

## Hipsometria derivada de MDE-SRTM aplicada na distinção entre a Formação Barreiras e os Sedimentos Pós-Barreiras na Bacia Paraíba

Clódís de Oliveira Andrades Filho<sup>1</sup>  
Dilce de Fátima Rossetti<sup>1,2</sup>  
Hiran Zani<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidade de São Paulo - USP/IGc  
CEP 05508-080 – São Paulo - SP, Brasil  
andradesfilho@usp.br

<sup>2</sup> Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE  
Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil  
{rossetti, hzani}@dsr.inpe.br

**Abstract.** Techniques such as geomorphometry provide important contribution to geological mapping, particularly when integrated with field data. In this paper, we used hypsometry extracted from digital elevation model derived from the Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) aiming to distinguish the Barreiras Formation (Miocene) from the Post-Barreiras Sediments (late Quaternary) in the central part of Paraíba Basin, northeastern Brazil. The processing included automatic extraction of watershed boundaries. The polygons were superimposed with the geological map in order to select seven watershed samples representative of the studied units. Thus, a layer with elevation data, which is the basic data input for the hypsometric integral (Hi), was obtained for each basin. This information was extracted from cumulative frequency distribution, with altitudes based on a third degree polynomial. The observed patterns are directly associated with the absolute age of the geological unit. Hence, convex curves and high Hi values in the Post-Barreiras Sediments reflect low influence of erosional processes, which is consistent with the late Quaternary age of these deposits, while the generally straight curves and low Hi values of the Barreiras Formation are related to its longer depositional time. Therefore, hypsometry might be an important morphometric variable to be explored aiming to distinguish the Barreiras Formation from the Post-Barreiras Sediments in northeastern Brazil.

**Palavras-chave:** hypsometric curve, hypsometric integral, DEM, geological mapping, Formação Barreiras, Sedimentos Pós-Barreiras, curva hipsométrica, integral hipsométrica, MDE, mapeamento geológico, Formação Barreiras, Sedimentos Pós-Barreiras.

### 1. Introdução

Em adição a dados geológicos gerados por observação direta (i.e., em campo) e indireta (i.e., métodos geofísicos), produtos de sensoriamento remoto vêm servindo de suporte ao mapeamento geológico. Imagens adquiridas por sensores ópticos são de larga aplicação em estudos geológicos de áreas áridas e semi-áridas (p.e., Gómez et al., 2005), porém seu uso é limitado em áreas tropicais úmidas, onde a cobertura vegetal e de nuvens é freqüente. Este é o caso do território brasileiro, onde radar de abertura sintética (SAR) tem tido melhor sucesso em aplicações geológicas (p.e., Paradella et al., 2005). Além de assinaturas mineralógicas, investigações utilizando imagens de radar buscam discriminar unidades geológicas por meio das características morfológicas dos terrenos a elas associadas. Este tipo de aplicação pode ser potencializado com o uso de radar interferométrico de abertura sintética-InSAR, que possibilita geração de modelos digitais de elevação (MDE). MDE's têm sido atualmente fundamentais na geração de informações do relevo a partir da geomorfometria (Valeriano e Albuquerque, 2010). Vários estudos têm demonstrado a aplicação de variáveis geomorfométricas extraídas a partir de MDE's para discriminação de unidades geológicas (p.e., Chorowicz et al., 1989; Miliarensis et al., 2009; Prima e Yoshida, 2010). Estes estudos têm sido recentemente impulsionados pela ampla distribuição de dados topográficos digitais, como os modelos interferométricos derivados da missão SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) (Rabus et al., 2003).

Dentre as variáveis geomorfométricas locais, a curva hipsométrica e a integral hipsométrica têm sido enfatizadas para discriminar terrenos com diferentes graus de maturidade (Strahler, 1952; Schumm, 1956), o que pode ter correspondência com unidades com características litológicas e/ou cronológicas distintas. Desta forma, variáveis geomorfométricas podem auxiliar a ampliar o mapeamento geológico, diminuindo custos com investigações diretas.

