

CRONOLOGIA RELATIVA DE EVENTOS DEPOSICIONAIS NO MEGALEQUE DO RIO TAQUARI REVELADA POR HIPSOMETRIA

Clódis de Oliveira Andrades Filho

Doutor em Geociências (USP)

Professor da Universidade Estadual do Rio Grande do Sul

E-mail: clodis-filho@uergs.edu.br

Hiran Zani

Doutor em Sensoriamento Remoto (INPE)

Cientista de Dados da Bayer

E-mail: hiranzani@gmail.com

Bárbara Maria Giacom Ribeiro

Mestre em Sensoriamento Remoto (INPE)

Doutoranda em Planejamento Urbano e Regional (UFRGS)

E-mail: barbara.giacom@ufrgs.br

RESUMO

Este estudo apresenta a aplicação da curva e da integral hipsométricas (H_i) como forma de análise e interpretação cronológica e evolutiva dos lobos deposicionais do megaleque do Taquari, no Pantanal brasileiro. A curva e a integral hipsométricas são informações capazes de promover a representação quantitativa e gráfica da superfície do terreno, parâmetros que são utilizados como indicadores de diferentes estágios evolutivos do relevo. Como bases nestas análises, foram utilizados os dados de elevação obtidos na missão SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*). Estes dados foram processados nos aplicativos ArcGIS e Excel, de forma a obter as informações de curva e integral hipsométricas e de altura do relevo para o conjunto de lobos deposicionais que constituem os compartimentos da morfologia de leque estudada. Os resultados indicam que quanto maior a concavidade das curvas hipsométricas e menor o valor de H_i , mais recentes são as morfologias dos lobos deposicionais. Esta relação também foi observada a partir do grau de dissecação da superfície expresso na variável morfométrica de altura do relevo. Neste sentido, conclui-se que as informações hipsométricas apresentam relação com a cronologia da sedimentação dos lobos deposicionais, confirmando a validade do modelo evolutivo atualmente sugerido para o megaleque do Taquari.

PALAVRAS-CHAVE: integral hipsométrica, curva hipsométrica, modelo digital de elevação, geomorfometria, megaleque, Quaternário.

DEPOSITIONAL EVENTS RELATIVE CHRONOLOGY IN THE TAQUARI RIVER MEGAFAN REVEALED BY HYPSONOMETRY

ABSTRACT

This study presents the application of the hypsometric curve and integral (H_i) as an instrument to analyze and interpret the chronology and evolution of the depositional lobes on Taquari megafan (Pantanal, Brazil). The hypsometric curve and integral are able to represent the relief in a quantitative and graphical way; these parameters are used as indicators of different geomorphological evolutionary stages. The elevation dataset was obtained from the SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), processed in ArcGIS and Excel software, in order to obtain the hypsometric curve and the quantitative parameters to describe each depositional lobe. The next step was the extraction of relief height, to assist the hypsometry analysis and to compare with lobes age. The results suggest that the greater the concavity of the hypsometric curves and the lower the value

of *Hi*, the younger are the morphologies of depositional lobes. This relationship was also observed from the dissection degree of the surface, expressed by the relief height morphometric variable. We conclude that the hypsometric information is closely related with the relative chronology age of the depositional lobes, confirming the validity of the current evolutionary model adopted for Taquari megafan.

KEYWORDS: hypsometric integral, hypsometric curve, digital elevation model, geomorphometry, megafan, Quaternary.

