

Controle de estruturas do embasamento sobre o relevo da porção central da Bacia do Parnaíba evidenciado pela análise de perfis longitudinais de rios.

Delano Menecucci Ibanez¹
Fernando Pellon de Miranda¹
Raimundo Almeida Filho²

¹Petrobras-Cenpes
Av. Horácio Macedo, 950 - 21941-915 – Rio de Janeiro - RJ, Brasil
{dibanez, fmiranda}@petrobras.com.br

²Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil
rai@dsr.inpe.br

Abstract. In the region of Mearim and Grajaú rivers, the Parnaíba Basin relief is composed of small hills mostly associated with sandstones of the Itapecuru Formation. Furthermore, interspersed valleys with Podzolic soils are derived from shales, siltstones, marls and limestones of Codó and Grajaú formations. The longitudinal profiles of about 356 rivers were analyzed in order to verify if the degree of fluvial incision of topography is controlled only by lithologic variation. Three geomorphometric indices were used: stream-length gradient, normalized steepness, and spatial distribution of knickpoints. All indices are based on the identification of slope changes along longitudinal profiles. The stream-length gradient index (Hack index) reflects the power flow of a river and is calculated by multiplying the slope and upstream length of the channel at a given point. The normalized steepness index is obtained by combining the slope and drainage area of river sections on a log-log graph. For the extraction of knickpoints, which represent convex reaches interrupting the typically concave river profiles, a new approach was used based on automatic identification of minimum and maximum slopes on the Distance-Slope graph. This procedure is more sensitive in defining knickpoints than the visual inspection of longitudinal profiles alone. Comparison of results with geological and geophysical data permitted to consider that relief incision is controlled not only by lithology but also by geologic structure, as suggested by the spatial coincidence of knickpoints with basement faults and crustal domain boundaries. Processes involved may be related to tectonic reactivation or differential compaction.

Palavras-chave: Parnaíba Basin, geomorphometric index, knickpoint, Bacia do Parnaíba, índice geomorfométrico.

1. Introdução

Os perfis longitudinais dos rios são medidas fundamentais na hidrologia e geomorfologia fluvial, refletindo a declividade, o gradiente energético e as mudanças altimétricas. Muitos perfis longitudinais apresentam uma curvatura côncava, com aumento da sua concavidade para montante. Tal comportamento manifesta um equilíbrio entre o fornecimento sedimentar e a capacidade de transporte fluvial, configurando uma aproximação assintótica de um perfil longitudinal de equilíbrio (Rădoane et al. 2003).

A análise da forma do perfil longitudinal de um curso d'água possibilita inferir se o mesmo se encontra em estado de equilíbrio (*steady-state*) ou desequilíbrio, no que diz respeito à sua capacidade de erosão, transporte e deposição. Conseqüentemente, esse procedimento pode fornecer pistas para a identificação dos fatores responsáveis pelo estado de desequilíbrio do respectivo sistema fluvial (Phillips et al. 2010).

Os aspectos que marcam o distanciamento dos perfis da forma côncava ideal são a existência de segmentos convexos e de rupturas de declive (knickpoints). Essas mudanças no gradiente dos perfis longitudinais são usadas para indicar os seguintes processos: resposta de equilíbrio à variação litológica (Hack 1973) e de desequilíbrio, por exemplo, devido à queda do nível base do mar (Reed 1981); atividade neotectônica (Bishop et al. 2005); propagação de knickpoints em resposta a qualquer elevação superficial (Seidl et al. 1996).

O relevo da região dos rios Mearim e Grajaú, localizada na Bacia do Parnaíba, estado do Maranhão (Figura 1), é composto por colinas e morros, associados principalmente a arenitos cretáceos da Formação Itapecuru. Nos vales a eles intercalados ocorrem solos Podzólicos derivados de folhelhos, siltitos argilosos, calcários e margas das formações cretáceas Codó e Grajaú (CPRM 2004). Para verificar se o grau de dissecação e incisão fluvial da topografia é controlado apenas por essa variação litológica, os perfis longitudinais de 356 rios foram analisados através de três índices geomorfométricos: a relação declividade-extensão, a declividade normalizada e a distribuição espacial de knickpoints. Todos os índices são baseados na identificação de mudanças na declividade ao longo dos perfis longitudinais.