O objetivo deste trabalho é testar a aplicação de variáveis hipsométricas extraídas do MDE-SRTM na discriminação entre a Formação Barreiras e Sedimentos Pós-Barreiras. Estas unidades geológicas ocorrem ao longo de uma extensa faixa da margem brasileira. Vários estudos têm apresentado critérios sedimentológicos e cronológicos que permitem discriminar estas unidades sedimentares. Entretanto, seu mapeamento é ainda problemático, tarefa que requererá, ainda, esforços adicionais no futuro. A Bacia Paraíba foi escolhida para o presente teste, uma vez que esta área foi foco de recente análise detalhada destas unidades sedimentares (p.e., Andrades Filho, 2010; Rossetti et al., 2011).

## 2. Área de Estudo

A área de estudo está localizada na Bacia Paraíba, que abrange partes dos estados da Paraíba e Pernambuco (Figura 1).



Figura 1. Localização da área de estudo na Bacia Paraíba.

A maior parte desta bacia é representada em superfície pela Formação Barreiras (Mioceno) e pelos Sedimentos Pós-Barreiras (Quaternário tardio). A Formação Barreiras inclui arenitos e argilitos intercamadados a conglomerados, formando sucessão estratificada ou maciça, que recobre discordantemente o embasamento cristalino pré-cambriano e demais formações rochosas sedimentares cretáceas e paleógenas. Os Sedimentos Pós-Barreiras assentam-se sobre a Formação Barreiras ou diretamente sobre o embasamento cristalino, sendo constituída principalmente por sedimentos arenosos e, subordinadamente, argilosos, maciços ou estratificados.

### 3. Fundamentação

A curva hipsométrica é a representação gráfica do relevo em duas dimensões, que resume as relações de área e elevação de determinada bacia hidrográfica (Figura 2A). A curva hipsométrica pode ser extraída com base na intersecção de planos horizontais com o modelo digital de elevação, onde a representação do terreno está em três dimensões, calculando-se as áreas acima de cada plano de elevação. Uma vez obtida a curva hipsométrica, torna-se possível o cálculo do índice de sua integral ( $Hi$ ), representada pela área sob a curva. Esta variável reproduz a frequência acumulada das altitudes em uma determinada bacia hidrográfica (Strahler, 1952; Schumm, 1956).

A partir da análise conjunta da curva e integral hipsométrica, é possível inferir a porção da bacia hidrográfica ainda não afetada por processos erosivos (Ohmori, 1993). Estas informações podem ser obtidas através da aplicação de equações (Pérez Peña et al., 2009) de forma a auxiliar no reconhecimento do estágio evolutivo do terreno (Figura 2B). Além disso, estas informações permitem investigação sobre os principais processos impressos no relevo em tempos recentes, a partir de análises comparativas entre bacias hidrográficas (p.e., Andrades Filho, 2010). De forma geral, curvas hipsométricas convexas sugerem terrenos com baixo grau de dissecação, que têm potencial de serem mais jovens. Por outro lado, curvas hipsométricas retilíneas a côncavas sugerem terrenos com maior exposição temporal a efeitos erosivos e, portanto, com potencial de serem mais antigos (Figura 2B). O índice  $Hi$  é reproduzido a partir de valor absoluto por unidade de bacia hidrográfica, sendo que valores próximos de 1 correspondem a terrenos mais jovens e valores próximos de 0 a terrenos mais antigos. Cabe destacar que variações litológicas podem interferir na análise hipsométrica devido ao diferente grau de resistência dos tipos litológicos à erosão.

