

## Aspectos metodológicos e operacionais em morfometria fluvial, a partir do Geoprocessamento

### Methodological and operational aspects in fluvial morphometry from Geoprocessing

*Marina Silva Araújo*  
Mestre em Geografia, UFU  
[marinas.araujo@ufu.br](mailto:marinas.araujo@ufu.br)

*Vinicius de Oliveira Maruschi*  
Graduando em Geografia, UFU  
[vinicius.maruschi@ufu.br](mailto:vinicius.maruschi@ufu.br)

#### Resumo

Uma das etapas mais importante na ciência é a propagação do conhecimento. Para alguns filósofos, o conhecimento guardado para o indivíduo perde o seu valor. Sendo assim, este trabalho busca trazer, de maneira objetiva, o *modus operandi* de desenvolvimento de uma pesquisa acerca da temática Geomorfologia Fluvial e Geoprocessamento. Muitos são os trabalhos que realizam estudos de casos sobre a referida pesquisa e esse é um ponto muito positivo, pois uma parte de se fazer uma pesquisa é validar os resultados em outras regiões geográficas, cujos atributos físicos sejam semelhantes ou não. Isso permite, inclusive, determinar se tais metodologias são aplicáveis em condições climáticas tropicais, dentre outras situações. No entanto, grande parte desses estudos de caso se resume à explanação dos resultados obtidos e, dificilmente, focam não só nas metodologias, eles também analisam os procedimentos operacionais necessários para se chegar a tais resultados. Por diversas vezes, as horas gastas em se descobrir modos mais aplicáveis de determinadas metodologias ficam omitidas nos capítulos das dissertações e teses, artigos, dentre outros meios de divulgação. Assim, considerando os avanços das geotecnologias, o artigo em questão surge com o objetivo de demonstrar, de forma aplicada, os benefícios operacionais de tais avanços na ciência Geomorfológica. Ao longo do trabalho, objetivou-se demonstrar, pelo Sistemas de Informação Geográfica (SIG's), como desenvolver Índices Morfométricos pertinentes aos estudos de canais fluviais e quais são os benefícios de se trabalhar essa temática nesses ambientes.

**Palavras-chave:** Morfometria, Índice de Hack, Serra da Canastra.

#### Abstract

One of the most essential steps in science is the spread of knowledge. For some philosophers, the knowledge stored for the individual loses its value. Thus, this work aims to bring the *modus operandi* of development of a research on the theme Fluvial Geomorphology and Geoprocessing objectively. Many papers do research case studies and this is a very positive point, as part of doing research is valid for results from other geographic regions, which are used or not. This even allows determining if these methods are functional in tropical climatic conditions, among other situations. However, most of these case studies summarise the explanation of the results obtained and, hardly, the focus is not on methodologies; they also analyse the procedures administered to obtain these results. Several times, as hours spent finding more ways to use methods omitted in the chapters of dissertations and theses, articles, among other means of dissemination. Thus, considering the advances of geotechnologies, the article in question arises in order to demonstrate, in an applied way, the operational benefits of such advances in Geomorphological science. Throughout the work, objectively demonstrate by Geographic Information Systems (GIS) how to create relevant morphometric indices for river channel studies and what are the benefits of working with these themes in these environments.

**Keywords:** Morphometry, Hack Index, Canastra Range.

## 1. INTRODUÇÃO

As questões de planejamento ambiental e territorial, atualmente, têm se mostrado de grande importância. Diante do uso desmedido e inadequado dos recursos naturais é necessário buscar cada vez mais formas de usufruí-lo de modo sustentável e equilibrado. Para tanto, é necessário que conheçamos a fundo todas as variáveis envolvidas, desde a ação humana, à dinâmica natural e ao produto da interação de ambas.

Neste sentido, à luz do conhecimento geográfico, o trabalho em questão visa aprofundar-se nas interpretações geomorfológicas, a fim de entendê-las na sua magnitude e complexidade, justificando-se na importância dessa para a fixação da vida humana e nas questões de planejamento.

É necessário difundir e aprofundar o conhecimento da Geomorfologia enquanto Ciência de base. Os avanços tecnológicos possibilitaram grandes mudanças na forma em que se estuda e se aprofunda em Geomorfologia. Nesse sentido, os conceitos geomorfológicos aqui aplicados utilizam-se dos Sistemas de Informações Geográficas (SIG) e técnicas de Geoprocessamento, de modo a facilitar as aplicações conceituais.

As aplicações conceituais das técnicas outrora desenvolvidas, muitas vezes de modo manual, hoje dão lugar aos sistemas computacionais. O que antes demandava um tempo muito maior, atualmente pode ser feito de forma mais rápida sem onerar em tempo o desenvolvimento da pesquisa. É necessário, porém, ressaltar que tamanho advento não diminui a importância do conhecimento técnico teórico, pois somente a partir desse conhecimento é possível exercer a interação ideal ao avanço da ciência.

Nesse sentido, o trabalho tem por objetivo apresentar uma série de procedimentos metodológicos operacionais, no que tange à Geomorfologia Fluvial Morfométrica, direcionada à análise de canais fluviais. Esses procedimentos consistem em elaborar os índices morfométricos proposto por Hack (1973), pelas técnicas de Geoprocessamento e SIG, utilizando-se do *software* ArcGis 10.3. Além disso, buscou-se demonstrar, metodologicamente, como efetuar o desenvolvimento de tal índices no ambiente SIG, levantando todas as suas especificidades, de modo a auxiliar a replicação em outros estudos.

## 2. ASPECTOS GERAIS SOBRE O GEOPROCESSAMENTO APLICADO AOS ESTUDOS AMBIENTAIS

Camara e Medeiros (1998) definem o Geoprocessamento como a área do conhecimento que, sob o espectro das técnicas matemáticas e computacionais, executam e traduzem as informações geográficas, sendo, então, a mais recente forma de automatizar a produção de documentos cartográficos. Para os autores, as ferramentas computacionais do Geoprocessamento

nos permitem realizar análises mais completas, considerando a integração dos dados de fontes diversas.