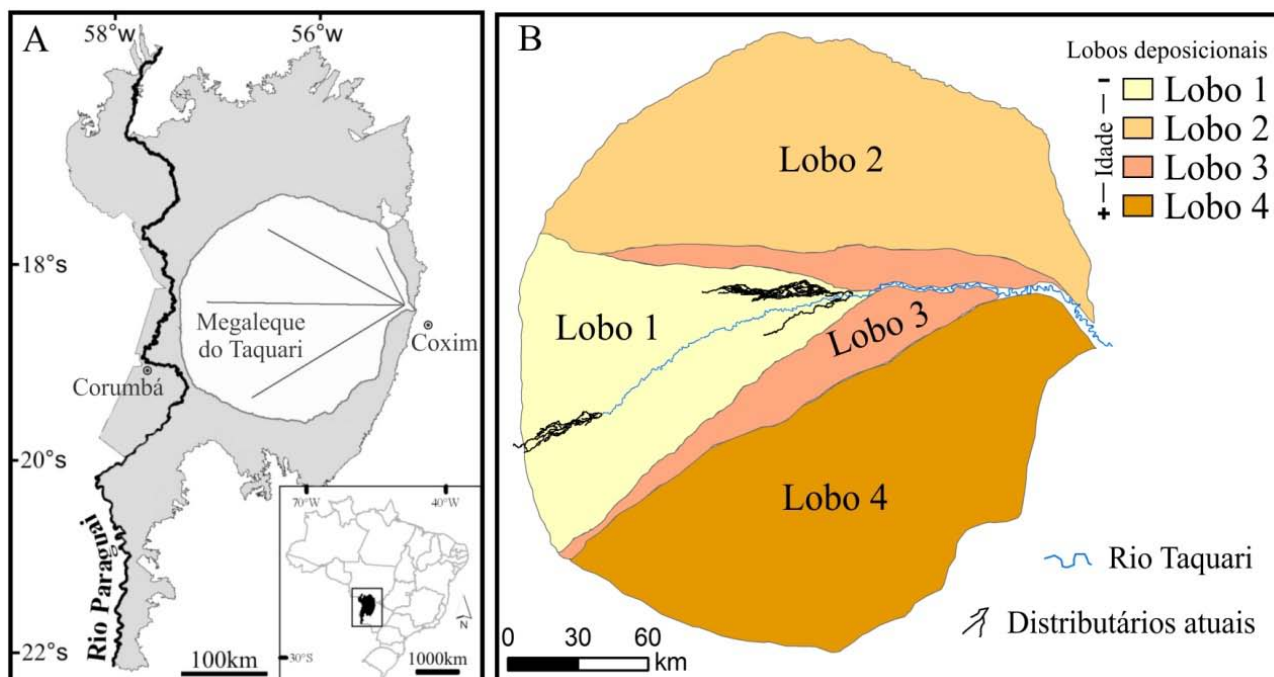
INTRODUÇÃO

Sistemas de megaleques são caracterizados por depósitos clásticos que superam 1.000 km² de extensão superficial (HORTON; DECELLES, 2001). Segundo Gohan e Parkash (1990), este tipo de feição ocorre somente em condições ambientais específicas, nas regiões com capacidade de fornecer e acomodar grandes volumes de sedimentos. Assim, Horton e DeCelles (2001) postularam que o contexto geotectônico ideal para o desenvolvimento de megaleques é encontrado em bacias do tipo *foreland*, que são depressões tectonicamente ativas adjacentes às cadeias de montanhas. Além do Pantanal, exemplos clássicos de megaleques que se desenvolvem em bacias *foreland* são encontrados nas planícies do Ganges–Brahmaputra na Índia e no Chaco Sul–Americano. Este tipo de feição tem chamado atenção da comunidade científica devido às características peculiares destes ambientes, com frequentes mudanças dos cursos fluviais por processos de avulsão. A região do Pantanal é marcada pela ocorrência de diversos sistemas de megaleques (ASSINE; SOARES, 2004), sendo o megaleque do rio Taquari o mais notável com extensão de 50.000 km² (ASSINE, 2005; ZANI et al., 2012). O conhecimento detalhado dos processos responsáveis por sua gênese é de grande importância para a elaboração de modelos preditivos sobre mudanças futuras.

Adicionalmente aos dados geológicos e geomorfológicos gerados por observação direta (i.e., trabalho de campo) e indireta (i.e., métodos geofísicos), produtos de sensoriamento remoto vêm servindo de suporte a investigação geomorfológica. Imagens adquiridas por sensores ópticos são de ampla aplicação em estudos geomorfológicos de regiões áridas e semiáridas (e.g., GÓMEZ et al., 2005), porém seu uso apresenta limitações em áreas tropicais úmidas, onde a cobertura vegetal e de nuvens é frequente. Este é o caso do território brasileiro, onde radar de abertura sintética (SAR) tem tido sucesso em aplicações geomorfológicas (e.g., PARADELLA et al., 2005). Além de assinaturas mineralógicas, investigações utilizando imagens de radar buscam discriminar e entender a evolução de unidades geológicas e geomorfológicas por meio das características topográficas dos terrenos a elas associadas. Este tipo de aplicação pode ser potencializada 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. A disponibilidade de bases de dados remotos oferecidos de forma gratuita na internet aos usuários tem impulsionado a identificação de novos sistemas deposicionais, especialmente macro formas como os megaleques (e.g., BLECHSCHMIDT et al., 2009; CHAKRABORTY; GHOSH, 2010; HARTLEY et al., 2010), além do mapeamento mais detalhado dos megaleques já conhecidos (e.g., MCCARTHY et al., 2005; ZANI et al., 2009b; CHAKRABORTY et al., 2010). No entanto, os poucos modelos existentes que explicam a dinâmica destas feições são excessivamente qualitativos e generalizados (e.g., GUPTA, 1997; HORTON; DECELLES, 2001). O conhecimento detalhado destes sistemas é de grande importância para subsidiar políticas de planejamento regional, a fim de evitar tragédias como a ocorrida recentemente no megaleque do Kosi na Índia, onde uma mudança de grande magnitude do rio principal afetou mais de 30 milhões de pessoas (SINHA, 2009). Neste sentido, Assine (2005) demonstrou que o megaleque do Taquari no Pantanal (**Figura 1A**) fornece uma oportunidade ímpar de se estudar este tipo de sistema, pois: (1) possui uma rede de paleocanais bem preservada; e (2) ausência de obras de engenharia de grande porte para controle da drenagem. O autor supracitado propôs um modelo que detalha a cronologia das sucessivas construções e abandonos dos lobos deposicionais, que compõe o megaleque (**Figura 1B**). Neste, a porção sul do megaleque, que constitui o Pantanal da Nhecolândia (i.e., Lobo 4), seria formada pelos eventos de sedimentação mais antigos, seguido do Lobo 3, cinturão de meandros, quase totalmente superposto pelo lobo atual (i.e., Lobo 1). Já a porção norte, Pantanal de Paiaguás (i.e., Lobo 2), foi formada por processos posteriores ao início do megaleque e que anteciparam a formação do lobo atual.

Figura 1 – (A) Localização do megaleque do Taquari no Pantanal; (B) cronologia dos lobos deposicionais que formaram o megaleque, segundo o modelo de Assine (2005).



Fonte: adaptado de Assine (2005)

Técnicas de geomorfologia são fundamentais neste tipo de análise, fornecendo dados que auxiliam na compreensão da evolução da paisagem. Neste sentido destaca-se a aplicação do conceito da integral hipsométrica (STRAHLER, 1952), que permite identificar a cronologia relativa do terreno com base na topografia. Dois elementos conceituais são fundamentais na análise hipsométrica, a curva hipsométrica, que é uma forma de representação gráfica do relevo, e a integral hipsométrica (Hi), representada pela área do gráfico sob a curva hipsométrica. A integral hipsométrica é um índice que descreve a frequência acumulada das altitudes de uma determinada área do terreno (STRAHLER, 1952). A partir desta informação, o índice Hi pode representar determinada porção do terreno que ainda não esteve sujeita a processos erosivos, configurando-se como indicador de diferentes estágios evolutivos (PÉREZ-PEÑA et al., 2009). Um modelo que segmenta o megaleque do rio Taquari em diversos compartimentos, os quais refletem os sucessivos eventos deposicionais que formaram este depósito, foi proposto por Assine (2005). Neste contexto, o presente artigo propõe-se a testar a hipótese central do modelo elaborado por Assine (2005), que, através da interpretação visual dos paleocanais, identificou as idades relativas dos eventos deposicionais que formaram o megaleque do Taquari. O objetivo deste trabalho é verificar a correspondência entre curvas hipsométricas e a cronologia dos lobos deposicionais que formaram o megaleque Taquari.