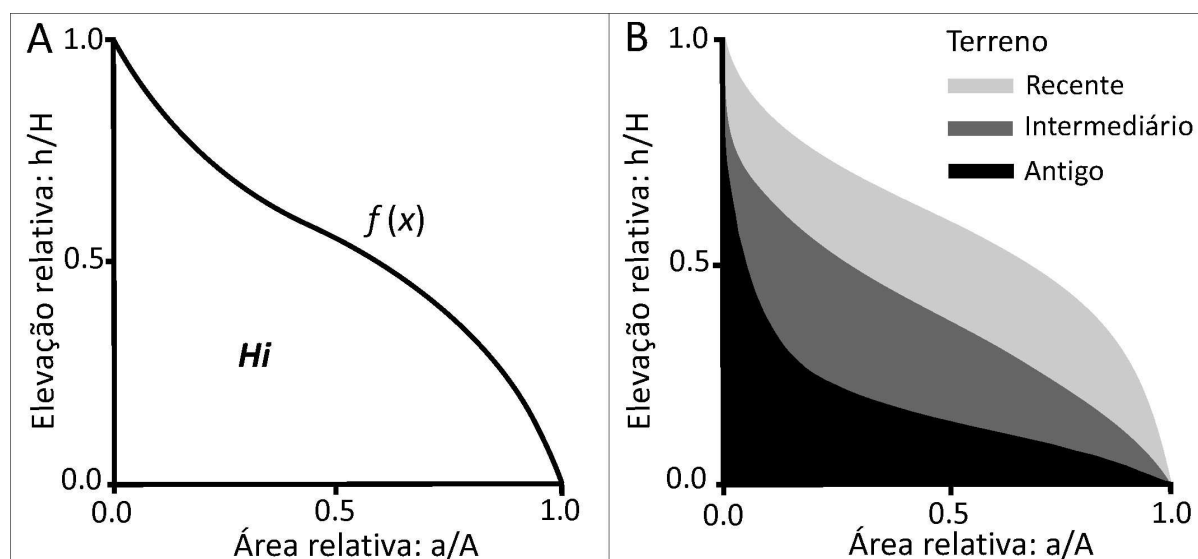


Figura 2. Representação gráfica de curvas hipsométricas. (A) Curva hipsométrica representada graficamente por uma função  $f(x)$  (Strahler, 1952), onde  $Hi$  é a parcela sob a curva que reproduz a integral hipsométrica (elevação total  $H$  do terreno=elevação máxima menos a mínima,  $A$ =área superficial total da bacia, e a superfície sobre determinada elevação  $h$ ). (B) Modelos teóricos de curvas hipsométricas (adaptado de Ohmri, 1993), segundo estágios de maturidade do terreno.

### 4. Material

Os dados de sensoriamento remoto utilizados neste trabalho são provenientes da missão SRTM na 4ª versão (Jarvis et al., 2008). Os dados estão disponibilizados no espaçamento de pixel de 3 segundos de arco (~90m) e constituem a última versão apresentada, resultante da

aplicação de novos algoritmos de interpolação e modelos digitais de elevação auxiliares, no intuito de corrigir falhas/artefatos presentes nos dados disponibilizados nas versões anteriores.

Além dos dados de elevação, o trabalho está apoiado no mapeamento geológico apresentado por Rossetti et al. (2011) fundamentado por reconhecimento de campo e datações absolutas por luminescência opticamente estimulada (LOE) de sedimentos quaternários tardios da Bacia Paraíba (Figura 3).

