

**UNIVERSIDADE ESTADUAL  
DO CEARÁ - UECE**

Av. Dr. Silas Munguba, 1700 -  
Campus do Itaperi, Fortaleza/CE

**ÍNDICES GEOMÓRFICOS NA  
CARACTERIZAÇÃO  
MORFOTECTÔNICA DE  
SISTEMAS HIDROGRÁFICOS**

**Felipe Pacheco Silva**

**Telma Mendes da Silva**

Citação: SILVA, F. P.; T. M.  
SILVA. ÍNDICES  
GEOMÓRFICOS NA  
CARACTERIZAÇÃO  
MORFOTECTÔNICA DE  
SISTEMAS HIDROGRÁFICOS.  
**Revista GeoUECE (online)**, v.  
08, n. 15, p. 89-98, jul./dez. 2019.  
ISSN 2317-028X.



## ÍNDICES GEOMÓRFICOS NA CARACTERIZAÇÃO MORFOTECTÔNICA DE SISTEMAS HIDROGRÁFICOS

### GEOMORPHIC INDEXES IN MORFOTECTONIC CHARACTERIZATION OF HYDROGRAPHIC SYSTEMS

### ÍNDICES GEOMORFICOS EN LA CARACTERIZACIÓN MORFOTECTÓNICA DE LOS SISTEMAS HIDROGRÁFICOS

Felipe Pacheco SILVA <sup>1</sup>

Telma Mendes da SILVA <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Doutorando no Programa de Pós-Graduação em Geografia/Universidade Federal do Rio de Janeiro. E-mail: feliipe.p@hotmail.com

<sup>2</sup> Professora Colaboradora no Programa de Pós-Graduação em Geografia/Universidade Federal do Rio de Janeiro. E-mail: telmendes@globo.com

#### RESUMO

A investigação de aspectos deformacionais relacionados a implicações neotectônicas figura como tema central desse trabalho, tomando por base a análise geomorfológica da rede de drenagem e suas configurações. Os resultados permitiram reconhecer comportamentos anômalos sem elos litológicos na configuração de drenagem e na morfologia do perfil longitudinal, possivelmente relacionados aos campos de reativações neotectônicas reconhecidos para o sudeste brasileiro. A caracterização morfométrica se mostrou adequada a uma prévia apreensão de comportamentos atípicos, abrindo vultoso campo para se aprofundar no conhecimento das modificações neotectônicas em ambientes de gênese complexa.

**Palavras-chave:** Neotectônica. Relação Declive-área. Análise Linear. Zona da Mata mineira.

#### ABSTRACT

The investigation of deformational aspects related to neotectonic implications is the central theme of this work, based on the geomorphometric analysis of the drainage network and its configurations. The results allowed to recognize anomalous behaviors without lithological links in the drainage configuration and longitudinal profile morphology, possibly related to the neotectonic reactivation fields recognized for southeastern Brazil. The morphometric characterization was adequate to a previous apprehension of atypical behaviors, opening large field to deepen the knowledge of neotectonic modifications in environments of complex genesis.

**Key-words:** Neotectonic. Slope-Area Relationship. Linear Analysis. Zona da Mata.



## RESUMEN

La investigación de los aspectos de deformación relacionados con las implicaciones neotectónicas es el tema central de este trabajo, basado en el análisis geomorfológico de la red de drenaje y sus configuraciones. Los resultados permitieron reconocer comportamientos anómalos sin enlaces litológicos en la configuración del drenaje y la morfología del perfil longitudinal, posiblemente relacionados con los campos de reactivación neotectónica reconocidos para el sureste de Brasil. La caracterización morfológica fue adecuada a una aprehensión previa de comportamientos atípicos, abriendo un gran campo para profundizar el conocimiento de las modificaciones neotectónicas en entornos de génesis compleja.

**Palabras-clave:** Neotectónica. Relación de área de pendiente. Análisis lineal. Zona forestal de Minas Gerais.

## 1. INTRODUÇÃO

Trabalhos de cunho tectônico têm obtido êxito em caracterizar os condicionamentos do relevo e da drenagem a partir de índices geomórficos, principalmente na investigação de assimetrias e padrões anômalos nos sistemas de drenagem. Desse modo, os estudos morfológicos das bacias se apresentam essenciais para o entendimento do estágio evolutivo e do comportamento hidrológico de uma rede de drenagem, favorecendo à compressão de numerosas questões sobre processos morfogenéticos que atuam na esculturação da paisagem.