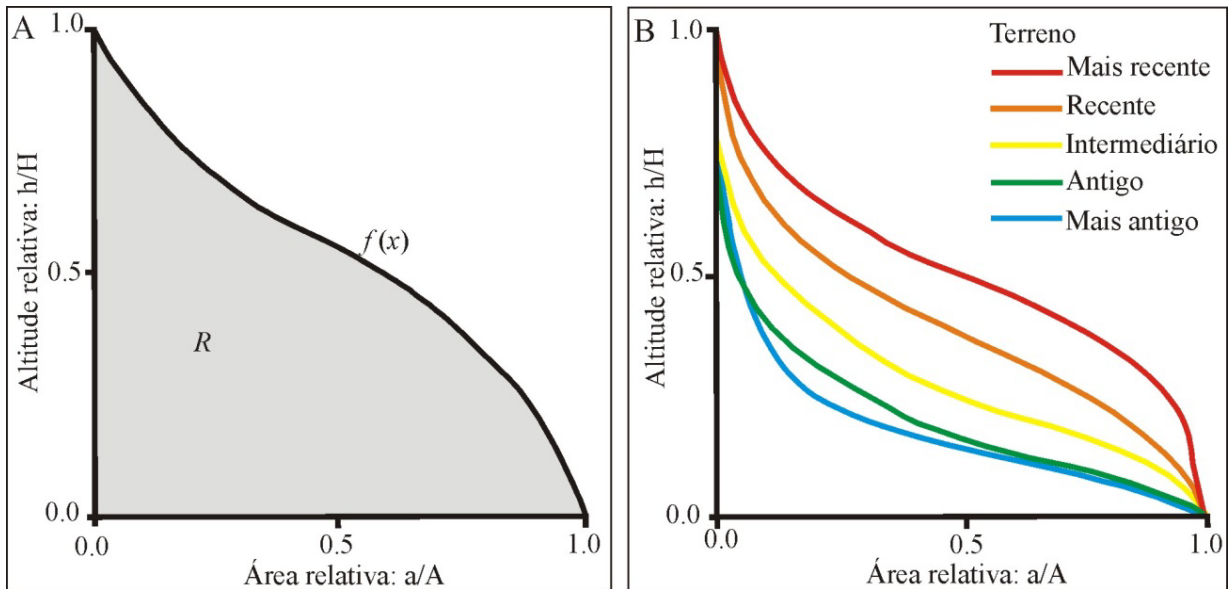
CURVA E INTEGRAL HIPSOMÉTRICA

Métodos quantitativos, a partir do emprego de índices geomorfométricos, têm sido sugeridos na análise geomorfológica em diversos contextos geológico–geomorfológicos (e.g., BULL; McFADDEN, 1977; EL HAMDOUNI et al., 2008; ETCHEBEHERE et al., 2006; KELLER; PINTER, 2002; TROIANI; DELLA SETA, 2008).

A integral hipsométrica é um índice geomorfométrico geralmente extraído para a unidade de bacia hidrográfica, o que não exclui a potencialidade de aplicação em outros recortes espaciais que permitem a avaliação do equilíbrio entre os processos erosivos e deposicionais que atuam em determinada porção da superfície. Para uma investigação geomorfológica adequada é necessário que a análise seja realizada tanto pela forma da curva hipsométrica como pelo valor de H_i obtido (OHMORI, 1993; PEDRERA et al., 2009), sendo esta abordagem muito aplicada em análises comparativas entre diferentes áreas (e.g., CHEN et al., 2003; EL HAMDOUNI et al., 2008; MASEK ET AL., 1994).

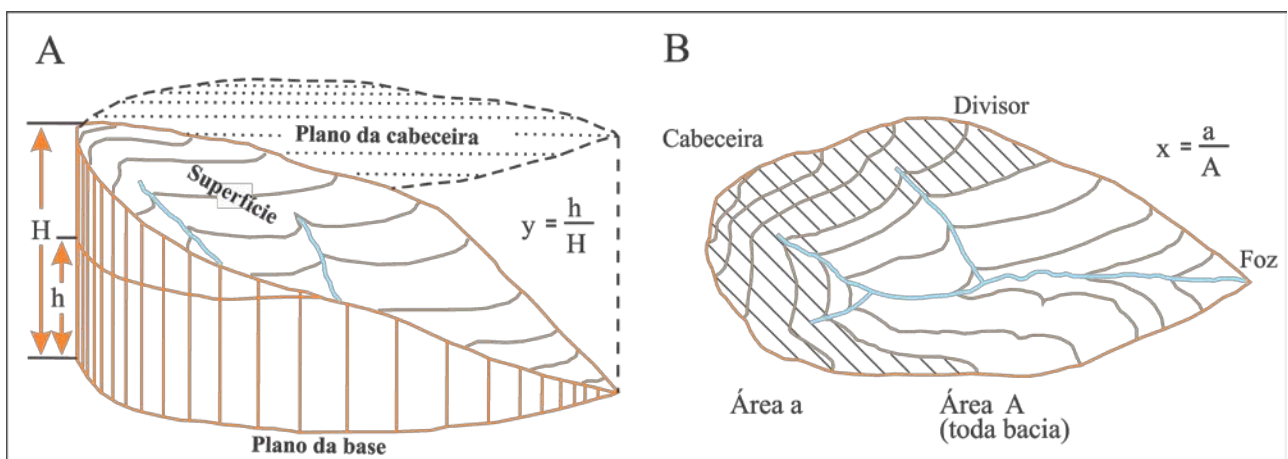
De modo geral, quando aplicadas à unidade de bacia hidrográfica, as formas convexa, côncavo–convexa ou retilínea, e côncava da curva hipsométrica indicam, respectivamente, baixo, médio e alto grau de dissecação do relevo (**Figura 2 e Figura 3**). No que diz respeito à integral hipsométrica, esta é analisada a partir do valor absoluto de H_i , devendo variar de 0 a 1, sendo que valores próximos a 0 sugerem uma área altamente erodida, enquanto valores próximos a 1 indicam terrenos pouco erodidos. Geralmente, valores do $H_i > 0,5$, entre 0,4 e 0,5 e $< 0,4$ geram curvas hipsométricas convexas, côncavo–convexas ou retilíneas, e côncavas, respectivamente. Além disto, as interpretações não devem excluir a possibilidade de influência de fatores litológicos nas formas obtidas de curvas hipsométricas e o valor de H_i , pois, variações litológicas podem gerar diferentes condições de resistência do terreno a processos erosivos o que dificulta análises de cunho comparativo e cronológico.

Figura 2 – (A) Representação de uma curva hipsométrica a partir da função $f(x)$ (segundo STRAHLER, 1952), onde R exprime a porção sob a curva, traduzindo a integral hipsométrica (elevação total H do terreno, que corresponde à elevação máxima menos a elevação mínima), A é a área superficial total da bacia, e área a corresponde à superfície acima de uma determinada elevação h ; (B) arquétipos teóricos de curvas hipsométricas (adaptado de OHMORI, 1993) segundo estágios de maturidade de determinado terreno, sendo que as curvas com maior convexidade indicam baixa maturidade e as curvas com maior concavidade indicam alta maturidade do terreno.



Fonte: adaptado de Strahler (1952)

Figura 3 – Representações dimensionais da análise hipsométrica como suporte à representação da **Figura 2**, onde (A) expressa as relações de altitude (h/H) em perfil de uma determinada bacia hidrográfica, e (B) representa um recorte horizontal expressando as relações de área (a/A) num dado plano horizontal da mesma bacia hidrográfica.