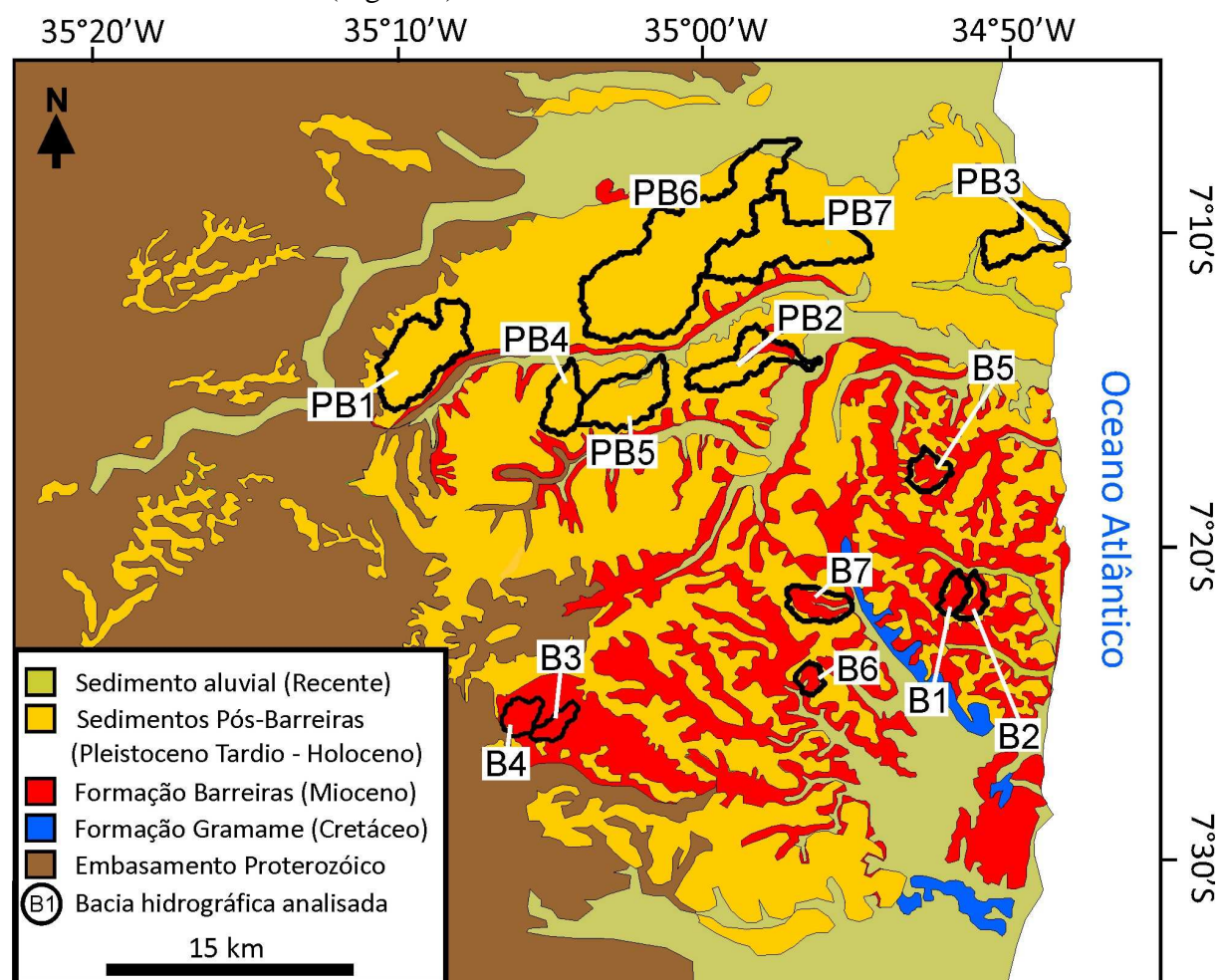


Figura 3. Mapa geológico da porção central da Bacia Paraíba (adaptado de Rossetti et al., 2011).

## 5. Método

O primeiro procedimento para obtenção da curva e integral hipsométricas consistiu na demarcação de bacias hidrográficas representativas de cada unidade geológica (i.e., Barreiras ou Pós-Barreiras – Figura 3). As bacias referentes à Formação Barreiras foram codificadas pela letra B e os Sedimentos Pós-Barreiras por PB. Foram extraídos polígonos referentes às bacias hidrográficas com base no MDE a partir de comandos efetuados no ArcHydro – ArcGIS 9.3. Testes foram realizados até que o limite da menor bacia hidrográfica amostral fosse definido em uma área correspondente a 300 pixels. Foram selecionadas quatorze bacias hidrográficas (Figura 3), sendo sete delas referentes à Formação Barreiras e as demais correspondentes aos Sedimentos Pós-Barreiras.