Burnett e Schumm (1983) apontam que o sistema de drenagem é o primeiro elemento a adaptar-se a quaisquer deformações tectônicas do terreno, gerando mudanças do nível de base locais. Desse modo, ao se excluir controles litoestruturais e mudanças de ordem climática, é consenso que a rede de drenagem passa ser o ente mais sensível às modificações tectônicas, ao alterar seu curso e adaptar suas formas e/ou processos fluviais, além de apresentar padrões de drenagem de acordo com as estruturas do modelado.

Os processos neotectônicos que contribuem para a evolução da paisagem são difíceis de se reconhecer e quantificar, principalmente, em áreas com feições topográficas que indicam uma evolução complexa em seu quadro geomorfológico, como é o caso dos terrenos do embasamento cristalino brasileiro submetidos a uma complexa evolução no contexto dos orógenos proterozóicos do sudeste brasileiro.

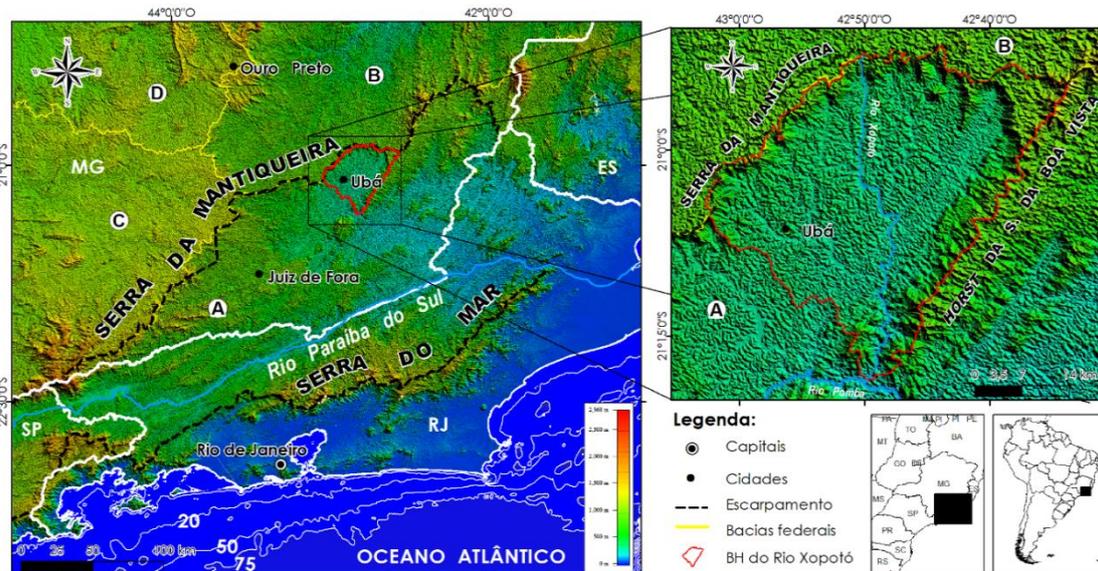


Nesse sentido, a análise geomorfométrica indicada a partir das leis de Horton (1945) e Flint (1974) pretende verificar a existência de comportamentos anômalos e assimetrias ligadas às deformações crustais na bacia do rio Xopotó (Mantiqueira Setentrional, MG).

### 1. 1. A área de estudo

A bacia hidrográfica do rio Xopotó, situada na mesorregião da Zona da Mata Mineira, no Sudeste do Estado de Minas Gerais, drena uma área de aproximadamente 1280 km<sup>2</sup>, e é tributária do rio Pomba que, por sua vez, é tributário da margem esquerda do rio Paraíba do Sul (Figura 1).

**Figura 1 – Localização da área de estudo na margem “passiva” atlântica**



A - Bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul; B - Bacia hidrográfica do rio Doce; C - Bacia do rio Grande; e D - Bacia do rio São Francisco.