Fonte: adaptado de Strahler (1952).

MATERIAL E MÉTODOS

Os dados utilizados neste trabalho são oriundos da missão SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*; JARVIS et al., 2008) disponibilizados em sua quarta versão a partir do endereço eletrônico <http://srtm.csi.cgiar.org/>. Esta base de dados constitui a última versão disponibilizada e é resultante da aplicação de novos algoritmos de interpolação e modelos digitais de elevação (MDE's) auxiliares, conforme descrito por Reuter et al. (2007). Desenvolvida em parceria pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), o Centro Aeroespacial Alemão (DLR) e a Agência Espacial Italiana (ASI), a missão SRTM operou com um sistema RADAR (*Radio Detection And Ranging*) que, em fevereiro do ano 2000, obteve os dados para a geração de modelos digitais de elevação (MDE's) interferométricos para oitenta por cento do globo (RABUS et al, 2003). MDE consiste na representação de dados de elevação da superfície terrestre passíveis de tratamento em sistemas de informações geográficas (SIG). Os modelos interferométricos são obtidos por um sistema que possui dois pontos ligeiramente diferentes para a obtenção de dados de elevação da superfície. Na missão SRTM realizada a bordo da plataforma *Endeavour* foi instalada uma espécie de haste mecânica com sessenta metros de comprimento entre antenas correspondentes às bandas C e X. Inicialmente, o MDE para os Estados Unidos da América foi disponibilizado com espaçamento horizontal de 1 arco de segundo (~30 m) e, para o restante do mundo, de 3 arcos de segundo (~90 m), no entanto, a partir de setembro de 2014, foram disponibilizados, em outras regiões do planeta, o MDE com espaçamento de 1 arco de segundo. No MDE-SRTM, os valores de elevação (z) são expressos em metros inteiros, e o datum e o elipsoide de referência são WGS84, datum vertical EGM96. A acurácia vertical absoluta e relativa do MDE é de aproximadamente 16 m, e 6 m, respectivamente (RABUS et al., 2003). Neste conjunto de dados, além do MDE de 3 segundos de arco (~90m), também estão disponíveis dados reamostrados para 21 segundos de arco (~250m), os quais foram utilizados nesse trabalho.

O procedimento para a obtenção das curvas hipsométricas se iniciou com a importação do MDE-SRTM no aplicativo ArcGIS. Os polígonos que representam os lobos deposicionais do Taquari (**Figura 1**) foram utilizados como máscara, para extração individual das altitudes dos compartimentos. Assim, obteve-se quatro arquivos que foram convertidos para formato de texto tabular (x,y,z) e importados na planilha eletrônica Excel 2007. Finalmente, gráficos univariados representando as frequências acumuladas das altitudes foram confeccionados somente com a coluna z . Aplicou-se uma transformação linear nos eixos x e y para reajustar os valores de 0 a 1, a fim de se realizar comparações entre as curvas geradas.

Para extração dos parâmetros quantitativos que descrevem a curva da hipsométrica foi utilizada a abordagem proposta por Harlin (1978). Segundo este autor, as curvas das frequências acumuladas podem ser aproximadas por um polinômio do 3º grau:

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

Os coeficientes a_x são obtidos através da regressão da curva hipsométrica e utilizados na integração da área (A) que está abaixo da curva:

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

Assim, o primeiro momento de $f(x)$, referente ao eixo x e que representa o centróide da função (Hi), é definido através de:

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

Os valores de Hi variam de 0 a 1, e serão utilizados como índice descritivo da idade relativa dos lobos deposicionais. Estas equações foram implementadas por Pérez–Peña et al. (2009) na extensão *Cal Hypso* para o aplicativo ArcGIS.

Extraídas as informações básicas, as análises e interpretações se deram a partir da avaliação comparativa das formas das curvas hipsométricas representativas dos lobos deposicionais, e dos valores da integral hipsométrica Hi correspondente a cada bacia compartimento amostral.

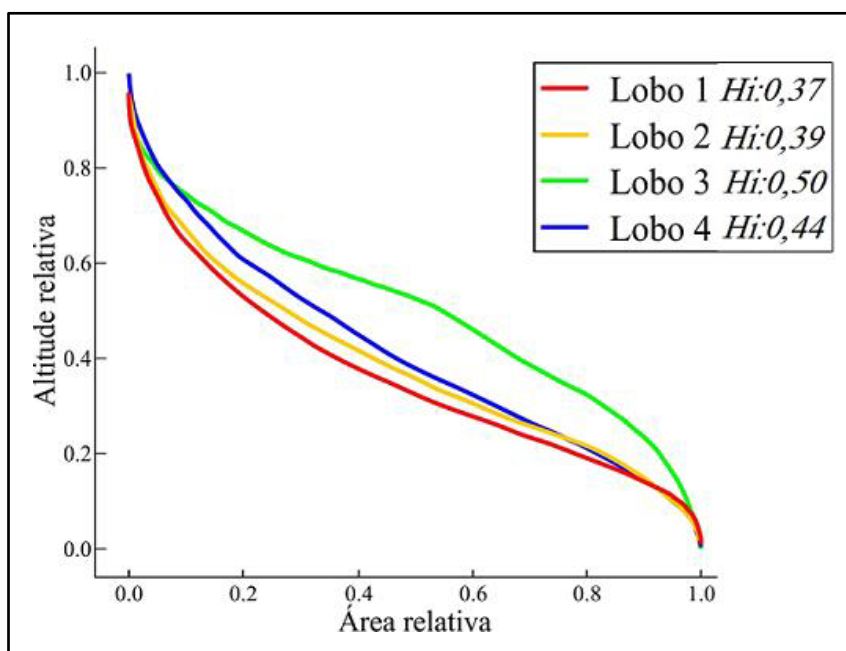
Além da integral hipsométrica, foi calculada a variável morfométrica de altura do relevo. Este parâmetro foi extraído dos lobos deposicionais através de filtros espaciais não lineares. Foram aplicados os filtros de mínimo (elevação mínima) e máximo (elevação máxima), com janela de tamanho 7×7. A subtração dos planos de informação resultantes revela a altura do relevo. Segundo Evans (1972), esta variável pode expressar o grau de dissecação do relevo e revelar, de forma relativa, os diferentes estágios evolutivos do terreno (ANDRADES FILHO et al., 2014). A técnica foi utilizada neste trabalho de forma complementar para auxiliar na interpretação das curvas hipsométricas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir dos resultados obtidos, este estudo propõe uma interpretação da curva e integral hipsométrica que corresponde a uma análise inversa à dinâmica de estruturação do relevo existente em uma unidade de bacia hidrográfica. Na bacia hidrográfica as condições de alta maturidade são reveladas por expressivas áreas dissecadas, onde, geralmente, processos deposicionais são atuantes durante longo período. No entanto, em lobos deposicionais, a dinâmica é inversa, visto que quanto mais representativas são as áreas planificadas e com alta deposição sedimentar, mais recente é o compartimento. Neste sentido, espera-se que os baixos valores de H_i e as curvas hipsométricas com feições mais côncavas representem os terrenos com menor maturidade, ou seja, mais jovens.