O MDE foi, então, recortado a partir dos polígonos referentes às bacias. Desta forma, foi obtido um plano de informação com os dados de elevação de cada bacia hidrográfica, sendo cada arquivo convertido para formato de texto tabular (x, y, z) e importados em planilha eletrônica Excel 2007. Assim, foram elaborados gráficos univariados representando as

frequências acumuladas das altitudes, confeccionados somente com a coluna z. Em seguida, aplicou-se transformação linear nos eixos x e y para reajustar os valores de 0 a 1, de forma a compatibilizar comparações entre as curvas hipsométricas geradas.

A extração dos parâmetros quantitativos que descrevem a curva hipsométrica foi fundamentada na proposta de Harlin (1978), que pressupõe a aproximação das frequências acumuladas por um polinômio de 3º grau com base na Equação 1:

$$f(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 \quad (1)$$

A regressão da curva hipsométrica permite a extração dos coeficientes  $a_x$ , utilizados na integração da área (A) sob a curva e definida pela Equação 2:

$$A = \int_0^1 a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 f(x) dx \quad (2)$$

Assim, o primeiro momento de  $f(x)$ , referente ao eixo x e que representa o centróide da função  $Hi$ , foi definido com a Equação 3:

$$Hi = \frac{1}{A} \int_0^1 x f(x) dx \quad (3)$$

Extraídas as informações básicas, as análises e interpretações se deram a partir da avaliação comparativa das formas das curvas hipsométricas representativas das unidades geológicas, e do valor da integral hipsométrica  $Hi$  correspondente a cada bacia hidrográfica amostral.

## 6. Resultados e Discussão

A manipulação dos dados quantitativos foi eficaz para geração da curva e integral hipsométricas da totalidade de bacias hidrográficas amostradas (Figura 4). As curvas hipsométricas revelam formas diferentes para as unidades geológicas consideradas. Assim, as curvas derivadas na Formação Barreiras, isto é, B1 a B7 (Figura 4A), têm tendência à retilinidade, sendo que as amostras B1 a B4 apresentam concavidades sutis e B5 a B7 ligeira convexidade. Por outro lado, as curvas derivadas nos Sedimentos Pós-Barreiras, i.e., PB1 a PB7 (Figura 4B), são tipicamente convexas.

Quando realizada uma comparação das formas das curvas hipsométricas das bacias hidrográficas correspondentes a unidade Barreiras (Figura 4A) e Pós-Barreiras (Figura 4B) fica evidente a distinção entre estes dois conjuntos. A distinção está caracterizada pela expressiva convexidade das curvas correspondentes a unidade dos sedimentos quaternários em relação e a unidade miocena. A sobreposição da totalidade de curvas obtidas (Figura 5A) assinala a discriminação destas, manifestando nítida separação entre os dois conjuntos de dados.