A interdisciplinaridade é uma característica marcante nos estudos ambientais. O meio ambiente, sendo composto por diversas variáveis necessárias ao seu entendimento, nos mostra que o estudo de uma única variável não é o suficiente para compreender o complexo das transformações ambientais. Nesse sentido, o Geoprocessamento surge como uma forma prática de unir as diversas áreas do conhecimento, necessárias para a análise nos Estudos Ambientais, pelas suas formas de representação da realidade.

Assim, o Geoprocessamento se apoia no conceito de SIG, Sistema de Informações Geográficas, uma vez que consiste em um conjunto de banco de dados georreferenciados, que permite ao usuário a manipulação das variáveis de um determinado local a ser estudado. Nesse sentido, define-se como objeto de estudo do Geoprocessamento as Informações Geográficas, as quais, por sua vez, podem ser divididas em informações relacionadas ao espaço geográfico e às informações espaciais.

Entende-se, aqui, a concepção de espaço geográfico a partir da definição de Dolfus (1991, *apud* CAMARA; MEDEIROS 1998), a qual caracteriza o espaço geográfico como localizável na superfície terrestre, logo é passível de variáveis como, coordenadas XY e altitude. Nessa definição, entende-se, também, por espaço geográfico, o local onde ocorrem os fenômenos geográficos particulares daquele determinado ambiente. Essa localização geográfica consiste em um lócus absoluto. Já as informações espaciais consistem nos atributos desse determinado local e cuida das relações entre os objetos e as variáveis que nele interagem.

Diante desse contexto de objeto geográfico e suas informações espaciais, podemos estabelecer os Fenômenos Geográficos que se colocam na superfície pelos padrões de ocupação. Esses fenômenos geográficos se correlacionam espacialmente, temporalmente, topologicamente e, por fim, pela correlação temática. Assim, estima-se, então, entender e representar os fenômenos geográficos cartograficamente. (CÂMARA; MEDEIROS, 1998)

A correlação espacial parte do princípio de proximidade, uma vez que nos fenômenos espaciais, a tendência é que quanto mais próximos ocorrerem, mais interação terão entre si e quanto mais longe ocorrerem um do outro, menor será a interação. Sendo assim, é possível afirmar que a dinâmica de um leito fluvial tende a ser semelhante ao funcionamento dos leitos mais próximos, por estarem espacialmente inseridos na mesma condição ambiental.

A correlação temática diz respeito às características das regiões geográficas, que são moldadas por um conjunto determinado de variáveis, por exemplo, os canais fluviais de uma determinada bacia, que estão inseridos no mesmo contexto geomorfológico e geológicos, possuindo

uma correlação temática entre eles, de forma que esse tema determine um comportamento padrão da rede de drenagem.

A correlação temporal acontece quando os fenômenos espaciais que ocorrem ao longo dos anos exprimem, nos objetos geográficos, determinadas marcas que são comuns a um grupo de objetos, caracterizando, então, um evento. Nesse sentido, pode-se exemplificar utilizando os fenômenos de basculamento de canais que se dão nas paisagens Serra da Canastra, devido às movimentações tectônicas do evento Brasileiro, em que esse conjunto de canais exprimem, em si, uma marca registrada em determinado recorte de tempo (ARAUJO, 2017).

A Correlação Topológica é definida por Câmara e Medeiros (1998), como a correlação que permite estabelecer a dinâmica entre os objetos geográficos, que são invariantes à rotação, translação e escala. Essas correlações nos possibilitam evidenciar como podemos representar nosso objeto de trabalho pela cartografia digital. Por esses estudos, em algum grau, conseguimos contribuir para o conhecimento, o ordenamento e o planejamento do território. Com as geotecnologias, esse processo se torna cada vez mais acessível e intuitivo.

Essas correlações evidenciam o modo como se trabalha as Informações Geográficas dentro do Geoprocessamento, determinando as ferramentas necessárias e o modo analítico adequado para cada análise. No entanto, é preciso que o pesquisador estabeleça uma relação com o Geoprocessamento com maior profundidade. As técnicas de programação computacional tendem a ocultar a lógica do conceito atrás de um determinado comando e isso faz que o pesquisador conheça cada vez menos a teoria envolvida naquele processo. Nesse sentido, a sistematização da rotina desenvolvida neste trabalho para a confecção do Índice de Hack (SL) busca unir a teoria envolvida e a computação necessária.

### **3. ASPECTOS GERAIS SOBRE A MORFOMETRIA FLUVIAL**

O conceito de geomorfologia fluvial consiste na interpretação geomorfológica acerca dos cursos de água e bacias hidrográficas. Considera-se que os canais fluviais sejam um dos grandes indícios para compreender a dinâmica da paisagem, uma vez que a sua arquitetura e geometria podem dar subsídios ao entendimento da evolução geomorfológica, sendo, inclusive, um elemento da paisagem sensível às alterações crustais recentes. O estudo dos cursos fluviais abarca questões no que tange ao conhecimento dos processos fluviais e nas formas resultantes de tal escoamento, bem como a sua atuação como um dos mais importantes meios de transporte de sedimentos a partir da esculturação do relevo. (CUNHA, 2010; CHRISTOFOLETTI, 1980)

A esculturação dos vales resulta do conjunto das ações da gravidade e os cursos d'água, de forma a ajustar-se rapidamente a quaisquer deformações da crosta. Os elementos de drenagem auxiliam o estudo de movimentos neotectônicos e configuram um excelente instrumento para

análises dos parâmetros morfométricos. (CAMOLEZI *et al.*, 2012; ETCHEBEHERE *et al.*, 2006; SCHUMM, 1993)

As Análises Morfométricas ganharam destaque principal ao final do século XIX e tinham como objetivo mesurar as formas de relevo e analisá-las pelos processos sistemáticos. Alguns nomes e tendências se destacam, no entanto, essa vertente metodológica se desenvolveu, principalmente, nos países germânicos, tendo como precursor Henri Baulig. No entanto, do ponto de vista metodológico, essa vertente não trouxe muitos avanços e, posteriormente, veio a ser ultrapassada pelas concepções provenientes do continente americano, pelos pressupostos de Davis. (CHRISTOFOLETTI, 1969)

As Análises Morfométricas foram amplamente utilizadas por grandes nomes da Geomorfologia, como Hack (1973), Horton (1945), Strahler (1952) e Schumm (1993), para analisar os canais fluviais, no que tange às suas formas e dinâmicas, com o auxílio de métodos quantitativos. Sendo assim, por esses métodos, faz-se mister interpretar as questões relacionadas à esculturação do relevo, estruturação e composição geológica, bem como à dinâmica dos ciclos hidrológicos.