O divisor da bacia hidrográfica dos segmentos norte e noroeste é definido por um extenso escarpamento da Mantiqueira Setentrional (GATTO et al., 1983), que recebe a denominação local de Serra de São Geraldo. O respectivo compartimento figura como um degrau escarpado que marca o contato entre o compartimento deprimido do interior da bacia e o Planalto dos Campos das Vertentes, o qual aloja as nascentes do rio Doce, Pomba, Novo, Paraibuna, etc. O divisor a sudeste é definido como Horst da Serra da Boa Vista - HSBV que desponta como divisor hidrográfico dos cursos d'água afluentes da bacia do rio Xopotó, dissecando a vertente NW, e dissecando os afluentes das bacias do



Médio-Baixo Pomba e nascentes do rio Muriaé localizados na vertente SE. Noce et al. (2003) interpretam o Horst da Serra da Boa Vista - HSBV como o registro mais importante da atuação tectônica distensiva de idade mesozoica-cenozoica na área de estudo, que desenvolveu uma série de blocos altos e baixos em resposta ao reajustamento isostático da margem continental. O setor interfluvial alocado a SW da bacia é estabelecido em um conjunto de morfologias rebaixadas.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO-METODOLÓGICO

A abordagem aplicada se ocupa em testar a validade das seguintes leis e princípios apresentados na Tabela 1, que tem como intuito observar aspectos assimétricos na organização hidrográfica da bacia hidrográfica e interpretá-los à luz das suas especificidades e implicações de ordem litoestrutural e/ou tectônica.

**Tabela 1 – Resumo das equações e leis de Horton (1945)**

Leis	Equação	Legenda	Princípio
Lei do Número de Canais (HORTON, 1945)	$R_b = \frac{N_w}{N_{w+1}}$	Nw é o número de segmento da ordem analisada. Nw+1 é o número de segmento da ordem seguinte	Em uma bacia determinada, a soma dos números de canais de cada ordem forma uma série geométrica inversa, cujo primeiro termo é a unidade de primeira ordem e a razão é a relação de bifurcação, o número de canais diminui com o aumento da ordem dos canais de forma regular.
Lei do Comprimento de Canais de cada ordem (HORTON, 1945)	$R_{lm} = \frac{L_w}{L_{w+1}}$	Lw é o comprimento médio da ordem analisada. Lw+1 é o comprimento médio dos canais da ordem seguinte.	O comprimento médio dos segmentos de ordens sucessivos tende a formar uma progressão geométrica cujo primeiro termo é o comprimento médio dos segmentos de primeira ordem e tem por razão uma relação de comprimento constante.
Lei da Declividade de Canais (HORTON, 1945)	$R_{gc} = \frac{S_w}{S_{w+1}}$	Sw é a declividade média da ordem analisada. Sw+1 é a declividade média da ordem seguinte	Em uma determinada bacia há uma relação definida entre a declividade média dos canais de certa ordem e a dos canais de ordem imediatamente superior que pode ser expressa por uma série geométrica inversa, na qual o primeiro termo é a declividade média dos canais de primeira ordem e a razão é a relação entre os gradientes dos canais.
Relação Declive-Área	$S = kA^{-\theta}$	Onde k é um coeficiente tido	Sendo uniforme a resistência erosiva de determinada litologia, a



---

(FLINT, 1974; WHIPPLE, 2004)	como índice de inclinação e $\theta$ é uma constata empírica considerada como índice de concavidade	declividade de um canal diminuirá progressivamente rio abaixo, seguindo o aumento na vazão ou da área de drenagem. Isso permite identificar trechos com declividades que fogem da tendência uniforme e associá-los a mudanças na resistência das rochas do leito ou a interferências tectônicas. Diferentes litologias (e resistências erosivas) estão associadas a diferentes índices de declividade (WHIPPLE, 2004).
------------------------------------	---	--

---

A operacionalização tomou por fundamento o Modelo Digital de Elevação (MDE) do *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) - *Arc-Second Global 2ª* versão, com resolução espacial de 1 arc seg. (aproximadamente 30m), em formato *Geotiff* e disponibilizados pelo *United States Geological Survey* (USGS), permitiu o reconhecimento das ordens de drenagem atribuídas de acordo com Strahler (1952) a partir das ferramentas de análise espacial do *ArcInfo* (ArcGis 10.3), assim como a obtenção da declividade.