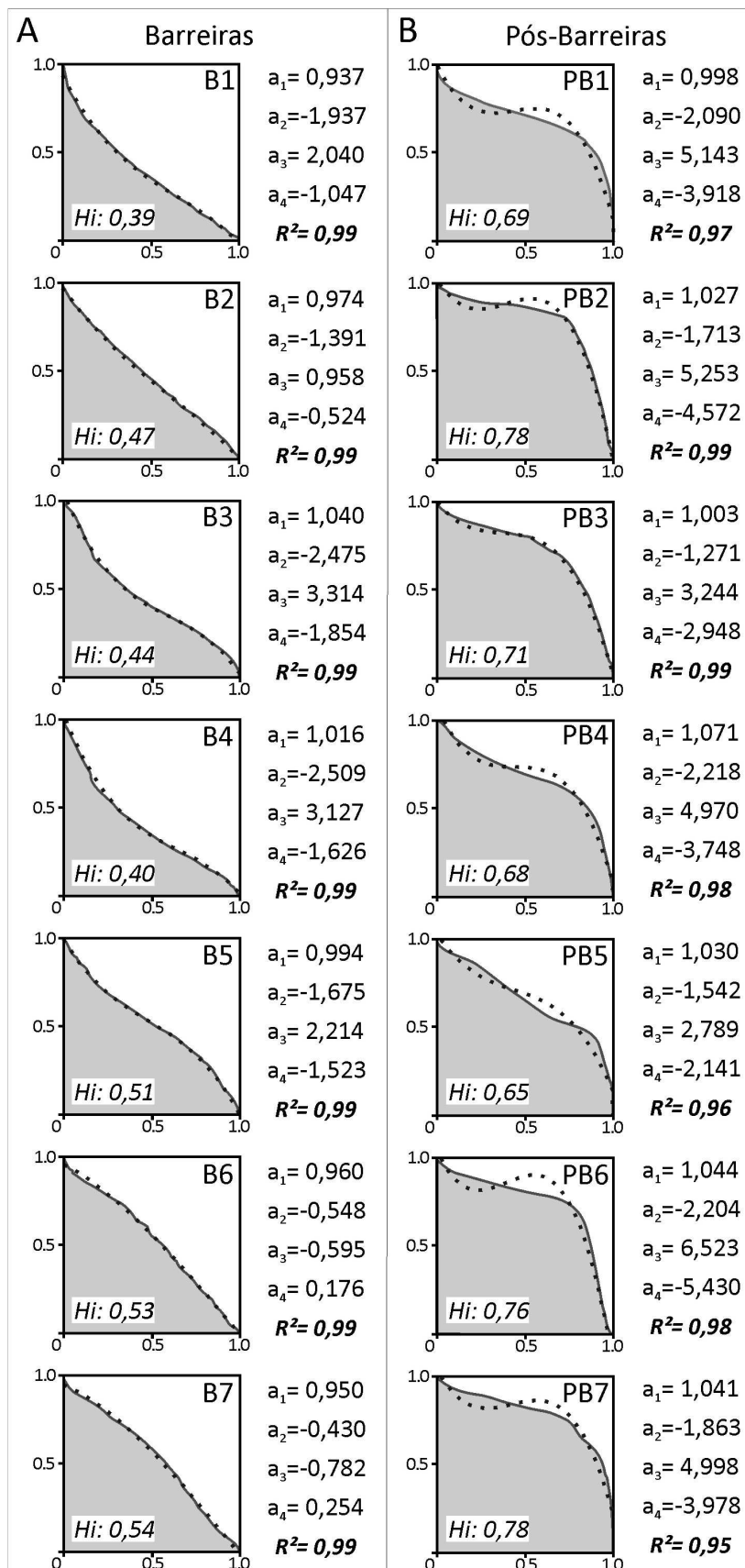


Figura 4. Curvas hipsométricas (linha sólida e preenchimento cinza) modeladas por polinômio de 3° grau ( $f(x) = a_1 + a_2x + a_3x^2 + a_4x^3$ ), representadas por linha pontilhada. A elevação relativa está expressa no eixo y e a área relativa no eixo x. (A) Bacias hidrográficas (B1-B7) na Formação Barreiras. (B) Bacias hidrográficas (PB1-PB7) nos Sedimentos Pós-Barreiras.

Assim como as curvas, os valores da integral hipsométrica também são similares entre bacias de uma mesma unidade geológica (Figura 4), ao mesmo tempo em que diferem dos valores referentes às bacias presentes na outra unidade analisada (Figura 5B). Na Formação Barreiras, os valores de  $H_i$  variam de 0,39 a 0,54 (média de 0,47), enquanto nos Sedimentos Pós-Barreiras estes valores variam 0,65 e 0,78 (média de 0,72). Desta forma, são evidentes dois agrupamentos de valores sem justaposição (Figura 5B), sugerindo, a partir desta amostras, assinaturas hipsométricas da formação sedimentar miocena da cobertura quaternária.