A continuidade dessa temática se deu em meados da década de 1945, com trabalhos que estabeleciam leis gerais que categorizavam os canais e as suas bacias, analisando os seus processos pela quantificação. Esses estudos ganharam destaque sob as mãos de Robert E. Horton, no período do pós-guerra. Nas suas análises, Horton pôde utilizar-se de vários índices propostos por ele, para correlacionar os aspectos mórnicos à dinâmica hidrológica. (CHRISTOFOLETTI, 1969)

No que se refere às pesquisas Morfométricas relacionadas às bacias hidrográficas, as maiores contribuições estão nos Estados Unidos, com autores como Strahler (1952), Schumm (1956), Miller (1953), dentre outros estudiosos. No Brasil, o autor destaca como trabalho pioneiro, o artigo de Freitas (1952). Os estudos que envolvem Análises Morfométricas a partir dos canais fluviais são de fato muito completos e relevantes, uma vez que constituem os processos morfogenéticos ativos de esculturação das paisagens. Alguns parâmetros morfométricos podem ser aplicados com o intuito de auxiliar na caracterização, na quantificação e na fundamentação teórica sobre as alterações ou anomalias, bem como no controle estrutural da rede de drenagem. (CHRISTOFOLETTI, 1969; CAMOLEZI *et al.*, 2012)

#### **4. ÁREA DE APLICAÇÃO DO ESTUDO**

A área de estudo em questão corresponde à Bacia Hidrográfica do Rio Santo Antônio, localizada no município de São Roque de Minas, Minas Gerais. A bacia se encontra inserida no contexto de drenagem do Rio São Francisco no seu alto curso. Esse, por sua vez, tem parte da sua abrangência localizada nos limites da área consolidada do Parque Nacional da Serra da Canastra.

O parque abrange algumas das principais nascentes dessa rede de drenagem, fazendo com que elas estejam conservadas e com vegetação próxima à vegetação nativa. No baixo curso da Bacia do Rio Santo Antônio encontramos alguns afluentes que passam pela área urbana do município de São Roque, podendo haver, então, contaminação com dejetos urbanos e agrícolas. A Bacia possui uma vegetação predominante de cerrado e condições climáticas de clima tropical, sendo composta, basicamente, por 15 canais principais responsáveis pela dinâmica hídrica da bacia.

A composição geológica estrutural correspondente ao Brasil Central deve grande parte de sua herança às orogêneses do Ciclo Brasileiro e o seu *layout* corresponde a uma rede de faixas de dobramento, separadas por grandes áreas cratônicas. Essa faixa de dobramentos é representada por grandes bacias sedimentares datadas do meso e neoproterozóico, já os crátons se caracterizam por áreas estáveis que não foram afetadas diretamente pelos processos orogênicos brasileiros. (UHLEIN *et al.*, 2012)

O contexto geológico local é composto, de forma geral, pelas Unidades Geológicas do Grupo Canastra e Supergrupo São Francisco. O Grupo Canastra tem, na sua composição básica, rochas quartzíticas e filitos que por ora aparecem subordinados às rochas carbonáticas e carbonáceas e, muitas vezes, metamorfizados em fácies xisto verde. Na estratigrafia desse grupo, por ser muito dobrada e complexa, a compartimentação do Grupo Bambuí está relacionada diretamente ao Cráton do São Francisco e possui rochas datadas do neoproterozóico. Nessas feições são encontradas rochas do tipo siltito e arenito fino predominantemente como também folhelhos e lentes carbonáticas. (CODEMIG, 2014; ARAÚJO, 2017)

## **5. ÍNDICES MORFOMÉTRICOS E GEOPROCESSAMENTO: DAS METODOLOGIAS E PROCEDIMENTOS OPERACIONAIS**

A sistematização e a organização do banco de dados consistem em uma etapa valiosa para o desenvolvimento das Análises Morfométricas, a partir do Geoprocessamento. A escolha de uma base de dados adequada aos estudos que se pretende fazer, limitará e norteará quais aspectos poderão ser extraídos, de modo condizente com a representação da realidade.

Dessa forma, optou-se pela utilização de dados vetoriais, resultando do processo de vetorização das cartas topográficas IBGE na escala 1:50000. Nessa escala foi possível a visualização do Rio Santo Antônio, objeto de estudo deste trabalho e assim foi possível desenvolver as análises e técnicas pertinentes à temática. É importante que, definida a escala de trabalho com base na visualização do objeto de estudo principal, todas as demais bases de dados precisam estar de acordo com essa escala.

Para que o trabalho seja executado de maneira satisfatória é preciso ter um banco de dados consistente. Estando estabelecido que para o desenvolvimento dessa proposta metodológica, são necessários os seguintes dados:

- a) Rede de Drenagem;
- b) Curvas de Nível;
- c) MDT-HC

O MDT-HC consiste em um Modelo Digital do Terreno Hidrologicamente Consistido. Esse modelo *raster* é gerado a partir da interpolação de drenagem, isolinhas, pontos cotados, dentre outros fatores. Sua função é representar o modelo do terreno de forma a considerar os vales (drenagem) e topos de morro (pontos cotados), que, normalmente, são descartados em outros modelos digitais, como, por exemplo, o modelo digital de elevação SRTM. Sua utilização busca trabalhar com uma representação mais fidedigna do modelado do terreno e dados Z (altitude), sendo esse último o foco do presente estudo.