O índice referente à relação declividade-extensão (índice de Hack 1973) reflete o poder de escoamento de um rio e é calculado pela multiplicação da declividade pelo comprimento do canal a montante de um determinado ponto. O índice de declividade normalizado é obtido combinando em um gráfico da função logaritmo a área drenada com a declividade de seções do rio (Wobus et al. 2006). Para a extração dos knickpoints, foi usada uma nova abordagem automática baseada na identificação de mínimos e máximos relativos da declividade no gráfico de Distância por Declividade de Bishop e Goldrick (2000). Tal abordagem é muito mais sensível na identificação de knickpoints do que a simples inspeção visual do perfil longitudinal. A comparação dos índices geomorfométricos com dados geológicos e geofísicos permitiu considerar que a incisão e dissecação do relevo não refletem apenas a influência da litologia, mas também um controle estrutural. Tal fato é corroborado pela coincidência espacial entre knickpoints e limites entre domínios magnéticos e falhas mapeadas no embasamento. A análise dos outros índices geomorfométricos também reforça que essas estruturas modelam o relevo da região, seja por reativação tectônica ou compactação diferencial.

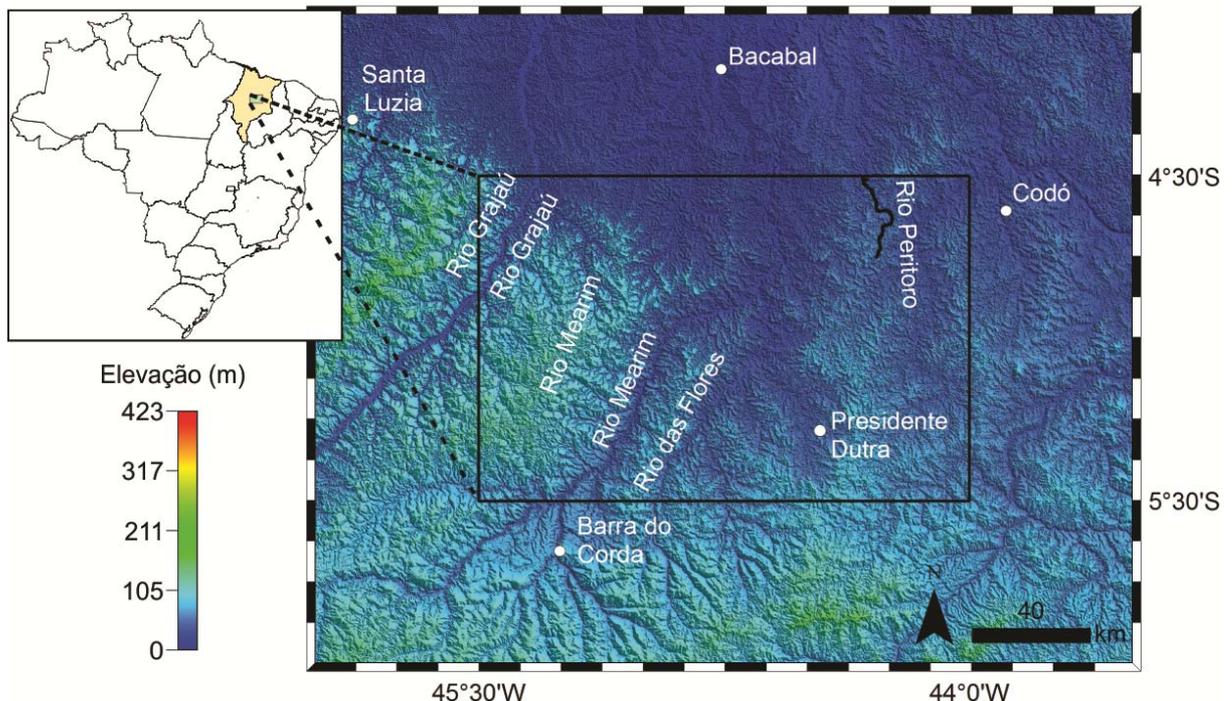


Figura 1. Localização da área de estudo (retângulo) sobreposta à imagem SRTM disponível em USGS/EROS (U.S. Geological Survey/Earth Resources Observation and Science) Data Centre. O Rio Peritoto (em preto) foi utilizado para exemplificar o método de extração de knickpoints e knickzonas.