As curvas hipsométricas obtidas para os lobos deposicionais estão representadas na **Figura 4**. Observa-se que quanto maior a concavidade da curva, mais jovem é o lobo deposicional, exceto para o Lobo 3. Esta analogia é igualmente verificada pela análise de H_i , sendo que quanto mais próximo de 0, mais jovem o compartimento, exceto para o Lobo 3 (**Figura 5**).

Figura 4 – Curvas hipsométricas dos lobos deposicionais.

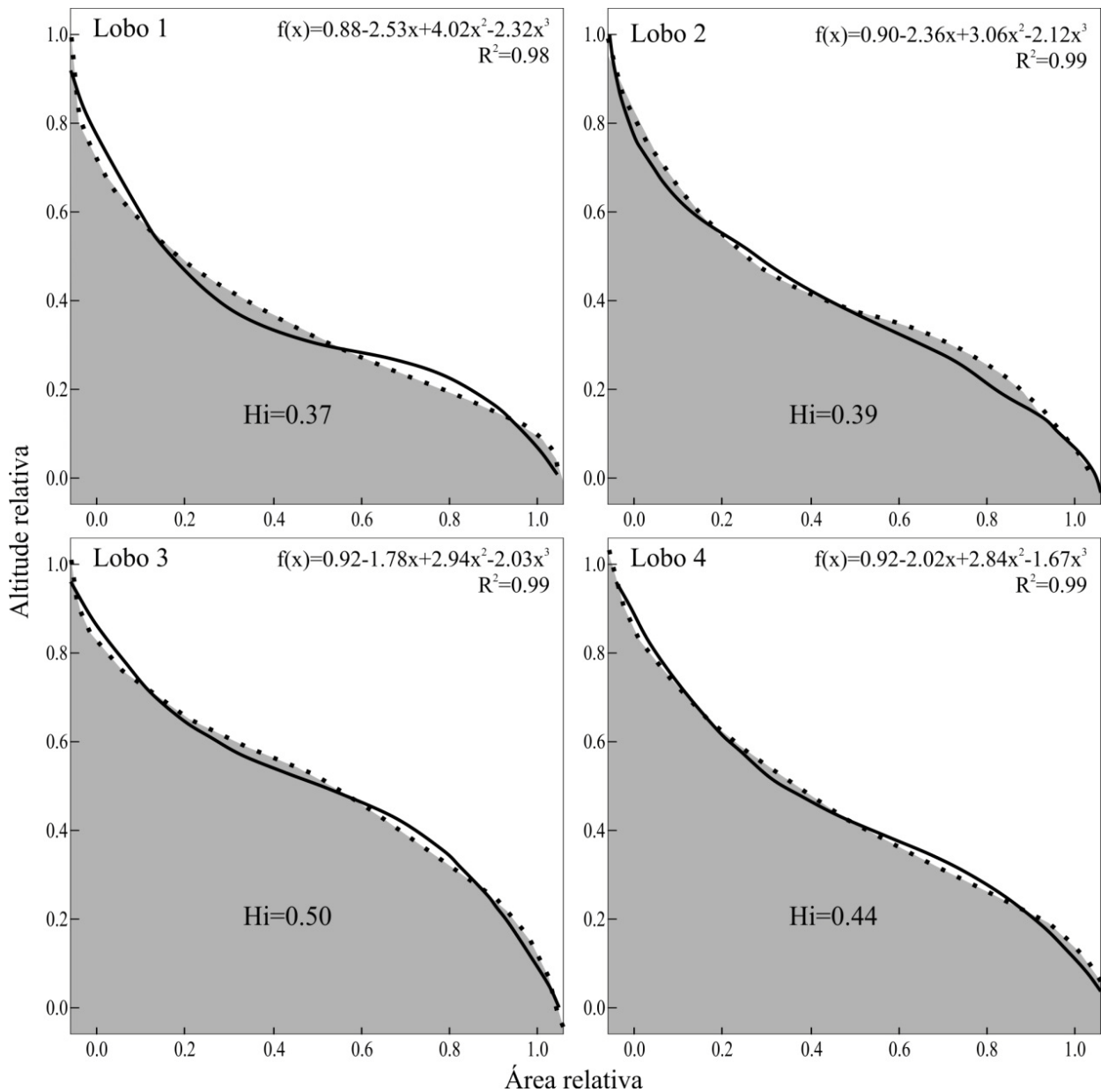


FONTE: Autores (2016)

Strahler (1952) e Schumm (1956) identificaram para bacias hidrográficas que quanto mais acentuada a concavidade da curva hipsométrica e menor H_i , mais antigo é o compartimento representado (**Figura 2**). No entanto, a relação entre curva hipsométrica com idade dos lobos deposicionais, verificada no megaleque do Taquari, é inversa a esta proposta. Tal ocorrência era esperada, devido à predominância de processos deposicionais na unidade dos lobos, ao passo que

em bacias hidrográficas tributárias predominam processos erosivos. Assim, para ambientes de sedimentação recente, como o Pantanal, é coerente que terrenos mais jovens possuam maior frequência acumulada das altitudes menos elevadas.

Figura 5– Curvas hipsométrica (linhas sólidas) modeladas por polinômios do 3º grau (linhas pontilhadas). *Hi*: integral hipsométrica.