### 5.1. Criação do Perfil Longitudinal

O perfil longitudinal se trata de um gráfico bidimensional onde será representado o canal fluvial, de acordo com a suas cotas altimétrica versus a sua extensão. Essa representação gráfica pode ser obtida pelo ambiente ArcGIS, utilizando a ferramenta *Profile Graph*. É necessário que haja referência Z (altitudes) no seu *shapefile* do canal. Caso não haja essa referência é possível realizar uma interpolação do *shapefile* com o MDT-HC.

É possível também obter o Perfil Longitudinal em ambiente *Excel*, no qual são utilizadas as cotas altimétricas das curvas de nível, da nascente até o ponto exutório e a sua relação com o comprimento do canal fluvial para cada intervalo altimétrico. Esses dados devem ser plotados em um gráfico de dispersão, bem como devem possuir a linha de tendência que demonstra que, em condições de isolamento, qual seria o comportamento padrão do canal no seu perfil.

### 5.2. Cálculo do Índice *Slope Length* em ambiente SIG e a descoberta dos setores anômalos na drenagem

O Índice SL (*Slope x Length*), proposto por Hack (1973), consiste na relação entre a declividade e a extensão. Dessa forma, seguindo a metodologia utilizada por Hack, o índice *SLtotal* pode ser calculado considerando a extensão total de um rio, sendo  $\Delta h$  a diferença altimétrica entre a cota superior e inferior do canal, ou seja, a diferença entre a cota localizada na

montante do rio e a cota localizada na sua foz; e  $\ln^L$ , o logaritmo natural da extensão total do curso d'água.

$$SL_{total} = \Delta h / \ln^L$$

Considerando um segmento ao longo do curso d'água, o índice  $SL_{trecho}$  pode ser calculado pela relação entre  $\Delta h$  (a diferença altimétrica entre dois pontos extremos de um segmento ao longo do curso d'água),  $\Delta l$  (projeção horizontal da extensão do referido segmento) e  $\Delta h / \Delta l$  o gradiente da drenagem naquele trecho; e  $L$  o comprimento total do curso d'água na montante do ponto para o qual o índice  $SL$  está sendo calculado. (SEEBER; GORNITZ, 1938 *apud* ETCHEBEHERE *et al.*, 2006)

$$SL_{trecho} = \Delta h / \Delta l * L$$

Serão considerados índices anômalos aqueles que quando o  $SL_{trecho}$  dividido pelo  $SL_{total}$  obtiverem valores superiores a 2. Sendo assim, a categorização das anomalias resulta em duas ordens: anomalias de 1ª ordem, referentes aos valores iguais ou superiores a 10 e anomalias de 2º grau, referentes aos índices compreendidos entre os limiares de 2 a 10.

Esses valores demonstram, por exemplo, mudanças litológicas, quebras abruptas de declives como cachoeiras ou também a existência de quebras (*knickpoints*) ao longo do perfil longitudinal de um rio, representando pontos anômalos a ser investigados, inclusive do ponto de vista neotectônico. (SEEBER; GORNITZ, 1938 *apud* ETCHEBEHERE *et al.*, 2006)

O desenvolvimento do índice  $SL$  em ambiente SIG pelas técnicas de geoprocessamento consiste num conjunto de etapas que resultaram nos valores de  $\Delta h$  e  $\Delta l$  e, posteriormente, a razão entre eles será obtida pela montagem da fórmula proposta por Hack (1973) na ferramenta Field Calculator. O indicado é que esse conjunto de etapas seja plotado no ArcGis por um *Model Builder*, transformando as etapas em rotinas no sistema computacional e facilitando o cálculo de índice por *on click*.

### 5.2.1. Cálculo da $SL_{total}$

Escolhidos os canais que serão trabalhados, é preciso observar que a cada confluência do canal, tende-se a existir um nó no vetor, ou seja, uma configuração que segmenta a linha que representa o canal fluvial. Isso pode se apresentar de diversas maneiras, dependendo da base cartográfica que foi escolhida, seja uma base confeccionada pela vetorização manual da drenagem ou uma base disponibilizada já vetorizados por órgãos como Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) ou a Agência Nacional de Águas (ANA).

Em todos os casos é necessário corrigir essa questão, ou seja, para o cálculo do  $SL_{total}$  é preciso analisar o canal fluvial em sua totalidade. Sendo a linha a representação vetorial desse objeto geográfico, ela não pode conter fragmentos. Nesse sentido, a ferramenta Merge cumpre a função de unir os segmentos que podem ocorrer na base de dados.

Analisando a fórmula, se  $\Delta h$  consiste na diferença altimétrica entre as cotas da nascente e da foz, para calculá-lo é necessário saber o valor dessas cotas. Um dos modos de cálculo, para isso, é pelo manuseio da tabela de atributos do shapefile referente ao desenho do canal. Os campos criados devem consistir nas seguintes colunas do tipo “*Short Integer*”:

- a) Max\_Z (cota máxima do vetor que representa o canal, ou seja, sua nascente);
- b) Min\_Z (cota mínima encontrada no vetor, sua foz)

O cálculo dos valores para cada coluna pode ser feito pela opção *Calculate Geometry*. Nas propriedades do cálculo da geometria, a cota altimétrica máxima (Max\_Z) é calculada pela opção Max Z, a cota altimétrica mínima em Min\_Z.

O cálculo de  $\Delta h$ , por sua vez, consiste na diferença altimétrica entre dois pontos extremos de um segmento ao longo do curso d’água. É possível reproduzir tal cálculo em ambiente ArcGIS pela ferramenta *Field Calculator*.

Essa ferramenta consiste em uma calculadora e os campos da tabela de atributos (colunas) representam os denominadores. Exemplificando, se o objetivo é somar o valor da Coluna A = 2 e o valor da Coluna B = 2, então, em uma terceira Coluna C, a ferramenta será aberta e selecionados os campos “Coluna A” + “Coluna B” e o resultado será “Coluna C” = 4. Sendo assim, obteve-se, então, o valor de  $\Delta h$  pela expressão: Max Z – Min Z.