2. Materiais e Métodos

A rede de drenagem utilizada para obtenção dos perfis longitudinais foi extraída do DEM SRTM pelo método D8 proposto por Jenson e Domingue (1988) e disponível no programa PCI Geomatica 10.0. Após a sua extração, a rede foi ordenada de acordo com a classificação de Veneziano e Niemann (2000).

Para a geração de perfis longitudinais, foram selecionados 356 rios de ordens 1 e 2 com comprimento maior ou igual a 10 km. Como a extração dos perfis tomou por base o modelo digital de elevação da missão SRTM, os mesmos foram suavizados para a confecção de produtos com o mínimo de influência dos erros inerentes a qualquer dado digital (Wobus et al. 2006).

2.1 Knickpoints

Normalmente, a extração de knickpoints de perfis longitudinais é feita de modo visual e subjetivo (e.g. Bishop et al. 2005). O emprego de técnicas automáticas é restrito ao trabalho de Hayakawa e Oguchi (2006), os quais, baseados no cálculo do gradiente hidráulico com diferentes comprimentos ao longo dos cursos d'água, obtiveram um indicador objetivo para identificação de knickzonas (segmento fluvial entre o mínimo relativo e o máximo relativo adjacente à jusante, conforme Figura 2). Ademais, Gonga-Saholiariliva et al. (2011) apresentaram um método geomorfológico para localizar knickpoints e knickzonas combinando três atributos topográficos (declividade, curvatura horizontal e vertical).

No presente trabalho, propomos uma nova abordagem automática para identificação de knickpoints e knickzonas, com base na identificação de mínimos e máximos relativos no gráfico de Distância por Declividade (Distance-Slope, DS) (Bishop e Goldrick 2000). O gráfico DS é muito mais sensível para a identificação de knickpoints que o perfil longitudinal (Figura 2). Nele, os knickpoints são todos os pontos de mínimos relativos, ou seja, o ponto onde a declividade, expressa como a função $f'(x)$, é igual a zero e onde ocorre a mudança de sinal. Em outras palavras, se $f'(x) < 0$ em um intervalo aberto à esquerda de x e se $f'(x) > 0$ em um intervalo aberto à direita de x , então f tem um mínimo relativo em x . Se, por outro lado, $f'(x) > 0$ imediatamente à esquerda de x e $f'(x) < 0$ imediatamente à direita, então f possui um máximo relativo em x . O intervalo entre cada mínimo relativo (knickpoint) e o máximo relativo adjacente à jusante define a knickzona.

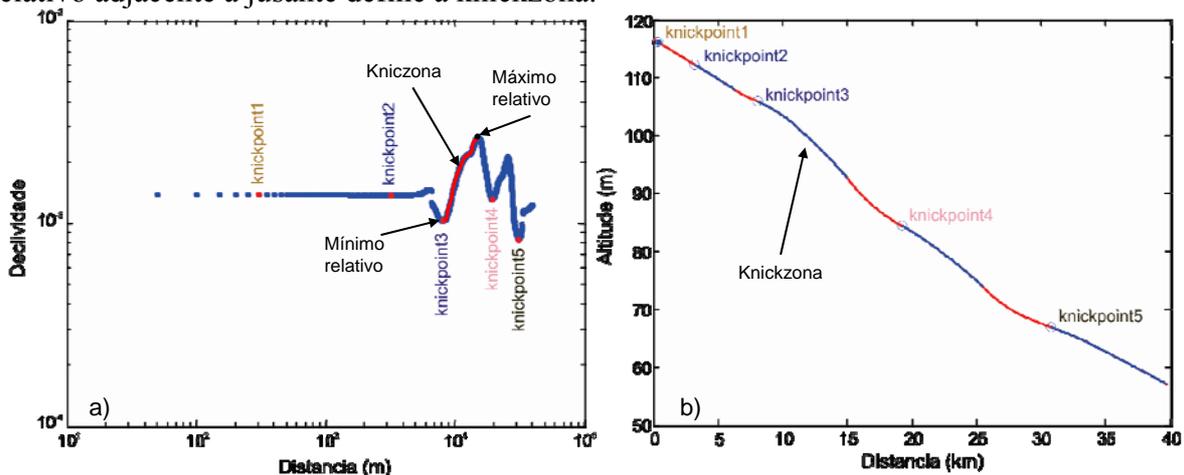


Figura 2. a) Identificação de knickpoints (mínimos relativos) e knickzonas (segmento entre o mínimo relativo e o máximo relativo adjacente à jusante) no gráfico de Distância por Declividade (Distance-Slope, DS). b) Knickpoints e knickzonas extraídos automaticamente no gráfico DS e identificados em perfil longitudinal do Rio Peritodo (ver Figura 1).