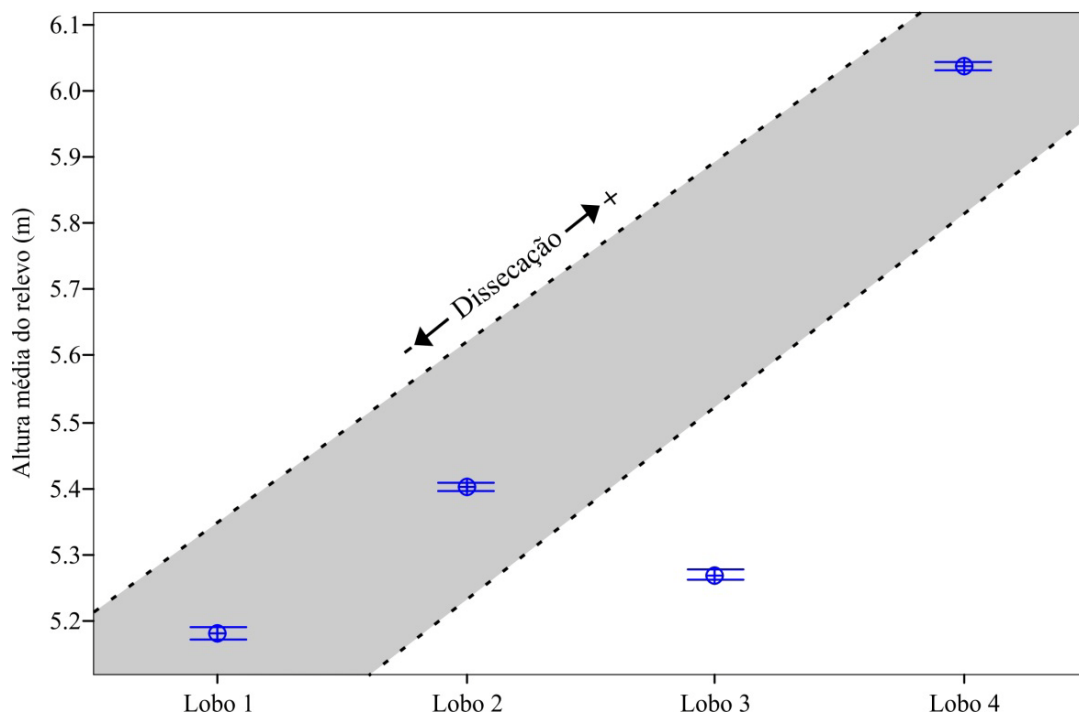


FONTE: Autores (2016)

A discordância da curva hipsométrica do Lobo 3 com as demais pode ser explicada: (1) pela sobreposição quase que total do Lobo 1, que impediu amostrar de forma representativa a topografia do Lobo 3; (2) pela geometria alongada e delgada deste compartimento que, segundo Willgoose e Hancock (1998), pode comprometer a análise da curva hipsométrica e a extração dos parâmetros quantitativos; e (3) por provável interferência de feições erosivas associadas ao canal atual do Taquari, restritas apenas ao cinturão de meandros (ASSINE, 2005), mas que se encontra sobreposto ao Lobo 3.

Foi identificada uma relação positiva entre a altura média do relevo com a cronologia relativa dos lobos deposicionais (**Figura 6**). Desta maneira, quanto mais antigo for o compartimento sedimentar, mais dissecado estará o seu relevo. Segundo Zani et al. (2009a), as maiores amplitudes de relevo no megaleque estão associadas com feições erosivas lineares, que dissecam os depósitos aluviais mais antigos na porção proximal do megaleque. Feições relictas e de elevada amplitude altimétrica já haviam sido documentadas no Pantanal da Nhecolândia (i.e., Lobo 4) por Tricart (1982) e Ab'Saber (1988), corroborando que os lobos deposicionais antigos estão mais dissecados que os recentes.

Figura 6– Relação entre altura do relevo com a idade relativa dos lobos deposicionais. Os círculos azuis representam os valores médios e as barras, o desvio padrão.



FONTE: Autores (2016)

É importante destacar que o Lobo 1, ou seja, a porção da área de estudo onde o rio Taquari constrói o lobo distributário atual, possui a dinâmica sedimentar diretamente influenciada pelo suprimento proveniente da bacia hidrográfica situada nos planaltos a leste (i.e., embasamento), cujo incremento, a partir dos anos 1970, foi responsável por considerável aumento na carga sedimentar depositada (PADOVANI et al., 1998) devido à dinâmica de uso da terra vigente. No entanto, os agentes responsáveis pela atual dinâmica sedimentar do Pantanal estão ativos desde o Pleistoceno tardio (BRAUN, 1977; AB'SABER, 1988). Considerando que são baixos os valores de taxas de erosão estimados durante o quaternário (i.e., média de 10m/Ma) em áreas do embasamento, e, por isso, sugere-se que a região é, atualmente, estável tectonicamente (PUPIM et al., 2015), o fator antrópico atual tem e terá papel preponderante na velocidade e forma das mudanças que ocorrerão no processo evolutivo do megaleque, em especial o lobo distributário atual. Isto reforça a importância do estabelecimento do modelo evolutivo aqui estudado, visto que este conhecimento é fundamental para que se possam antever futuras mudanças na paisagem desta área do Pantanal Mato-Grossense.

Critérios morfológicos não devem ser únicos e definitivos em análises evolutivas da paisagem e, por isso, diferentes métodos de datação têm sido utilizados na área de estudo (p.e., ASSINE, 2003; PUPIM et al., 2015). No entanto, a análise morfométrica proposta contribui no sentido de robustecer a análise morfológica, permitindo comparações e hierarquizações que, do ponto de vista da interpretação visual, torna-se mais complexo e, muitas vezes, menos preciso.

Adicionalmente, é importante destacar que este trabalho não contemplou o uso dos dados SRTM recém-disponibilizados na resolução espacial de aproximadamente 30 m, a partir da Agência Espacial Alemã (DLR) (i.e., em: <ftp://taurus2.caf.dlr.de>), tampouco os dados do GDEM-ASTER (*Advanced Spaceborn Thermal Emission and Reflection Radiometer*). Estas bases não foram utilizadas por justificativas técnicas que devem ser levadas em consideração, não somente para área de estudo no Pantanal, mas para todas as áreas tropicais, com predominância de planícies e áreas vegetadas. Assim, é importante resgatar que os dados SRTM (~30m) foram obtidos por radar operante na banda X, e não na banda C, como os utilizados neste estudo. A consequência da obtenção de dados na banda X é que a energia detectada pelo sensor sofre grande interferência do topo do dossel, interferência maior que a revelada pelos dados obtidos pela banda C (HENDERSON; LEWIS, 1998) e, portanto, as informações de elevação do terreno são menos condizentes com a topografia da área e, predominantemente, influenciadas pela cobertura vegetal.

