos do Grupo Bambuí.

O ribeirão das Abóboras, por sua vez, também apresenta maior concavidade nesse trecho próximo da zona de cabeceira de drenagem (Figura 11). Esse ribeirão é afluente do rio Paraopeba e ao longo de toda sua extensão é possível perceber irregularidades no traçado do perfil, isto é, alguns trechos apresentam oscilação morfológica em relação ao modelo de regressão logarítmica. Tal condição é refletida por R^2 que indica o valor de 0,8917, ou aproximadamente 89% de ajuste ao modelo utilizado. Essa irregularidade pode ter como causa discontinuidades associada ao arcabouço geológico (Figura 11). O ribeirão da Mata, este afluente do rio das Velhas, tem seu traçado mais regular e rupturas mais definidas. O degrau encontrado em seu médio trecho no município de Pedro Leopoldo sugere estar relacionado ao contato entre diferentes tipos litológicos. O modelo de regressão também é mais ajustado em relação ao ribeirão das Tabocas, isto é, apresenta R^2 de 0,9160 (Figura 10).

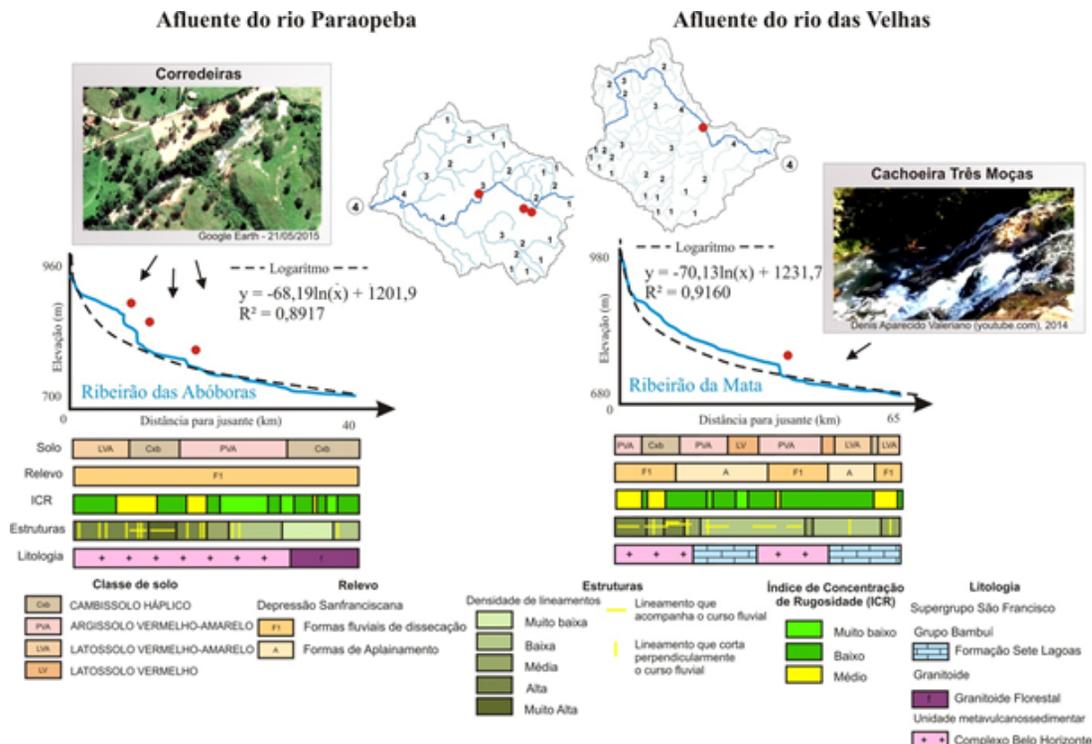


Figura 11: Perfis longitudinais de afluentes dos rios das Velhas e Paraopeba no contato entre o embasamento cristalino exumado e recoberto por sedimentos do Grupo Bambuí

Em síntese, os afluentes do rio Paraopeba possuem maior heterogeneidade na geometria de seus perfis, bem como revelam maior quantidade de trechos de corredeira e/ou cachoeira. A maior parte de seus afluentes também drena o arcabouço geológico integrado por rochas do complexo cristalino exumado. Os afluentes do rio das Velhas, por sua vez, possuem maior regularidade na geometria de seus perfis ainda esteja drenando o escudo cristalino. Os knickpoints também ocorrem de maneira mais pontual e regular, como é o caso do ribeirão da Mata em seu meio trecho, bem como a concavidade das cabeceiras expressa por maior suavidade morfológica em relação aos afluentes do rio Paraopeba. Alguns afluentes apresentam maior equivalência ao modelo ideal de equilíbrio, porém, alguns aspectos associados às condições espaciais, tal como arcabouço geológico e cobertura pedológica, sugerem que o curso fluvial não esteja necessariamente em condições de equilíbrio hídrico.