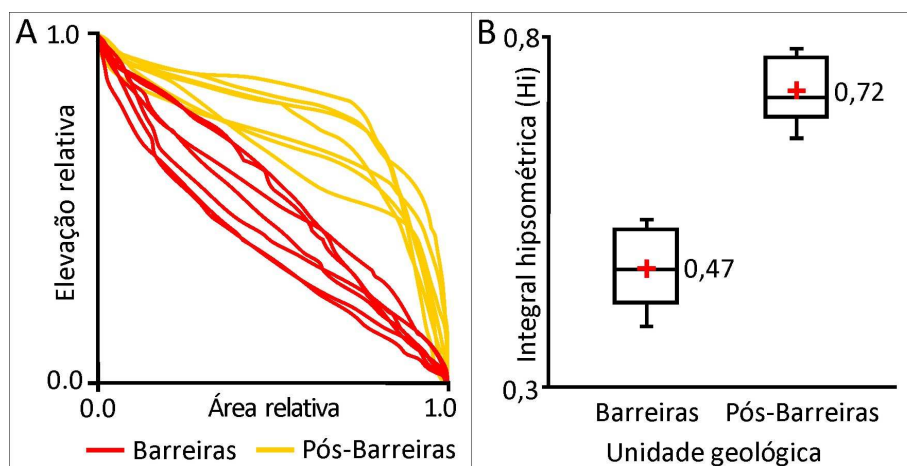


Figura 5. (A) Resumo das informações hipsométricas obtidas para as bacias hidrográficas analisadas nas duas unidades geológicas hipsométricas (A). (B) Distribuição dos valores de  $H_i$  reproduzidas em gráfico do tipo *box plots* para as duas unidades geológicas analisada. A cruz vermelha indica a média e o traço preto horizontal indica a mediana.

Os resultados derivados da curva e integral hipsométricas são consistentes com a idade mais jovem dos Sedimentos Pós-Barreiras. Esta interpretação é condizente com os critérios de determinação do grau de maturidade do terreno apresentado por Strahler (1952) e Schumm (1956), uma vez que ambas as unidades geológicas analisadas mostram similaridades litológicas. Valores de  $H_i$  mais elevados e curvas tipicamente convexas nos Sedimentos Pós-Barreiras refletem terrenos pouco ou não dissecados e com baixo grau de maturidade, que são características concordantes com a idade quaternária desses depósitos. Por outro lado, curvas mais retilíneas a suavemente côncavas e com maiores valores de  $H_i$  na Formação Barreiras refletem terrenos relativamente mais dissecados, o que condiz com sua idade mais antiga, i.e., miocena, relativamente aos Sedimentos Pós-Barreiras.

## 7. Conclusão

Os dados geomorfométricos referentes à curva e integral hipsométricas extraídas de MDE-SRTM se constituem em parâmetros de grande significado na distinção entre a Formação Barreiras e os Sedimentos Pós-Barreiras na Bacia Paraíba. Características que distinguem as duas unidades geológicas incluem a maior convexidade da curva hipsométrica e valores de  $H_i$  mais elevados nas amostras sobre os Sedimentos Pós-Barreiras relativamente à Formação Barreiras. Portanto, a variável hipsométrica tem grande potencial de auxiliar no mapeamento dessas unidades geológicas ao longo da costa brasileira.

## Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPESP, pelo auxílio à pesquisa (Projeto # FAPESP#06/04687-7) e pela concessão da bolsa de doutorado ao primeiro e terceiro autores, e ao CNPq, pela concessão de bolsa de produtividade em pesquisa à segunda autora.