O índice da declive-área, por sua vez, foi obtido a partir da função potencial derivada da integração da declividade (S) e área de contribuição (A) mensurados a partir da base cartográfica planialtimétrica digital do IBGE (SF-23-X-B-IV-4, SF-23-X-B-V-3, SF-23-X-B-V-4, SF-23-X-D-II-2, SF-23-X-D-II-1, SF-23-X-D-I-2, SF-23-X-D-I-4, SF-23-X-D-II-3, SF-23-X-D-II-4) - escala de 1:50.000. A relação entre área e declividade foi plotada como uma linha reta em eixos logarítmicos em um gráfico de dispersão (log-log).

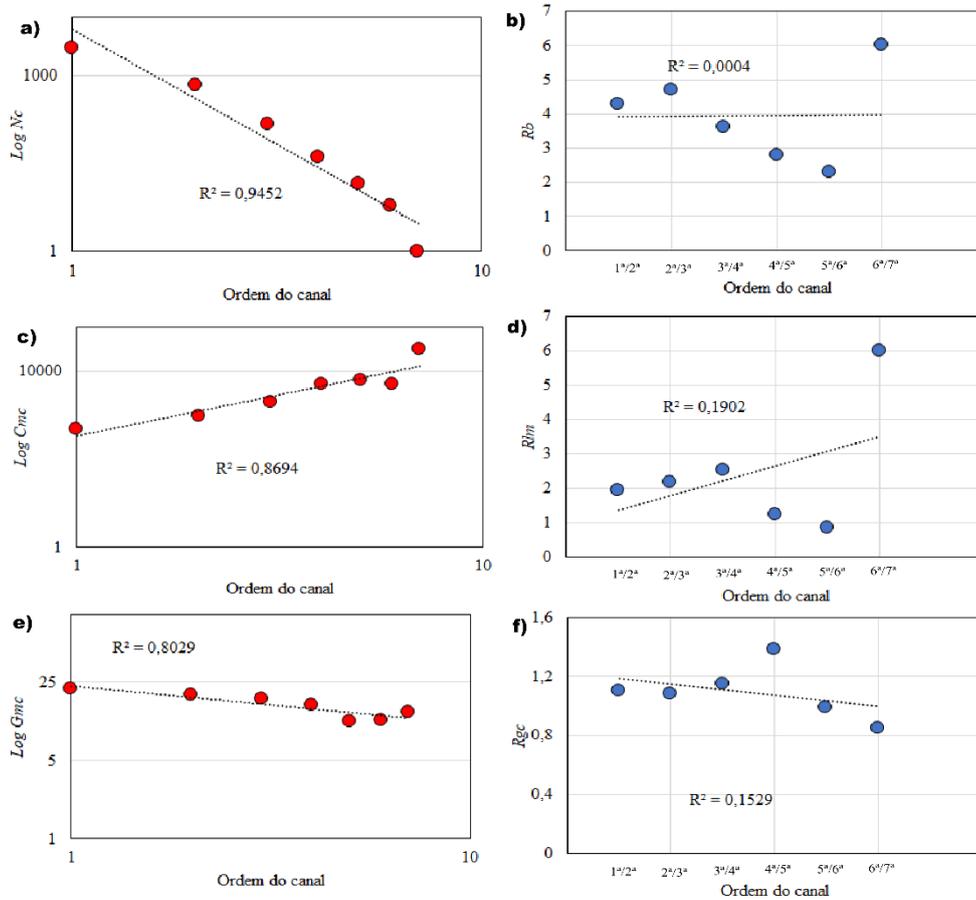
Os dados do número de canais de cada ordem ( $N_c$ ), comprimento médio dos canais ( $C_{mc}$ ), gradiente médio dos canais ( $G_{mc}$ ) e declive-área (S/A) foram exportados para uma planilha eletrônica para os cálculos penitentes e construção dos gráficos.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados dos índices morfométricos proposto por Horton (1945) reportam as tendências estimadas para cada parâmetro (Figura 2 e Quadro 1).



**Figura 1 - Parâmetros morfométricos para bacia do rio Xopotó.**



a) Número de canais (Nc); b) Razão de bifurcação (Rb); c) Comprimento médio dos canais (Cmc); d) Razão do comprimento médio de canais (RIm); e) Gradiente médio dos canais (Gmc); e f) Razão do gradiente de canais (Rgc).