2.2 Relação declividade-extensão

Hack (1973) propôs um novo método, denominado como *stream gradient index* (SL), para identificar alterações na concavidade natural de perfis longitudinais de cursos d'água. O índice SL ou RDE (relação declividade-extensão), como utilizado por Guedes et al. (2009), permite a normalização dos valores de gradiente e identificação de pontos anômalos em cada seção do rio, da nascente à foz. Ele se refere à declividade de um canal, ou de determinados trechos da drenagem, multiplicada pela extensão total do curso, ou pela distância entre o referido trecho e a nascente. O índice RDE é calculado pela equação (Guedes et al. 2009):

$$RDE = \frac{\Delta h}{\Delta l} L \quad (1)$$

onde Δh é a diferença altimétrica entre dois pontos extremos de um segmento de drenagem; Δl corresponde ao comprimento da projeção horizontal da extensão do segmento considerado e L refere-se ao comprimento do curso d'água entre o ponto inferior do segmento considerado até a nascente.

2.3 Índice declividade normalizado

Os índices de concavidade e declividade são exemplos de parâmetros geomorfométricos que podem ser extraídos de perfis longitudinais para estudos tectônicos. Alguns autores (e. g. Wobus et al. 2006) já demonstraram a correlação entre esses índices e taxas de soerguimento em áreas onde existem tais informações, assim como a habilidade de delinear quebras temporais e espaciais em taxas de soerguimento em áreas com informações insuficientes.

A associação entre os índices de concavidade e declividade com taxas de soerguimento pode ser realizada por meio do modelo de incisão fluvial em leitos rochosos, o qual postula que os canais de drenagem não observam uma cobertura contínua de sedimentos aluviais, mesmo em um fluxo baixo, pois o gradiente de escoamento tende a ser igual por causa da erosão e o soerguimento (Shahzad et al. 2009).

As diferenças de litologia ou a presença de falhas ajudam os canais de drenagem atingir uma nova condição de equilíbrio. Matematicamente, isto pode ser escrito na seguinte forma (Shahzad et al. 2009):

$$\frac{dz}{dt} = U - E = u - KA^m S^n \quad (2)$$

onde U e E representam taxas de soerguimento e erosão, respectivamente. K representa o fator de eficiência de erosão, que está diretamente relacionado com a resistência dos sedimentos ou da rocha, A é a área de drenagem a montante e S é a declividade do canal. As constantes m e n são dependentes da hidrologia da bacia, geometria hidráulica e processo de erosão. Por sua vez, dz/dt representa a taxa de mudança de elevação em relação ao tempo. Caso a superfície esteja em estado estacionário, então dz/dt é igual a 0. Assim, para uma superfície em estado estacionário, a equação 1 pode ser reescrita como (Snyder et al. 2000):

$$S = \left(\frac{U}{K}\right)^{\frac{1}{n}} A^{\frac{m}{n}} \quad (3)$$

onde m/n mostra a concavidade do perfil e o coeficiente $(U/K)^{1/n}$ a declividade. A função de potência para o gradiente de escoamento é representada por (Snyder et al. 2000):

$$S = k_s A^{-\theta} \quad (4)$$

o expoente, θ (índice de concavidade) e o coeficiente, k_s (índice de declividade) podem ser medidos diretamente pela análise de regressão da área drenada pela declividade, onde θ é a inclinação da reta e k_s é ponto onde a reta de regressão intercepta o eixo y (Snyder et al. 2000). Contudo, como os índices de declividade e concavidade são fortemente correlacionáveis (Wobus et al. 2006), para a comparação entre os 356 cursos d'água no presente trabalho foi necessária a normalização do índice de declividade. Para isso, estimou-se um índice de concavidade médio (0,43) de toda rede de drenagem para ser utilizado como referência para calcular o k_{sn} (índice de declividade normalizado).