Este trabalho revela ainda ser possível utilizar o método de regressão simples do tipo logarítmico para verificar o comportamento morfológico dos perfis longitudinais. Esse método pode ser facilmente realizado por meio do programa Excel cuja inserção da linha de tendência logarítmica, o R^2 e a equação da reta podem ser visualizados de maneira automática. O trabalho também sinaliza que apesar da recorrência de investigações em literatura que se preocupam com a morfologia dos perfis, apenas sua verificação não é suficiente para revelar condições relacionadas à maneira como o curso d'água esteja dissecando a superfície. Para isso são necessárias mais variáveis para além, inclusive, das que foram utilizadas neste trabalho. Variáveis estas de maior detalhamento ou associadas à vazão, transporte e deposição inerentes à dinâmica hídrica interna ao curso fluvial.

Considerações finais

O modelo de regressão não-linear do tipo logarítmico se revela um instrumento adequado para se verificar o quanto um perfil longitudinal está próximo do traçado de perfil ideal de equilíbrio preconizado na literatura. Sua aplicação nos oito afluentes investigados indicam coeficientes de ajuste de até 98% no perfil mais regular, 62% no mais irregular bem como valores que variam entre 89% e 96% nos demais. Esse método pode ser facilmente realizado por meio do programa Excel cuja inserção da linha de tendência logarítmica, o R^2 e a equação da reta podem ser visualizados de maneira automática. O trabalho também sinaliza que apenas a verificação quantitativa do modelo geométrico não é suficiente para indicar se um curso d'água está em condições de perfil em equilíbrio (graded profile), isto é, o balanço entre erosão e deposição. Para isso é necessário contemplar variáveis das condições do ambiente onde dado curso fluvial esteja inserido. Neste trabalho, na escala de análise ao milionésimo, aspectos do arcabouço geológico como descontinuidades crustais e diferenças litológicas foram os principais fatores responsáveis por alterar o comportamento morfológico dos perfis. A variabilidade da cobertura pedológica também pode se revelar como indicador que haja diferentes condições hidrológicas em vista que esta se distribui de maneira diferente ainda que a geometria dos perfis assumam valores semelhantes. Por fim, acredita-se que esse trabalho traz uma importante contribuição ao mostrar a aplicação de um método quantitativo de modelagem na investigação das condições hidrológicas de perfis longitudinais em geomorfologia fluvial.

Referências Bibliográficas

- BARROS, L.F.P.; MAGALHÃES JÚNIOR, A.P.; RAPOSO, A.A. Fatores condicionantes da produção e escoamento de sedimentos na bacia do rio Maracujá – Quadrilátero Ferrífero/MG. *Revista Geografias*, v.6, n.2, p.102-117, 2010.
- CARLSTON, C.W. Longitudinal slope characteristics of rivers of the Midcontinent and the Atlantic East Gulf Slopes. *International Association of Scientific Hydrology. Bulletin*, v.14, n.4. p.21-31. 1969; DOI: 10.1080/02626666909493751.
- CHARLTON, R.O. *Fundamentals of Fluvial Geomorphology*. Nova York, ed. Routledge, 275p. 2008.
- CHRISTOFOLLETTI, A. *Geomorfologia*. Edgard Blücher: São Paulo, 1980.
- COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO DE MINAS GERAIS – CODEMIG; COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS - CPRM. *Mapa geológico do estado de Minas Gerais*, 2014, Escala 1:1.000.000. DAVIS, W.M. The geographical cycle. *The Geographical Journal*. v.14, n. 5, p. 481-504, 1899.
- COPAM/CETEC. Secretaria de Ciência e Tecnologia. *Diagnóstico Ambiental de Minas Gerais*. Belo Horizonte, Mapa geomorfológico, escala 1.1.000.000, 1982.
- DOWNS, P. W.; SIMON, A. Fluvial geomorphological analysis of the recruitment of large woody debris in the Yalobusha River network, Central Mississippi, USA. *Geomorphology*, v. 37, p. 65-91, 2001.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. *Sistema Brasileiro de Classificação de solos*. 3 ed. ver. Ampl. Brasília, DF: Embrapa, 353p. 2013.
- FILHO, C.O.A. FONSECA, L.M.G. *Lineamentos estruturais a partir de imagem Landsat TM e dados SRTM*. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14. . 2009, Natal. *Anais... Natal: INPE*, 2009, p.3151-3158.
- FUNDAÇÃO ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE - FEAM, UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA - UFV. *Mapa de solos de Minas Gerais*, 2010, Escala 1:610.000.
- GILBERT, G.K. Report pf the geology of the Henry Mountains. *Geographical and Geological Survey of the Rocky Mountain Region*, Government Printing Office, Washington DC, 1877.
- GREGORY, K.J.; WALLING, D.E. *Drainage Basin Form and Process: a geomorphological approach*. Bedford Square, London: Edward Arnold, 1979. 458 p
- HARTVICH, F. Analysis of the longitudinal profiles of selected rivers in the Šumava Mts., Southwest Bohemia. *Miscellanea Geographica* 11/2005, p.13-30, 2005.
- HASUI, Y. Quadro geral da evolução pré-ordoviciana: a conexão Brasil-África. In: HASUI, Y.; CARNEIRO, C.D.R.; ALMEIDA, F.F.M.; BARTORELLI, A. *Geologia do Brasil*. São Paulo: Editora Beca, 2012. Cap. 8, p.123-130.
- HOFFMAN, M. GIS-based Analysis of Geo-Potentials for a Tropical Metropolitan Area: the Northern Periphery of Belo Horizonte (Minas Gerais, Brazil). Tese de doutorado, TU Darmstadt, 333p, 2014. Disponível em: <<http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/4152> URN: urn:nbn:de:tuda-tuprints-41522>. Acesso em: 10 out. 2016.
- HOWARD A.D.; KIRBY G. Channel changes in badlands. *Geological Society of American Bulletin*, v.94, p.739-752, 1983.
- KING, L.C. Geomorfologia do Brasil Oriental. *Revista Brasileira de Geografia*, v.18, n.2, p.147-265, 1956.
- LANGBEIN, W.B.; LEOPOLD, L.B. Quase-Equilibrium states in channel morphology. *American Journal of Science*, v. 262, p. 782-794, 1964.
- PHILLIPS, J.D.; LUTZ, J.D. Profile convexities in bedrock and alluvial streams. *Geomorphology*, v.102, p.554-566, 2008.
- PETERNELLI, L.A. INF 162, curso de estatística, capítulo 9: Regressão linear e correlação. Disponível em: <<http://www.dpi.ufv.br/~peternelli/inf162.www.16032004/index.html>>. Acesso em: 20 out. 2016.
- RÂDOANE, M.; RÂDOANE, N. DUMITRIU, D. Geomorphological evolution of longitudinal river profiles in the Carpathians. *Geomorphology*, n.50, p. 293-306. 2003.
- RIBEIRO, J.H.; TULLER, M.P.; FILHO, A. D.; PADILHA, A. V.; CÓRDOBA, C. V. Projeto VIDA: mapeamento geológico, região de Sete Lagoas, Pedro Leopoldo, Matozinhos, Lagoa Santa, Vespasiano, Capim Branco, Prudente de Moraes, Confins e Funilândia, Minas Gerais - relatório final, escala 1:50.000. 2a ed.; Belo Horizonte: CPRM, 54p., Mapas e anexos (Série Programa Informações Básicas para Gestão Territorial – GATE, versão digital e convenção), 2003.