A partir daí foi possível então calcular os atributos Extensão e seu Logaritmo Natural. Para isso, do mesmo modo que anteriormente, se criou na tabela de atributos do *shapefile* do canal duas colunas no formato “*Double*”, sendo elas:

- a) Coluna “Extensão”;
- b) Coluna “Log\_L”.

Para a coluna “Extensão”, calculou-se o comprimento total do canal em metros, ou seja, da nascente à foz, considerando então todas as curvas que possam vir a existir devido à sinuosidade natural dos canais. Esse cálculo foi possível pela ferramenta “*Calculate Geometry*”, função “*Length*”.

Para o cálculo do Logaritmo Natural, utilizou-se a ferramenta Field Calculator com a fórmula: Log (Extensão). Essa fórmula corresponde à fórmula LN do *Excel* e essa função torna possível o estudo de fenômenos que evoluem de maneira exponencial.

Dessa forma, considerando a fórmula geral para o cálculo do  $SL_{total} = \Delta h / \ln^t$  e de posse do valor de todas essas variáveis calculadas em ambiente ArcGIS, é possível então montar a fórmula supracitada pela ferramenta Field Calculator. Criou-se a coluna “ $SL_{total}$ ” em formato “*Double*” ao abrir a ferramenta e plotar a seguinte fórmula, com base nos campos indicados:

$$[\text{Delta\_h}] / [\text{Log\_L}]$$

### 5.2.2. Cálculo do $SL_{trecho}$

Para o desenvolvimento do  $SL_{trecho}$  é preciso entender no que consiste a sua fórmula e quais rotinas em ambiente SIG são necessárias para se executar o cálculo das variáveis. A fórmula para esse cálculo é:  $SL_{trecho} = \Delta h / \Delta l * L$

$\Delta h$  é a diferença altimétrica entre as duas extremidades do trecho.  $\Delta l$  representa a projeção horizontal (distância em linha reta) entre os dois pontos do segmento analisado.  $L$  representa o comprimento total do curso à montante do ponto final do segmento analisado, ou seja, o comprimento estabelecido da nascente do canal até o final do trecho em questão.

Assim, estabeleceu-se, então, que o primeiro passo a seguir é a fragmentação dos trechos por uma cota pré-estabelecida, nesse caso, as curvas de nível. Isso consiste no padrão de segmentação, em que será definida a diferença altimétrica  $\Delta h$ .

Com exceção do ponto da nascente e da foz, esse valor será constante, já que o canal está segmentado pelas curvas de nível que possuem uma diferença altimétrica entre elas pré-definida. Para o caso foram usadas as curvas de nível de 20 em 20 metros compatíveis com as escalas abordadas nos demais produtos.

Na etapa de segmentação do canal se utilizou a ferramenta “*Feature to Line*”, disposta em “*Data Management Tools*” > “*Feature*”. Nessa etapa é importante lembrar que ao iniciar o trabalho, estabeleceu-se códigos identificadores para cada canal na coluna ID. Essa ferramenta acima utilizada resultará em um *shape* com o canal estudado particionado e todas as curvas utilizadas para a segmentação. Esse código identificador auxiliará a entender qual trecho pertence a qual canal fluvial no caso de estar trabalhando com mais de um de uma só vez.

Dessa forma é preciso excluir na tabela de atributos as linhas referentes ao desenho das curvas de nível. A forma para identificá-las e separá-las das linhas referentes aos trechos do canal é observando os atributos, como, por exemplo, o ID, código identificador do canal estudado. Ao contrário dos segmentos, as curvas de nível não possuem esse codificador numerado. Logo, toda linha na tabela de atributos cujo ID seja igual a 0, refere-se às curvas de nível e podem ser excluídas.

Dando seguimento, após a exclusão das linhas referentes às curvas de nível, aplica-se, novamente, uma interpolação com os dados MDT-HC, pela ferramenta “*Interpolate Shape*”. Na etapa seguinte, optou-se por padronizar a tabela de atributos desse *shape*, deixando apenas os seguintes campos:

- a) Coluna *Shape\**: destinada à identificação de dados Z (gerada automaticamente após interpolação);
- b) Coluna ID do canal estudado;
- c) Coluna *SLtotal* anteriormente calculado;
- d) Coluna *Shape Legth* (gerado automaticamente não permite exclusão);
- e) Coluna ID\_SEG: criada manualmente para identificar qual trecho pertence a qual canal, caso esteja trabalhando com mais de um canal.

Nessa última coluna se optou para que todo canal cujo ID seja 1, o ID\_SEG seja 0101 para o primeiro segmento, representando a nascente, 0102 para o segundo e assim por diante. É preciso ressaltar que esse será o *shapefile* referente ao *SLtrecho*, de modo que todos os derivados a partir desse ponto são *shapes* temporários para a obtenção de valores que em segundo momento se retornaram para esse *shape*.

Após a formatação e a definição dos seguimentos foi desenvolvido um cálculo das variáveis pertinentes à aplicação da fórmula. Desse modo, começando pelo  $\Delta h$ , o qual consiste na diferença altimétrica entre as cotas de começo e fim do segmento, seu cálculo pode ser feito da forma como se calculou o  $\Delta h$  para o *SLtotal*, sendo também preciso calcular a extensão dos segmentos.

A próxima variável é o  $\Delta l$ , definido como a projeção horizontal, ou seja, a distância em linha reta entre os dois pontos do segmento.

Para que não seja necessário desenhar linha a linha, optou-se pela seguinte técnica. Desenhou-se pela ferramenta “*Feature Vertices to Point*” um *shapefile* de pontos representando o ponto inicial e o final de cada segmento. Com base no vértice, é importante que no campo “*Point Type*” se selecione “*BOTH\_ENDS*”.

Posteriormente, nesse *shapefile* gerado com pontos representando os vértices, aplica-se a ferramenta “*Points to Line*”, de modo a desenhar uma linha reta entre esses vértices e, por consequência, desenhar o  $\Delta l$  e calcular a extensão de cada uma dessas linhas.