3. Resultados

Como a metodologia dos mínimos e máximos relativos identifica qualquer convexidade presente ao longo dos perfis longitudinais, o mapa resultante apresentou um total de 1772 knickpoints, o que torna sua análise espacial difícil. Para contornar tal situação, as citadas feições foram classificadas em quatro classes, com base em seus atributos de comprimento e mudança de elevação.

O mapa de distribuição espacial para cada atributo levou em consideração apenas as duas classes com maiores valores. Assim, o mapa de knickpoints classificados pelo comprimento da knickzona mostra maior aglomeração na parte leste da área de estudo (Figura 3a), enquanto que o mapa de mudança de elevação exibe maior aglomeração na parte oeste (Figuras 3b).

Esses resultados revelam um relevo mais acidentado na parte oeste, com as knickzonas mais curtas e íngremes. A princípio, a distribuição distinta de knickpoints entre as regiões oeste e leste não mostrou nenhuma relação clara com o mapa geológico, como pode ser visto na Figura 3. Em compensação, os knickpoints da porção oeste parecem ser influenciados por estruturas geológicas em subsuperfície. Isso fica evidente na coincidência espacial entre aglomerados de knickpoints e falhas mapeadas em subsuperfície por Hall et al. (2009) (Figura 3b).

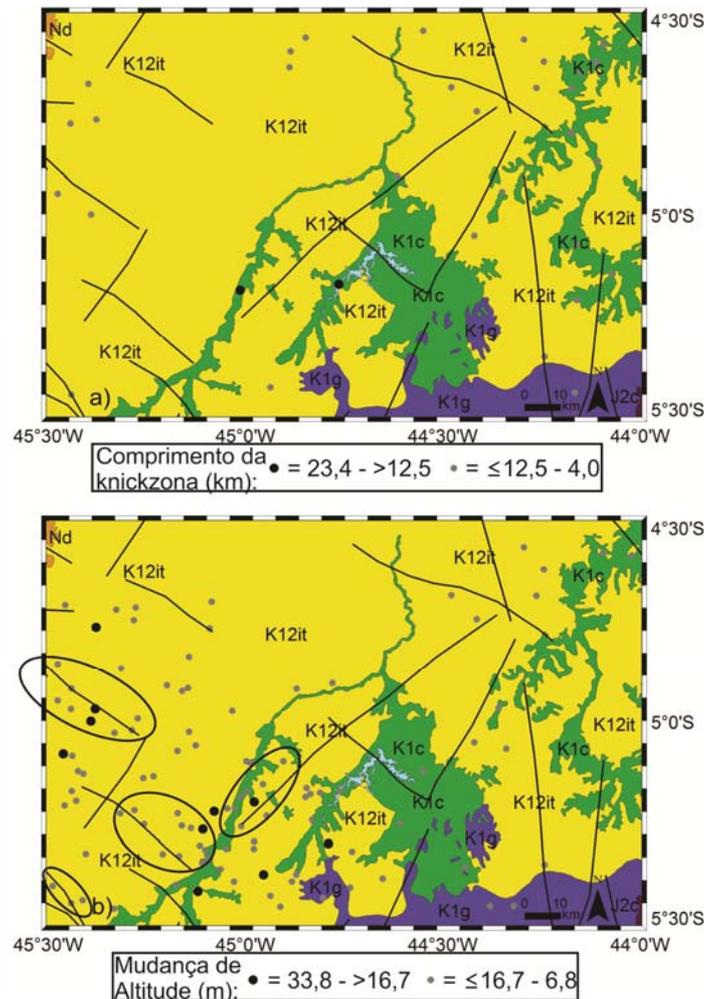


Figura 3. Knickpoints extraídos automaticamente do gráfico DS e classificados de acordo com (a) comprimento e (b) mudança de altitude, em sobreposição ao mapa geológico (CPRM 2004): Nd = Depósito detriticos (Mioceno); K12it = Formação Itapecuru (Cretáceo Superior); K1c = Formação Codó (Cretáceo Superior); K1g = Formação Grajaú (Cretáceo Superior); J2c

= Formação Corda (Jurássico Superior). As elipses indicam aglomerados de knickpoints associados com falhas do embasamento (traço preto, Hall et al. 2009).