**Quadro 1 – Resumo dos parâmetros morfométricos propostos por Horton (1945) para área de estudo.**

Par.	Ordem dos canais													Méd.
	1 <sup>a</sup>	1 <sup>a</sup> /2 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup> /3 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup> /4 <sup>a</sup>	4 <sup>a</sup>	4 <sup>a</sup> /5 <sup>a</sup>	5 <sup>a</sup>	5 <sup>a</sup> /6 <sup>a</sup>	6 <sup>a</sup>	6 <sup>a</sup> /7 <sup>a</sup>	7 <sup>a</sup>	
Nc	2969		681		145		40		14		6		1	
Rb		4,3		4,7		3,6		2,8		2,3		6		3,95
Cmc	482		926		2015		5053		6174		5116		31045	
RIm		1,92		2,17		2,51		1,22		0,83		6		2,44
Gmc	21,68		19,27		17,78		15,47		11,21		11,36		13,39	
Rgc		1,1		1,08		1,15		1,38		0,99		0,85		1,09

Par: Parametro; Méd.: Média; Nc: Número de canais; Rb: Razão de bifurcação, Cmc: Comprimento médio do canal; RIm: Razão do comprimento médio dos canais, Gmc: Gradiente médio dos canais; Rgc: Razão do gradiente dos canais.



Desse modo, o  $N_c$  e  $G_{mc}$  revelam uma tendência de decréscimo dos valores a despeito do aumento da ordem dos canais, com uma alta correlação dos dados ( $R^2 = 0,94$  e  $R^2 = 0,80$ , respectivamente); enquanto o  $C_{mc}$  apresenta uma progressão geométrica com o aumento da ordem, também com boa correlação de dados  $R^2 = 0,86$ . Os respectivos resultados evidenciam que as leis de Horton mostraram-se válidas para a área de estudo. Entretanto, para análise das relações entre  $R_b$ ,  $R_{lm}$  e  $R_{gc}$  não exibem está boa correlação apresentando uma significativa dispersão dos dados.

A partir da relação de bifurcação resultados superiores a dois ( $R_b \leq 2$ ), conforme o estabelecido por Strahler (1952), o valor médio foi de 3,95. Strahler (1952) informa que  $R_b$  variando de 3 a 5 indica uma configuração mínima da bacia por influência estrutural. Dentro dessa faixa (3 a 5) os valores menores ( $3^a/4^a = 3,6$ ) podem ser considerados relacionados à menores perturbações estruturais sem distorção do padrão de drenagem, enquanto os valores mais altos ( $1^a/2^a = 4,3$ ;  $2^a/3^a = 4,7$ ;) podem ser indicativos de alta complexidade estrutural e baixa permeabilidade, conforme as concepções de Strahler (1963). Os valores anormais inferiores a 3 ( $4^a/5^a = 2,8$  e  $5^a/6^a = 2,3$ ) e superiores a 5 ( $5^a/7^a = 6$ ) estão relacionados a áreas nas quais o controle geológico é dominante.