Referências Bibliográficas

- RODRIGUES, S. C. A. Modelo de regressão linear e suas aplicações. Relatório de estágio para obtenção do Grau de Mestre em Ensino de Matemática no 3º Ciclo do Ensino Básico e no Ensino Secundário. Universidade da Beira Interior, Covilhã, 70p., 2012.
- SAMPAIO, T.V.M.; AUGUSTIN, C.H.R.R. Índice de Concentração da Rugosidade: uma nova proposta metodológica para o mapeamento e quantificação da dissecação do relevo como subsídio a cartografia geomorfológica. Revista Brasileira de Geomorfologia, v.15, n.1, p. 47-60, 2014.
- SCHUMM, S. The relation of drainage basin relief to sediment loss. International Association of Scientific Hydrology. v.36, p.216-219.
- SCHUMM, S.A.; LICHTY, R.W. Time, space and Casuality in Geomorphology. American Journal of Science 263: p.110-119, 1965.
- SELANDER, J. ,Influences On River Morphology In A Sediment-Dominated System. Chapter Four, p.1-13, Mobogenie.Com/Download-Software, 2004.
- SINHA, S.K.; PARKER, G. Causes of concavity in longitudinal profiles of rivers. Water resources Research. v.32, n.5. p. 1417-1428, 1996.
- SKLAR, L.; DIETRICH, W.E. 1998. River longitudinal profiles and bedrock incision models: stream power and the influence of sediment supply. See Tinkler & Wohl p, 237–260, 1998.
- SHOBBENHAUS,C. CAMPOS,D.A. A evolução da Plataforma Sul-Americana no Brasil e suas principais concentrações minerais. In: SHOBBENHAUS,C.; CAMPOS, D.A.; DERZE, G.R.; ASMUS,H.E. coords. 1984. Geologia do Brasil. Texto Explicativo do Mapa Geológico do Brasil e da área oceânica adjacente incluindo depósitos minerais. Escala 1:2.500.000, Brasília: DNPM, p.9-53, 1984.
- THEULE, J.J.; LIÉBAULT, F.; LAIGLE, D.; LOYE, A.; JABOYEDOFF, M. Channel scour and fill by debris flows and bedload transport. Geomorphology. v. 243, p. 92-105, 2015.
- ZEVIANI, W. M.; RIBEIRO JÚNIOR, P. J.; BONAT, W. H. Curso Modelos de regressão não linear. Laboratório de Estatística e Geoinformação, Departamento de Estatística, Universidade Federal do Paraná, 101p., 2013.