Outro exemplo do possível controle de estruturas em subsuperfície sobre a distribuição de knickpoints na região oeste é a configuração em forma de arco de dois grupos de tais feições (G1 e G2 na Figura 4). Ambos são formados por knickpoints que apresentam os mais altos valores de mudança de elevação nas suas knickzonas. O grupo G1 associa-se espacialmente com um forte gradiente no mapa da primeira derivada vertical Bouguer (Figura 4a). Vale ressaltar que a técnica da derivada vertical das anomalias gravimétricas permite que limites dos corpos causadores sejam posicionados com maior precisão (Blakely, 1996).

Além disso, o grupo G1 também coincide (Figura 4b) com limites entre unidades do embasamento (ortognaisse, paragnaisse e intrusiva félsica), as quais foram interpretadas por Hall et al. (2009) com base em métodos potenciais. Por outro lado, o grupo G2 aparentemente é influenciado por feições ígneas intrabacinais, que foram delineadas a partir de dados magnéticos (Figura 4c).

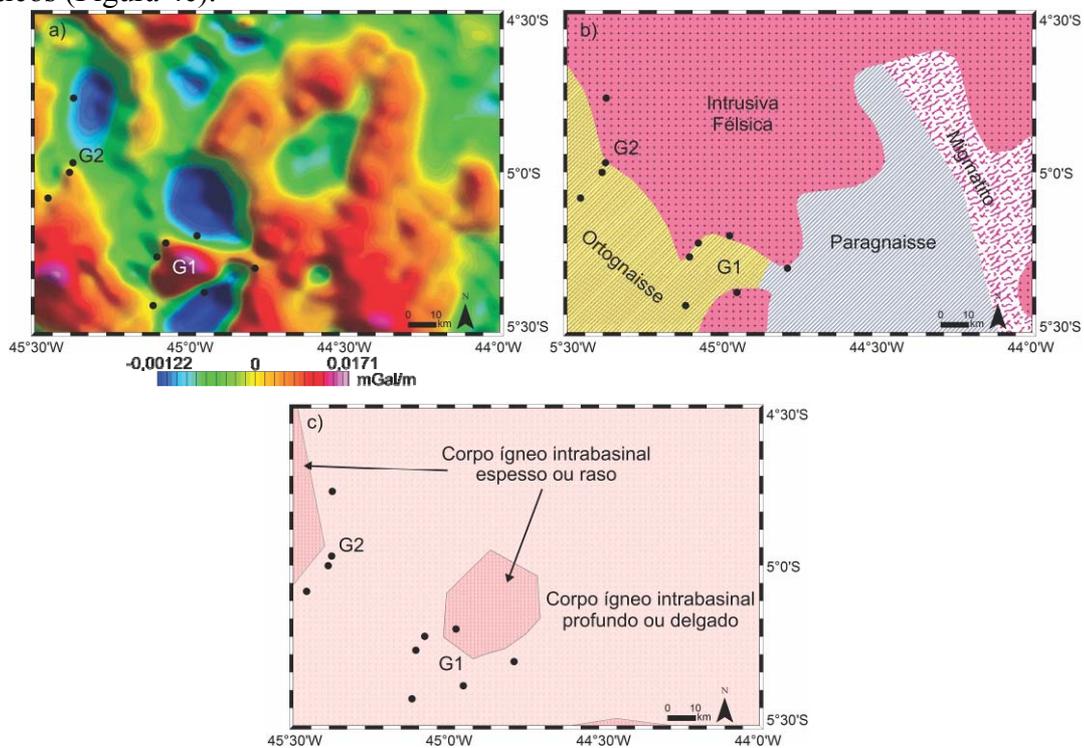


Figura 4. Grupos de knickpoints (G1 e G2) com os mais altos valores de mudança de elevação em suas knickzonas, com sobreposição aos mapas de Hall et al. (2009): a) primeira derivada vertical Bouguer; b) embasamento; c) rochas vulcânicas intrabacinais.