Já os dados de elevação disponibilizados através do GDEM–ASTER possuem grande interferência tanto da cobertura do solo, como das condições atmosférica no momento da obtenção das imagens óticas estereoscópicas obtidas na faixa do infravermelho próximo. Desta forma, o modelo digital de elevação GDEM–ASTER apresenta uma série de artefatos e informações que revelam o topo das diferentes coberturas vegetais, naturais e cultivos, e apresentam, com menor precisão, os elementos geomorfológicos, conforme já expresso por Andrades Filho et al. (2009) no Pantanal de Aquidauana. Assim, é possível supor que dentre os dados de sensoriamento remoto amplamente disponíveis atualmente, os ora utilizados (i.e., SRTM–3) são os mais adequados para o tipo de abordagem utilizada calcada na análise morfométrica.

CONCLUSÕES

Foi aplicada a análise da curva e integral hipsométrica para verificar a validade do modelo de construção e abandono de lobos deposicionais do megaleque Taquari, proposto por Assine (2005). A partir dos resultados obtidos pode-se concluir que: (1) as curvas hipsométricas estão relacionadas com a cronologia dos lobos deposicionais, confirmando a validade do modelo de Assine (2005), exceto para o Lobo 3; (2) a variável morfométrica de altura do relevo confirmou que os terrenos mais antigos do megaleque possuem maior grau de dissecação que os terrenos de sedimentação recente; e (3) para o megaleque do Taquari, a proposta de análise inversa da curva hipsométrica se confirmou como factível na relação com estágios evolutivos do relevo, revelando que os dados remotos utilizados, a partir do modelo digital de elevação SRTM–3, foram sensíveis às variações topográficas existentes na área de estudo.

A validade do modelo evolutivo estudado reforça a importância do uso de abordagens morfométricas para análise de mudanças da paisagem. Sendo o sistema de megaleque bastante dinâmico, há de se destacar que o lobo distributário atual está sob influência direta da dinâmica de uso da terra nas porções à montante, fonte do aporte de sedimentos, e assim, deve ser foco de maiores investigações que considerem a possibilidade de aceleração dos processos deposicionais nas últimas décadas e o quanto isto pode precipitar as mudanças na paisagem no tempo atual, já que estes processos deposicionais estão diretamente associados à posição e comportamento do rio Taquari no Pantanal Mato–Grossense.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o suporte financeiro através de bolsas de doutorado fornecido pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP ao primeiro e segundo autor, e pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES ao terceiro autor. Adicionalmente, os autores reconhecem a contribuição dos revisores e equipe editorial do BGRS, auxiliando para qualificação do trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AB’SABER, A. N. O Pantanal Matogrossense e a teoria dos refúgios. **Revista Brasileira de Geografia**, v. 50, n. 2 especial, p. 9–57, 1988.

ANDRADES FILHO, C. O.; ROSSETTI, D. F.; BEZERRA, F. H. R. ; MEDEIROS, W. E.; VALERIANO, M. M.; CREMON, E. H.; OLIVEIRA, R. G. Mapping Neogene and Quaternary sedimentary deposits in northeastern Brazil by integrating geophysics, remote sensing and geological field data. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 56, p. 316–327, 2014. doi:10.1016/j.jsames.2014.09.018.

ANDRADES FILHO, C. O.; ZANI, H.; GRADELLA, F. S. Extração automática das redes de drenagem no Pantanal de Aquidauana: estudo comparativo com dados SRTM, ASTER e Carta Topográfica DSG. **Geografia** (Rio Claro. Impresso), v. 34, p. 731–743, 2009.

ASSINE, M. L. River avulsions on the Taquari megafan, Pantanal wetland, Brazil. **Geomorphology**, v.70, p. 357–371, 2005. DOI: 10.1016/j.geomorph.2005.02.013.

ASSINE, M. L.; SOARES, P. C. Quaternary of the Pantanal, west–central Brazil. **Quaternary International**, v. 114, n. 1, p. 23–34, 2004. DOI: 10.1016/S1040–6182(03)00039–9.

BLECHSCHMIDT, I.; MATTER, A.; PREUSSER, F.; RIEK, D. Z. Monsoon triggered formation of Quaternary alluvial megafans in the interior of Oman. **Geomorphology**, v. 110, n. 3–4, p. 128–139, 2009. DOI:10.1016/j.geomorph.2009.04.002.

BULL, W. B.; McFADDEN, L. D. Tectonic geomorphology north and south of the Garlock fault, California. In: GEOMORPHOLOGY SYMPOSIUM – Geomorphology in Arid Regions, 8., 1977, Binghamton, USA. **Proceedings...** Binghamton: Doehring, D.O. (Ed.), 1977. p. 115–138.

BRAUN, E. W. G. Cone aluvial do Taquari, unidade geomórfica marcante na planície quaternária do Pantanal. **Revista Brasileira de Geografia**, v. 39, n. 4, p. 164–180, 1977.

CHAKRABORTY, T.; GHOSH, P. The geomorphology and sedimentology of the Tista megafan, Darjeeling Himalaya: Implications for megafan building processes. **Geomorphology**, v. 115, n. 3–4, p. 252–266, 2010. DOI: 10.1016/j.geomorph.2009.06.035.

CHAKRABORTY, T.; KAR, R.; GHOSH, P.; BASU, S. Kosi megafan: historical records, geomorphology and the recent avulsion of the Kosi River. **Quaternary International**, v. 227, n. 2, p. 143–160, 2010. DOI: 10.1016/j.quaint.2009.12.002

CHEN, Y. C.; SUNG, Q.; CHENG, K. Y. Along–strike variations of morphotectonic features in the Western Foothills of Taiwan: tectonic implications based on stream–gradient and hypsometric analysis. **Geomorphology**, v. 56, n. 1–2, p. 109–137, 2003. DOI: 10.1016/S0169-555X(03)00059-X.

EL HAMDOUNI, R.; IRIGARAY, C.; FERNÁNDEZ, T.; CHACÓN, J.; KELLER, E. A. Assessment of relative active tectonics, southwest border of the Sierra Nevada (Southern Spain). **Geomorphology**, v. 96, n. 1–2, p. 150–173, 2008. DOI: 10.1016/j.geomorph.2007.08.004.

ETCHEBEHERE, M. L. C.; SAAD, A. R.; SANTONI, G. C.; 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 de Geociências USP**, v. 25, p. 271–289, 2006.

EVANS, I.S. General geomorphometry, derivatives of altitude, and descriptive statistics. In: R.J. Chorley (Org.). **Spatial analysis in geomorphology**. New York, EUA: Harper and Row, 1972. p. 17–90.

GOHAIN, K.; PARKASH, B. Morphology of the Kosi megafan. In: RACHOCKI, A. H.; CHURCH, M. (Org.). **Alluvial fans – a field approach**. New York, EUA: Wiley, 1990. p. 151–178.