É importante no campo “*Line Field*” selecionar a coluna “*ORIG\_FID*”, gerada automaticamente, e no campo “*Start Field*” selecionar o que contém a numeração do segmento dado pelo pesquisador anteriormente. A tabela gerada com o cálculo de  $\Delta l$  deve ser exportada em modelo *Excel* para a retirada dos dados e, posteriormente, transferência para o *shape* final de *SLtrecho*.

Exportando a tabela de atributos para *Excel* (“*Table to excel*”), é possível, nesse ambiente, ordenar a linha de acordo com a coluna “*ORIG\_FID*”, que, propositadamente, tem o mesmo ordenamento da coluna “*ID\_SEG*” (código identificador do segmento). Sendo assim, é possível copiar o valor de *Delta\_1* do ambiente *Excel* para o shape *SLtrecho*.

O cálculo de *L* também é feito em ambiente *Excel*, utilizando os dados da coluna “*Shape\_Length*”, criando-se a coluna *L*, copia-se o primeiro valor da extensão do primeiro segmento (nascente até a primeira curva de nível) e, posteriormente, soma-se o valor da subsequente em “*Shape\_Length*” com o último valor disposto da coluna *L*. Em outras palavras, deve-se somar o comprimento da nascente até o final do segmento analisado e assim por diante.

Estando de posse de todos os dados necessários, é possível então calcular o *SLtrecho*. Esse consiste na seguinte fórmula:  $\Delta h / \Delta l * L$ , sendo  $\Delta h$  a diferença altimétrica entres os vértices,  $\Delta l$  a projeção horizontal entre os vértices do seguimento e *L* o comprimento. Executa-se a fórmula pela ferramenta “*Field Calculator*” pela seguinte expressão:  $([\text{Delta\_h}] / [\text{Delta\_l}]) * [L]$

### 5.2.3. Cálculo dos Setores Anômalos

Estando o valor do *SLtotal* mantido na tabela, cria-se uma última coluna em formato “*Double*”, com a seguinte expressão:  $[SLtrecho] / [SLtotal]$ , sendo possível obter o Gradiente Index, ou seja, os valores anômalos para analisar os setores do canal onde ocorrem o desequilíbrio dele.

## 6. RELAÇÃO ENTRE OS SETORES ANÔMALOS E A ANÁLISES GEOMORFOLÓGICAS

Proposto por Hack (1973), o índice *SL* expressa a relação entre a declividade e a extensão do canal, dando indícios sobre o potencial energético de um dado canal e funcionando também como um indicativo de perda e retomada de equilíbrio, segundo as leis propostas pelo conceito de Equilíbrio Dinâmico. Para essa análise, usou-se a relação do *SL* aplicado a todo canal dividido pelo valor do trecho, como proposto por Seeber e Gornitz (1983), a fim de estabelecer os valores anômalos de *SL* e as suas causas.

Quando correlacionados os valores calculados de *SL* para os trechos e também para a extensão de todo o canal, de modo a obter os setores anômalos podemos, de forma geral, encontrar setores em equilíbrio relacionados às cabeceiras e foz do Rio Santo Antônio, bem como anomalias de primeira e segunda ordem relacionadas às questões litológicas e estruturais existentes ao longo dos canais fluviais.

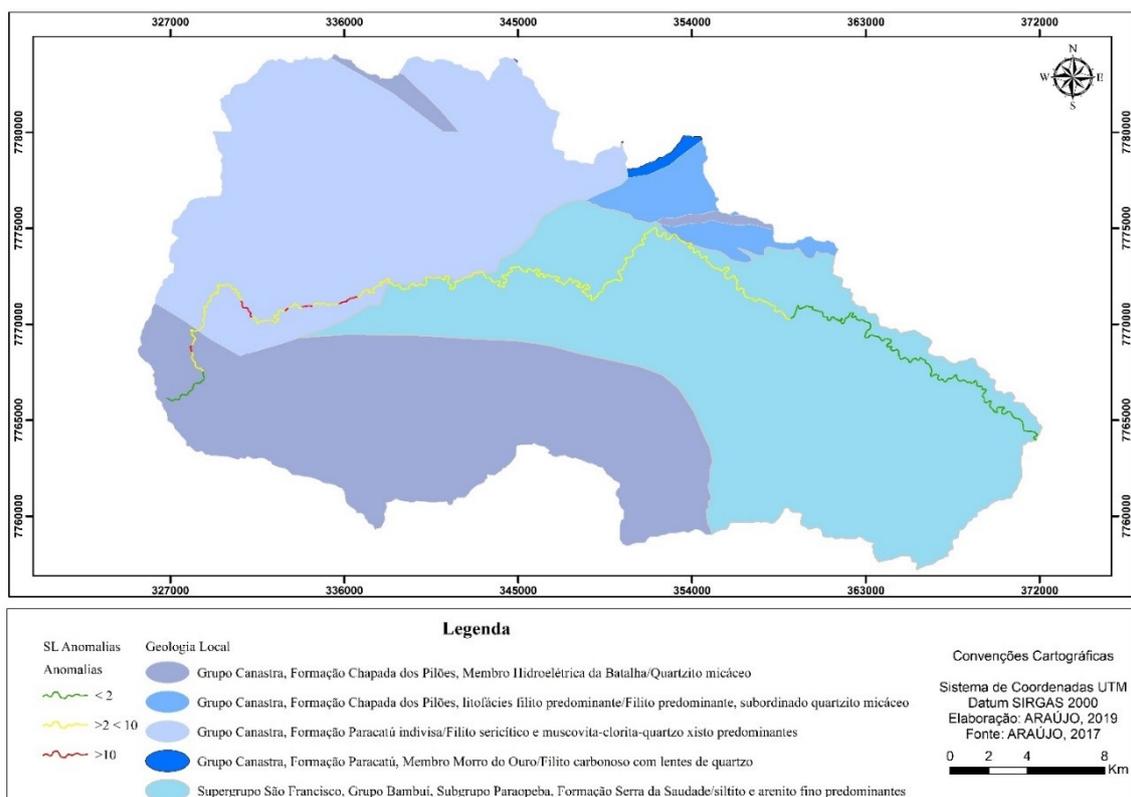
Esses setores de equilíbrio na nascente e a jusante do canal estão associados aos momentos em que o canal se encontra alinhado em lineamento. A nascente, por exemplo, corre na direção SO-NE, onde o canal corre encaixado em um lineamento de mesma direção até um segundo

momento, encontrando outro lineamento agora com direções NO-SE. A partir desse ponto, o canal entra em um estado de desequilíbrio em resposta ao processo de ajustamento do canal às mudanças direcionais a que foi submetido.