Os resultados dos índices de declividade normalizada (k_{sn}) e da relação declividade-extensão (RDE) evidenciam que os rios da porção oeste da área de estudo apresentam maior poder de incisão do que os rios da parte leste (Figuras 5a e 5b), reforçando as diferenças entre essas regiões. Tal fato pode significar que as estruturas presentes na porção oeste sofreram reativação mais acentuada, provocando maior taxa de denudação.

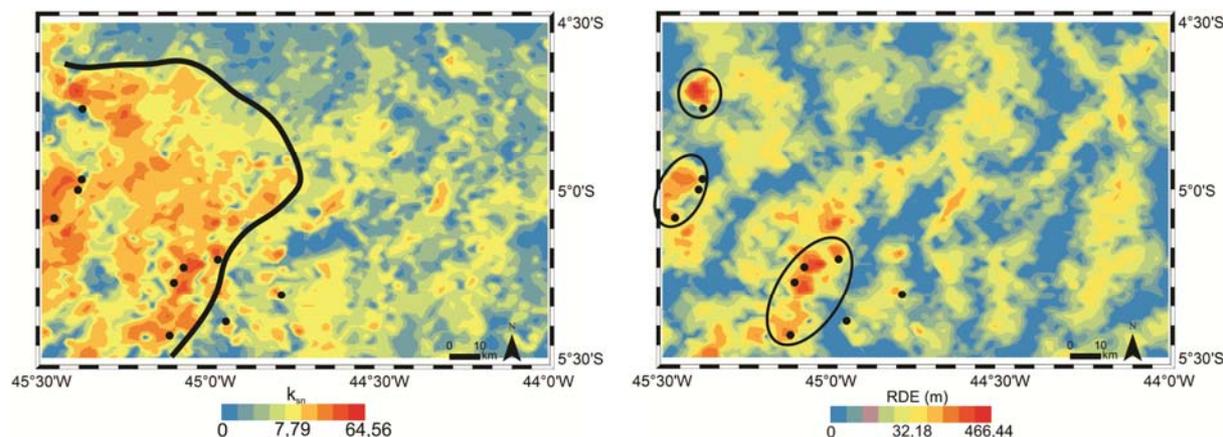


Figura 5. a) mapa da distribuição de k_{sn} com sobreposição de knickpoints (pontos pretos) e indicação da região com valores mais altos (linha preta); b) mapa de distribuição do RDE com sobreposição de knickpoints (pontos pretos) e indicação da região com mais alto valores (linha preta).

A influência de estruturas do embasamento sobre os rios da região investigada foi mostrada por Grohmann et al. (2001) por meio da análise conjunta de superfície de base e de mapas magnéticos. Mesmo as intrusões basálticas, que aparentemente influenciam o grupo G2 de knickpoints, são acomodadas por estruturas do embasamento. Além da reativação tectônica, a compactação diferencial controlada por estruturas em subsuperfície gera tensões verticais que se refletem nas coberturas sedimentares (Schumm et al., 2000), podendo ser responsável por algumas das citadas feições topográficas.

4. Conclusão

Múltiplos knickpoints e knickzonas foram identificados na região dos rios Mearim e Grajaú, Bacia do Parnaíba, a partir de uma nova abordagem automática baseada na detecção de mínimos e máximos relativos do gráfico de Distância-Declividade. A distribuição em superfície dos knickpoints mostra que a porção oeste da área investigada possui grau de incisão fluvial maior do que aquele na parte leste. Esta constatação também foi confirmada pelos índices geomorfométricos da declividade normalizada e da relação declividade-extensão. Além disso, feições topográficas são coincidentes com estruturas sotopostas à seção sedimentar. Este é o caso de aglomerados de knickpoints associados espacialmente com limites entre unidades do embasamento. Tais evidências sugerem que feições geológicas em subsuperfície modelam o relevo da região, seja por reativação tectônica ou por compactação diferencial.

Agradecimentos

Agradecemos à Petrobras pela autorização para publicação deste trabalho.

5. Referências bibliográficas

Bishop, P.; Goldrick, G. Geomorphological evolution of the East Australian continental margin. In: Summerfield, M.A. (Org.). **Geomorphology and Global Tectonics**. Chichester: Wiley, 2000, p. 227–255.