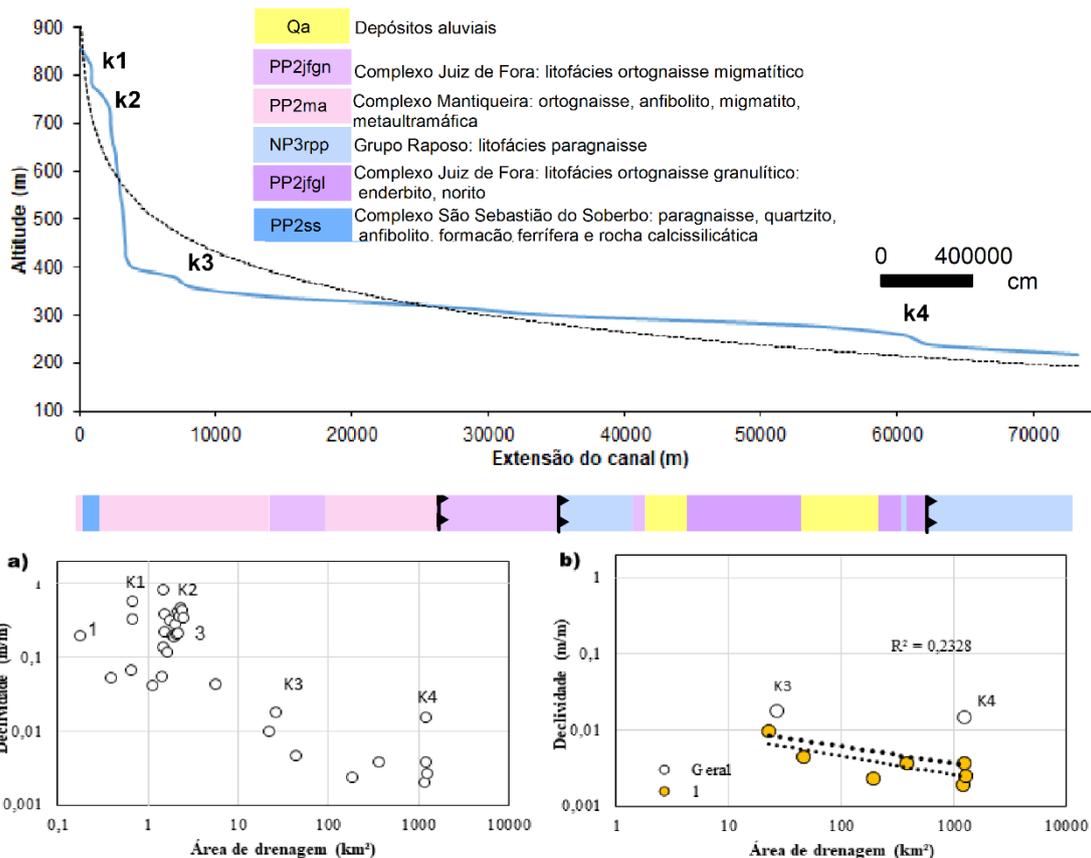
A relação do comprimento médio dos canais, por sua vez, não apresenta uma diminuição constante com o aumento da ordem ( $5^a/7^a = 6$ ), indicando uma variação no condicionamento da drenagem. Nesse sentido, o comprimento dos canais de última ordem, em geral, apresenta extensões maiores dos que os de ordem primária e intermediária ( $1^a/2^a = 1,92$ ;  $3^a/4^a = 2,5$ ).

A relação do gradiente de canais não apresenta um decréscimo constante sugerindo controles distintos favorecem o aumento de gradiente para canais de quinta e quarta ordem. Neste setor os segmentos sugerem uma maior incisão fluvial, tendo os canais de quarta ordem maior entalhamento do que os já descritos. Nas ordens subsequentes, nas quais os canais de sexta e sétima ordens apresentam um gradiente ainda maior e aumento da incisão fluvial, indicando um quadro de possível soerguimento dos canais de maiores extensões.

Para relação declive-área de drenagem o padrão de assimetria se manteve no que concerne ao padrão esperado de equilíbrio entre processos erosivos e de acúmulo sedimentar (Figura 3 e Quadro 2).



Figura 2 – Perfil longitudinal com geologia



a) Relação declive-área para o canal. b) relação declive área para os segmentos ligados a processos fluviais de erosão concentrada. Cada linha pontilhada corresponde a uma linha de melhor ajuste obtida estatisticamente. Os parâmetros estatísticos e morfométricos de cada alinhamento constam no Quadro 2.

Quadro 1 - Parâmetros morfométricos e estatísticos da relação declive-área para o canal.

LMA*	k	$\theta$	n	R <sup>2</sup>
Geral	0,017	-0,22	9	0,23
1	0,014	-0,25	7	0,59

OBS.: Linha de melhor ajuste; a numeração das linhas corresponde à apresentada na Figura 3.

A análise do comportamento das declividades sugere um forte controle estrutural e/ou tectônico, sendo possível evidenciar de modo claro ao menos um *knickpoint* (K3) não atrelado a diferença de resistência litológica, enquanto nos demais *knickpoints* o controle litológico se mostra mais pronunciado. Os primeiros *knickpoints* no perfil longitudinal (K1 e K2), associadas aos setores planálticos, estão associadas aos segmentos nos quais os processos erosivos difusos das encostas predominam. O *knickpoint* associado ao trecho final do perfil longitudinal (K4) possivelmente é condicionado



a partir do contexto de falhas transversais que controlam todo o segmento final ou até mesmo consolidado a trechos com distintas resistências litológicas.