De modo geral, pode-se afirmar que a drenagem componente da Bacia do Rio Santo Antônio possui um vasto controle tectônico, de modo que seus canais fluviais estão justapostos com os lineamentos decorrentes do processo de dobramentos do Ciclo Brasileiro. Esse controle estrutural fica evidente quando posicionamos os valores anômalos do Índice SL com a base geológica e o mapeamento estrutural da região. Ao longo de toda a bacia, trechos de anomalias de segunda ordem são encontrados quando o canal escoia sobre a área de contato entre diferentes litotipos ou lineamentos estruturais (Figura 1).

O primeiro pico anômalo, cujo valor é maior que 10, encontra-se em uma área de grandes declividades associada ao início de um processo de escarpamento e mudança litológica, cujo canal sai da presença dos quartzitos, passando para a região dos filitos.

Sendo assim, o canal é submetido às condições diferenciais de resistência da rocha, sendo os filitos mais frágeis em comparação aos quartzitos, mudando também as formas de relevo. Picos anômalos dessa magnitude ocorrem mais quatro vezes ao longo do canal, no entanto, apenas acontecem na região dos dobramentos da Faixa Brasília, devido ao intenso processo de falhamento na área onde as mudanças de direção no curso do canal exigem a sua readequação.



**Figura 1** – Mapa Geológico com indicação das anomalias de drenagem.

**Fonte:** Autora.

Nos demais setores, que também não estão em equilíbrio, no entanto, com anomalias de dois a dez, os processos ocorrem em detrimento dessas grandes mudanças de curso do canal, uma vez que ele tende a aumentar o seu potencial energético para reequilibrar sua dinâmica. A todo momento, o canal passa por constantes mudanças do nível de base, conforme levantado no mapa de densidade de knickpoints elaborado por Araújo (2017), que se refere a uma análise sobre os padrões de knickpoints da bacia do Rio Santo Antônio.

No momento em que o canal passa a correr sobre as rochas sedimentares da Formação da Serra da Saudade, região essa pertencente ao Cráton do São Francisco e recoberta pela Bacia Sedimentar do São Francisco, o canal apresenta mudanças drásticas de direção devido também à presença de lineamentos formando ângulos de 90° entre um segmento e outro.

Ou seja, num primeiro momento, o canal corre sobre um lineamento de direções NO-SE, percorrendo depois sobre um encaixe de direções SE-NO e, por fim, voltando a se encaixar em um lineamento de direção NO-SE. Essas mudanças estão associadas também às grandes declividades como pode ser notado no perfil longitudinal (Figura 2).

A partir do quilometro 30 do Rio Santo Antônio, ele reestabelece seu nível de base (Rio Samburá) e passa por um período equilibrado, não sofrendo mudanças de litologia e nem direcional. Isso ocorre também por ser uma região cratônica conhecida pela sua estabilidade e ausência de grandes eventos tectônicos na sua gênese.

No seu perfil longitudinal é possível notar os grandes valores anômalos associados, principalmente, às mudanças do substrato rochoso e nível de base. É possível setorizar o perfil em dois momentos diretamente relacionados à gênese tectônica. O primeiro setor compreende do início até o quilometro 20 do canal, apresentando convexidade característica de perfis em rochas quartzíticas, com altos valores do índice SL e constantes mudanças de nível de base. Nesse setor se pode classificar o canal, na sua maioria, como encachoeirado.

O segundo setor, entre o quilometro 20 e a foz, corre sobre as rochas sedimentares da Formação Serra da Saudade. O perfil se apresenta côncavo, com valores mais baixos do índice SL. É possível utilizar o índice SL também para ressaltar os ajustes necessários no mapeamento geológico, uma vez que o canal é um agente extremamente sensível às mudanças do substrato.