## Referências Bibliográficas

- Andrades Filho, C. O. Análise morfoestrutural da porção central da Bacia Paraíba (PB) a partir de dados MDE-SRTM e ALOS-PALSAR FBD. 2010. 173 p. (INPE-16717-TDI/1655). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2010.
- Chorowicz, J.; Kim J.; Manoussis, S.; Rudant, J.; Foin, P.; Veillet, I. A new technique for recognition of geological and geomorphological patterns in digital terrain models. **Remote Sensing of Environment**, v. 29, n. 3, p. 229–239, 1989.
- Gomez, C.; Delacourt, C.; Allemand, P., Ledru, P., Wackerle, R. Using ASTER remote sensing data set for geological mapping, in Namibia. **Physics and Chemistry of the Earth**, v. 30, n 1-3, p. 97-108, 2005.
- Harlin, J.M. Statistical moments of the hypsometric curve and its density function. **Mathematical Geology**, v. 10, n. 1, p. 59-72, 1978.
- Jarvis, A.; H.I. Reuter, A.; Nelson, E.; Guevara. Hole-filled SRTM for the globe Version 4, available from the CGIAR-CSI SRTM 90m Database: <http://srtm.csi.cgiar.org>, 2008.
- Leverington, D.W. Discrimination of sedimentary lithologies using Hyperion and Landsat Thematic Mapper data: a case study at Melville Island, Canadian High Arctic. **International Journal of Remote Sensing**, v. 31, n. 1, p. 233-260, 2010.
- Lowe, J.J.; Walker, M.J.C. **Reconstructing Quaternary Environments**. New Jersey: Prentice Hall, 1997. 472 p.
- Mabesoone, J.M.; Campos-Silva, A.; Buerlen, K. Estratigrafia e origem do Grupo Barreiras em Pernambuco, Paraíba e Rio Grande do Norte. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 2, n. 3, p. 173-188, 1972.
- Miliareisis, C.G.; Ventura, G.; Vilaro, G. Terrain modelling of the complex volcanic terrain of Ischia Island, Italy. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 35, n. 4, p. 385-398, 2009.
- Ohmori, H. Changes in the hypsometric curve through mountain building resulting from concurrent tectonics and denudation. **Geomorphology**, v. 8, n. 4, p. 263–277, 1993.
- Paradella, W.R.; Santos, A.R.; Paulo, V.; Cunha, E.S.P. Radares Imageadores nas Geociências: Estado da Arte e Perspectivas. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 57, n. 1, p. 50-62, 2005.
- Pérez Peña, J.V.; Azañón, J. M.; Azor, A. CalHypso: an ArcGIS extension to calculate hypsometric curves and their statistical moments. Applications to drainage basin analysis in SE Spain. **Computers & Geosciences**, v. 35, n. 6, p. 1214–1223, 2009.
- Prima, O.D.A.; Yoshida, T. Characterization of volcanic geomorphology and geology by slope and topographic openness. **Geomorphology**, v. 118, n. 1-2, p. 22-32, 2010.
- Rabus, B.; Eineder, M.; Roty, A.; Bamler, R. The Shuttle Radar Topographic Mission: a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar. **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, v. 57, n. 4, p. 241-262, 2003.
- Rossetti, D.F.; Bezerra, F.H.R.; Góes, A.M.; Valeriano, M.M.; Andrades Filho, C.O.; Mittani, J.C.R.; Tatumi, S.H.; Brito Neves, B.B. Late Quaternary sedimentation in the Paraíba Basin, Northeastern Brazil: implications for the interplay among landform, sea level and tectonics in Eastern South America passive margin. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, 2011 (no prelo).
- Schumm, S.A. Evolution of drainage systems and slopes badlands or Perth Amboy. **Geological Society of America Bulletin**, v. 67, n. 5, p. 597-646, 1956.
- Strahler, A. N. Hypsometric (area-altitude) analysis and erosional topography. **Geological Society of America Bulletin**, v.63, n. 10, p. 1117-1142, 1952.
- Valeriano, M.M.; Albuquerque, P.C.G. TOPODATA: processamento dos dados SRTM. São José dos Campos: INPE, 2010. 79 p. INPE-16702-RPQ/854).