O padrão discutido anteriormente é bem correlacionado a relação declive-área que indica esses segmentos “desajustados”, principalmente para o baixo curso. A tendência geral revela um padrão côncavo ( $\theta = - 0,22$ ) e com baixo índice de declividade ( $k = 0,017$ ), ressaltando dois componentes “desajustados” da tendência geral, nos quais se estabelecem rupturas de declive (K3 e K4) que evidenciam a reativação de falhas promovendo um aumento da declividade e maior encaixe da drenagem. Ao excluir os respectivos setores “não ajustados”, a tendência geral que se tem é uma ampliação da correlação dos dados ( $R^2 = 0,59$ ) e uma diminuição do índice de declividade ( $k = 0,014$ ) e, conseqüentemente, uma ampliação da concavidade para o canal ( $\theta = - 0,25$ ). Estes setores “desajustados” congregam convexidades na morfologia fluvial sob litologias graníticas e enderbíticas do Complexo Juiz de Fora, não ajustadas ao aumento do potencial do escoamento.

Compreende-se que esses desvios da tendência geral de diminuição dos declives são evidentes no baixo curso, indicando estruturas reativadas pela tectônica cenozoica promovendo convexidades, contribuindo, de modo claro, para a ampliação dos processos incisivos nessas zonas afetadas por falhas transversais ligadas ao componente NE-SW, expressados pela supressão da sedimentação aluvial, aumento do gradiente das encostas e maior proeminência de saltos, corredeiras e desvios abruptos. Nesse sentido, a bacia se caracterizaria pelo aspecto não estacionário, sendo este estágio dado, sobretudo, pela presença de convexidades nos segmentos fluviais finais. A linha de melhor ajuste (*best fine line*) associada ao perfil longitudinal sugere que o canal evidencia a alternância de segmentos soerguidos e rebaixados, estes últimos seriam associados a porção no qual se ajusta o *knickpoint* – K3, já os segmentos soerguidos estão vinculados ao K4, aludindo a um padrão de basculamento desses segmentos finais.

#### 4. CONCLUSÃO

Os índices geomorfométricos utilizados permitiram caracterizar e evidenciar os aspectos anômalos e/ou “desajustados” para bacia hidrográfica



analisada, sugerindo padrões assimétricos; alguns inequivocamente oriundos de processos de reativações neotectônicas, enquanto outros sugestivos de arranjos possivelmente ligados a um condicionamento litoestrutural.

No tocante a viabilidade e pertinência dos respectivos índices geomorfométricos para caracterizar comportamentos anômalos se ressalta a eficiência e celeridade em conferir uma avaliação do quadro de deformações na crosta rasa de forma resoluta, permitindo ampliar o leque de investigações e caracterizações morfotectônicas que indubitavelmente deve compor o escopo de um trabalho relativo à compreensão das configurações neotectônicas das paisagens em terrenos do embasamento cristalino brasileiro.

## 5. AGRADECIMENTOS

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa cedida que permitiu a realização desta pesquisa.

## 6. REFERÊNCIAS

BURNETT, A.W.; SCHUMM, S.A. Alluvial river response to neotectonic deformation in Louisiana and Mississippi. **Science**, v. 222, p. 49-50. 1983.

FLINT, J. J. Stream gradient as a function of order, magnitude, and discharge. **Water Resources Research**, v. 10, n. 5, p. 969-973, 1974.

GATTO, L. C. S.; RAMOS, V. L. S.; NUNES, B. T. A.; MAMEDE, L.; GÓES, M. H. B.; MAURO, C. A.; ALVARENGA, S. M.; FRANCO, E. M. S.; QUIRICO, A. F.; NEVES, L. B. Geomorfologia. In: **Projeto RADAMBRASIL**. Folha SF-23/24 Rio de Janeiro/Vitória. Rio de Janeiro: IBGE, 1983.

HORTON, R. E. **Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology**. Bulletin of the Geological Society of America, Washington, v.56, n.1, p.275-370, 1945.

NOCE, C.M., ROMANO, A.W., PINHEIRO, C.M., MOL, V.S., PEDROSA-SOARES, A.C. **Mapa geológico - folha Ubá (1:100.000)**. Projeto Sul de Minas-Etapa I. CODEMIG/UFMG. CD-ROM, 2003.

STRAHLER, A. N. Dynamic basis of geomorphology. **Geological Society of American Bulletin**, v. 63, p. 923-938, 1952.

STRAHLER, A. N. Quantitative geomorphology of drainage basins and channel network; In: **Handbook of Applied Hydrology**; McGraw Hill Book Company, New York, pp. 4–11, 1964.