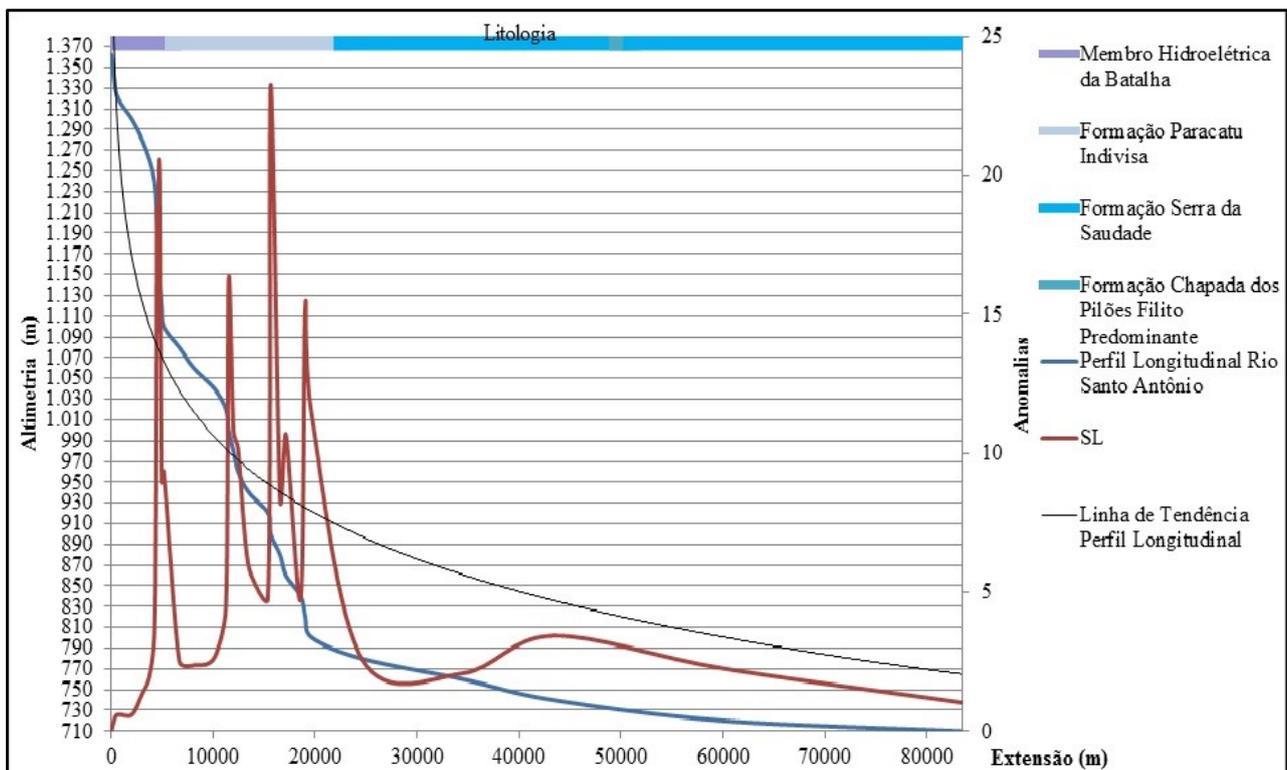


Figura 2 – Perfil Longitudinal.

Fonte: Autora.

## 7. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos neste trabalho nos permitem reafirmar a relação existente entre os índices morfométricos e a resposta do canal em relação às mudanças litológicas e estruturais. Ao longo das análises é possível observar o forte controle da área estruturalmente no âmbito da Faixa de Dobramentos Brasília, ditando o comportamento dos canais inclusive em abruptas mudanças de direcionamento.

Conclui-se também que se pode desenvolver os cálculos relacionados ao índice SL em ambiente SIG numa escala de 1:50.000, uma vez que foi possível demonstrar o índice proposto por Hack (1973), nesse ambiente, de forma satisfatória. As técnicas aqui aplicadas auxiliaram tanto no entendimento do canal fluvial, nas suas dinâmicas e nos seus determinantes, quanto na ampliação do conhecimento relacionado às Análises Morfométricas que auxiliam nas pesquisas geomorfológicas.

A base cartográfica disponibilizada do tipo vetor pelo IBGE também foi de uso satisfatório para as análises em questão, superando resultados encontrados em trabalhos realizados em imagens SRTM. Foi possível realizar todas as etapas apenas com esse material e, como exposto aqui, os resultados obtidos foram coerentes, tanto com a teoria do Índice de Hack, quanto com a realidade encontrada em campo.

## AGRADECIMENTOS

Agradecimentos à Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), pelo Projeto APQ CRA 0231/2016 o qual forneceu subsídio para desenvolvimento deste estudo, e a CAPES pelo financiamento da bolsa de estudos.

## REFERÊNCIAS

ARAÚJO, M. S. **Evolução dos canais fluviais: morfometria e sedimentologia na bacia hidrográfica do Rio Santo Antônio, Serra da Canastra- MG.** 2017. 94 f. Dissertação (Mestrado em: Geografia e Gestão do Território) – Instituto de Geografia, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017.

CÂMARA, G.; MEDEIROS, J. S. **GIS para Meio Ambiente.** 2. ed. São José dos Campos: INPE, 1998. 7p.

CAMOLEZI, B. A.; FORTES, E.; MANIERI, D. D. Controle Estrutural Da Rede De Drenagem Com Base Na Correlação De Dados Morfométricos E Morfoestruturais: O Caso Da Bacia Do Ribeirão São Pedro – Paraná. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, São Paulo, v. 13, n. 2, p. 201-211, 2012.

CHRISTOFOLETTI, A. Análise morfométrica de bacias hidrográficas. **Notícia Geomorfológica**, Campinas, v. 18, n. 9, p. 35-64, 1969.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia.** 1. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1980. 149p.

CODEMIG - Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais. **Mapa Geológico do Estado de Minas Gerais.** Belo Horizonte: CODEMIG, 2014. Escala 1:1.000.000.

CUNHA, S. B.; GUERRA, A. J. T (Org.). **Geomorfologia do Brasil.** 6. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2010. 392p.

ETCHEBEHERE, M. L. C.; SAAD, A. R.; SANTONI, G.; CASADO, F. C.; FULFARO, V J. Detecção de prováveis deformações neotectônicas no vale do rio do Peixe, Região Ocidental Paulista, mediante aplicação de índices RDE (Relação Declividade Extensão) em segmentos de drenagem. **Revista UNESP - Geociências**, Rio Claro, v. 25, n. 3, p. 271-287, 2006.

HACK, J. T. Stream-profile analysis and stream-gradient index. **Journal of Research of the United States Geological Survey**, Reston, v. 1, n. 4, p. 421-429, 1973.

HORTON, R. E. Erosional development of streams and their drainage basins: a hydrophysical approach to quantitative morphology. **Geological Society American Bulletin, McLean**, v. 56, n. 3, p. 275-370, 1945.

SCHUMM, S. A. River response to baselevel change: Implications for sequence stratigraphy. **The Journal of Geology**, Chicago, v. 101, p. 279-294, 1993.

SEEBER, L.; GORNITZ, V. River profiles along the Himalayan arc as indicators of active tectonics. **Tectonophysics**, Amsterdam, v. 92, p. 35-367, 1983.

STRAHLER, A. N. Hypsometric (area-altitude) – analysis of erosion al topography. **Geological Society of America Bulletin**, McLean, v. 63, n. 10, p. 1117-1142, 1952

UHLEIN, A. Coberturas cratônicas proterozóicas do Brasil. **Boletim Geociencias Petrobras**, Brasília, v. 21, p. 9-38, 2013.

Trabalho enviado em 21/10/2019

Trabalho aceito em 01/12/2019