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. DOI:10.1016/j.pce.2004.08.042.

GUPTA, S. Himalayan drainage patterns and the origin of fluvial megafans in the Ganges foreland basin. **Geology**, v. 25, n. 1, p. 11–14, 1997. DOI: 10.1130/0091-7613(1997)025<0011:HDPATO>2.3.CO;2.

HARLIN, J. M. Statistical moments of the hypsometric curve and its density function. **Mathematical Geology**, v. 10, n. 1, p. 59–72, 1978. DOI: 10.1007/BF01033300.

HARTLEY, A. J.; WEISSMANN, G. S.; NICHOLS, G. J.; WARWICK, G. L. Large distributive fluvial systems: characteristics, distribution, and controls on development. **Journal of Sedimentary Research**, v. 80, n. 2, p. 167–183, 2010. DOI: 10.2110/jsr.2010.016.

HENDERSON, F. M.; LEWIS, A. J. **Principles and applications of imaging radar: manual of remote sensing**. New York: John Wiley & Sons, 1998, 896 p.

HORTON, B. K.; DECELLES, P. G. Modern and ancient fluvial megafans in the foreland basin system of the central Andes, southern Bolivia: implications for drainage network evolution in fold–thrust belts. **Basin Research**, v. 13, n. 1, p. 43–63, 2001. DOI: 10.1046/j.1365–2117.2001.00137.x.

JARVIS, A.; REUTER, H. I.; NELSON, A.; GUEVARA, E. **Hole-filled SRTM for the globe Version 4, available from the CGIAR–CSI SRTM 90m**. Database. Greenbelt, MD, EUA: CGIAR Consortium for Spatial Information (CGIAR-CSI), 2008. Disponível em: <<http://srtm.csi.cgiar.org>>.

KELLER, E. A; PINTER, N. **Active Tectonics: Earthquakes, Uplift, and Landscape**. New Jersey, EUA: Prentice Hall, 2002, 362 p.

MASEK, J. G., ISACKS, B. L., GUBBELS, T. L., FIELDING, E. J. Erosion and tectonics at the margins of continental plateaus. **Journal of Geophysical Research**, v. 99, n. B7, p. 13941–13956, 1994. DOI: 10.1029/94JB00461.

MCCARTHY, J.; GUMBRICHT, T.; MCCARTHY, T. S. Ecoregion classification in the Okavango Delta, Botswana from multitemporal remote sensing. **International Journal of Remote Sensing**, v. 26, n. 19, p. 4339–4357, 2005. DOI: 10.1080/01431160500113583.

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. DOI: 10.1016/0169-555X(93)90023-U.

PADOVANI, C. R.; CARVALHO, N. O.; GALDINO, S.; VIEIRA, L. M. Produção de sedimentos na alta bacia do rio Taquari para o Pantanal. In: Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos (ENES), 3., 1998, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: ABRH, 1998, p. 16–24.

PARADELLA, W.R.; SANTOS, A.R.; VENEZIANE, P.; 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.

PEDRERA, A.; PÉREZ–PEÑA, J. V.; GALINDO–ZALDÍVAR, J.; AZAÑÓN, J. M.; AZOR, A. Testing the sensitivity of geomorphic indices in areas of low–rate active folding (eastern Betic Cordillera, Spain). **Geomorphology**, v. 105, n. 3–4, p. 218–231, 2009. DOI: 10.1016/j.geomorph.2008.09.026.

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. DOI: 10.1016/j.cageo.2008.06.006.

PUPIM, F. N.; BIERMAN, P. R.; ASSINE, M. L.; ROOD, D. H.; SILVA, A.; MERINO, E. R. Erosion rates and landscape evolution of the lowlands of the Upper Paraguay river basin (Brazil) from cosmogenic ¹⁰Be. **Geomorphology**, v. 234, p. 151–160, 2015. DOI: 10.1016/j.geomorph.2015.01.016.

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, p. 241–262, 2003. DOI:10.1016/S0924-2716(02)00124-7.

REUTER, H. I.; NELSON, A.; JARVIS, A. An evaluation of void filling interpolation methods for SRTM data. **International Journal of Geographic Information Science**, v. 21, n. 9, p. 983–1008, 2007. DOI: 10.1080/13658810601169899.

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. DOI: 10.1130/0016-7606(1956)67[597:EODSAS]2.0.CO;2.

SINHA, R. The great avulsion of Kosi on 18 August 2008. **Current Science**, v. 97, n. 3, p. 429–433, 2009.

STRAHLER, A. N. Hypsometric (area–altitude) analysis and erosional topography. **Geological Society of America Bulletin**, v.63, n. 11, p. 1117–1142, 1952. DOI: 10.1130/0016-7606(1952)63[1117:HAAOET]2.0.CO;2.

TRICART, J. El Pantanal: un ejemplo del impacto geomorfológico sobre el ambiente. **Informaciones Geográficas**, v. 29, n. 1, p. 81–97, 1982.

TROIANI, F.; DELLA SETA, M. The use of the Stream Length–Gradient index in morphotectonic analysis of small catchments: A case study from Central Italy. **Geomorphology**, v. 101, n.1, p.159 – 168, 2008. DOI:10.1016/j.geomorph.2007.06.020.

WILLGOOSE, G.; HANCOCK, G. Revisiting the hypsometric curve as an indicator of form and process in transport–limited catchment. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 23, n. 7, p. 611–623, 1998. DOI: 10.1002/(SICI)1096-9837(199807)23:7<611::AID-ESP872>3.0.CO;2-Y.

ZANI, H. Z.; ASSINE, M. L.; McGLUE, M. M. Remote sensing analysis of depositional landforms in alluvial settings: Method development and application to the Taquari megafan, Pantanal (Brazil). **Geomorphology**, v. 161–162, 82–92. 2012. DOI: 10.1016/j.geomorph.2012.04.003.

ZANI, H.; ASSINE, M. L.; SILVA, A.; CORADINI, F. A.; KUERTEN, S.; GRADELLA, F.S. Geoformas deposicionais e feições erosivas no Pantanal Mato–Grossense identificadas por sensoriamento remoto. **Geografia**, v. 34, número especial, p. 643–654, 2009a.

ZANI, H.; ASSINE, M. L.; SILVA, A.; CORADINI, F. A. Redes de drenagem distributária e formas deposicionais no Megaleque do Taquari, Pantanal: uma análise baseada no MDE–SRTM. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 10, n. 2, p. 21–28, 2009b.

Recebido em: 29/11/2015
Aceito em: 11/03/2016