Bishop, P.; Hoey, T.B.; Jansen, J.D.; Artza, I.L. Knickpoint recession rate and catchment area: the case of uplifted rivers in eastern Scotland. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 30, n. 6, p. 767–778, 2005.

Blakely, R.J. **Potential theory in gravity and magnetic applications**. New York: Cambridge University Press, 1996. 445 p.

CPRM-Serviço Geológico do Brasil. **Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo: sistema de informações geográfica – SIG**. Brasília: CPRM, 2004. 41 CD Roms.

Gonga-Saholiariliva, N.; Gunnell, Y.; Harbor, D.; Mering, C. An automated method for producing synoptic regional maps of river gradient variation: Procedure, accuracy tests, and comparison with other knickpoint mapping methods. **Geomorphology**, v. 134, n.3-4, p. 394-407, 2011.

Guedes, I.C.; Etchebehere, M.L.C.; Morales, N.; Stevaux, J.C.; Santoni, G.C. Análise morfotectônica da Bacia do Rio Santo Anastácio, SP, através de parâmetros fluviomorfométricos e de registros paleossísmicos. **Geociências**, v. 28, n. 4, p. 247-362, 2009.

Grohmann, C.H.; Riccomini, C.; Chamani, M.A.C. Regional scale analysis of landform configuration with base-level (isobase) maps. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 15, p. 1493-1504, 2011.

Hack, J.T. Stream-profile analysis and stream-gradient index. **U.S. Geological Survey Journal of Research**, v. 1, n. 4, p. 421-429, 1973.

Hall, L.; Fry, N.; Sandow, J. **Parnaíba Basin structural GIS and SEEBASE™ Projec.** Confidential Report to Devon Energy International by Frog Tech Pty Ltd. 2009. 168 p.

Hayakawa, Y.S.; Oguchi, T. DEM-based identification of fluvial knickzones and its application to Japanese mountain rivers. **Geomorphology**, v. 78, n. 1-2, p. 90-106. 2006.

Jenson, S.K.; Domingue, J.O. Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 54, n. 11, p. 1593-1600, 1988.

Phillips, J.D.; McCormack, S.; Duan, J.; Russo, J.P.; Schumacher, A.M.; Tripathi, G.N.; Brockman, R.B.; Mays, A.B.; Pulugurtha, S. Origin and interpretation of knickpoints in the Big South Fork River Basin, Kentucky-Tennessee. **Geomorphology**, v. 114, n. 3, p. 188-198, 2010.

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

Reed, J.C. Disequilibrium profile of the Potomac River near Washington, DC – a result of lowered base level or Quaternary tectonics along the Fall Line. **Geology**, v. 9, n. 10, p. 445-450, 1981.

Schumm, S.A.; Dumont, J.F.; Holbrook, J.M. **Active Tectonics and Alluvial Rivers**. New York: Cambridge, 2000. 276 p.

Seidl, M.A.; Weissel, J.K.; Pratson, L.F. The kinematics and pattern of escarpment retreat across the rifted continental margin of SE Australia. **Basin Research**, v. 8, n. 3, p. 301-316, 1996.

Shahzad, F.; Mahmood, S.A.; Gloaguen, R. Drainage Network and Lineament Analysis: An Approach for Potwar Plateau (Northern Pakistan). **Journal of Mountain Science**, v. 6, n. 1, p. 14-24, 2009.

Snyder, N.P.; Whipple, K.X.; Tucker, G.E.; Merritts, D.J. Landscape response to tectonic forcing: digital elevation model analysis of stream profiles in the Mendocino Triple Junction Region, northern California. **Bulletin of the Geological Society of America**, v. 112, n. 8, p. 1250-1263, 2000.

Veneziano, D.; Niemann, J.D. Self-similarity and multifractality of fluvial erosion topography: Scaling properties. **Water Resources Research**, v. 36, n. 7, p. 1937-1951, 2000.

Wobus, C.; Whipple, K.X.; Kirby, E.; Snyder, N.; Johnson, J.; Spyropolou, K.; Crosby, B.T.; Sheehan, D. Tectonics from topography: Procedures, promise and pitfalls. In: Willett, S.D.; Hovius, N.; Brandon, M.T.; Fisher, D.M. (Org.). **Tectonics, climate and landscape evolution**. GSA Special Paper, v. 398, p. 55-74, 2006.