

## Imagens Landsat-5/TM e modelos digitais de elevação SRTM aplicados à análise de savana em áreas florestais amazônicas

Ericson Hideki Hayakawa<sup>1</sup>  
Dilce de Fátima Rossetti<sup>1</sup>  
Thiago de Castilho Bertani<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – DSR/INPE

<sup>2</sup>Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos – CPTEC/INPE  
Caixa Postal 515 – CEP 12245-970 - São José dos Campos - SP, Brasil  
(ericson@dsr.inpe.br; rossetti@dsr.inpe.br; thiago.bertani@cptec.inpe.br)

**Abstract.** Several studies have reported the occurrence of savanna patches within the Amazonian forest and several debates have been presented trying to explain their genesis. This study, based on the interpretation of Landsat-5/TM images and SRTM Digital Elevation Models (DEMs), revealed elongated belts arranged into a dendritic pattern that shows an excellent resemblance to modern fluvial channels. This morphological aspect led to propose that the savanna belts developed upon a paleodrainage that became abandoned in the landscape previously to the establishment of the modern drainage basin. The orientation of this paleodrainage contrary to modern channels allows to invoke tectonics as the most likely mechanism driving the fluvial dynamics in this study area.

**Palavras-chave:** Amazonia, amazonian savannas, remote sensing, paleodrainage, Amazônia, savanas da Amazônia, sensoriamento remoto, paleodrenagens.

### 1. Introdução

A ocorrência de manchas de savana em meio à floresta amazônica tem despertado a curiosidade de muitos cientistas (Sanaiotti et al., 1997, 2002; Takeuchi, 1960). Algumas hipóteses foram formuladas para explicar diferenças de vegetação na Amazônia, incluindo-se variações locais nos nutrientes do solo (Coudun et al., 2006; Duivenvoorden, 1995; Duque et al., 2002; Salavaara et al., 2005; Vormisto et al., 2000), gradientes de topografia (Tuomisto et al., 1998; Vormisto et al., 2004), variações microclimáticas, ou ainda, herança de climas relativamente mais áridos durante eventos glaciais pleistocênicos (Ledru, 2002; Ledru et al., 2006).

Estudos recentes enfocando uma extensa área de savana no leste da Ilha do Marajó (PA) demonstraram origem ligada a processos geológicos (Miranda et al., 2008; Rossetti et al., 2005). Esses autores mostraram que as savanas dessa região foram estabelecidas no Holoceno Médio como resultado de movimentações do terreno devidas a fatores tectônicos. Este processo resultou, também, no abandono de sistemas de drenagens nessa ilha, hoje preservados na paisagem sob forma de feições morfológicas relacionadas a paleocanais (Mantelli 2008; Rossetti e Valeriano, 2007; Rossetti et al., 2008a,b). Alguns dos paleocanais que ocorrem no sul da ilha em meio à floresta são recobertos por vegetação de savana, e este contraste de vegetação facilita seu reconhecimento em imagens de sensoriamento remoto (Rossetti et al., neste volume).

Análise preliminar de dados de sensoriamento remoto revelou várias manchas alongadas de savana em contraste brusco com floresta no sul do Estado do Amazonas (poucas dezenas de quilômetros a noroeste e norte/nordeste de Porto Velho, Rondônia) e, nas adjacências da margem esquerda do rio Ji-Paraná, próxima a Manicoré - AM. Uma dessas manchas, localizadas em Humaitá (AM), foram estudadas e relacionadas com paleoclimas áridos desenvolvidos no Holoceno Médio (Pessenda et al., 1998a,b; Vidotto et al., 2007). Dada à aparente semelhança desses cordões de savana com aqueles relacionados a paleocanais na Ilha do Marajó, este trabalho apresenta uma caracterização dos aspectos morfológicos desses cordões alongados de savana com base em dados de sensoriamento remoto, testando a

hipótese destes também estarem associados com paleocanais. Com isto, espera-se fornecer informações adicionais que contribuam em discussões sobre a gênese de ocorrências de savana na floresta Amazônica.

### 1.1 Área do estudo

A área do estudo contempla a porção sul do Estado do Amazonas, estando localizada próxima das cidades de Porto Velho (RO), Humaitá e Manicoré (AM) (Figura 1). Segundo classificação de Köppen, o clima da região é o tropical chuvoso com curta estação seca (Am). O período chuvoso inicia-se geralmente em outubro, atingindo maiores índices nos meses de janeiro a fevereiro, e o período seco ocorre de junho a agosto. A precipitação média anual é de aproximadamente 2500 mm e a temperatura média de 25 °C (Brasil 1978).

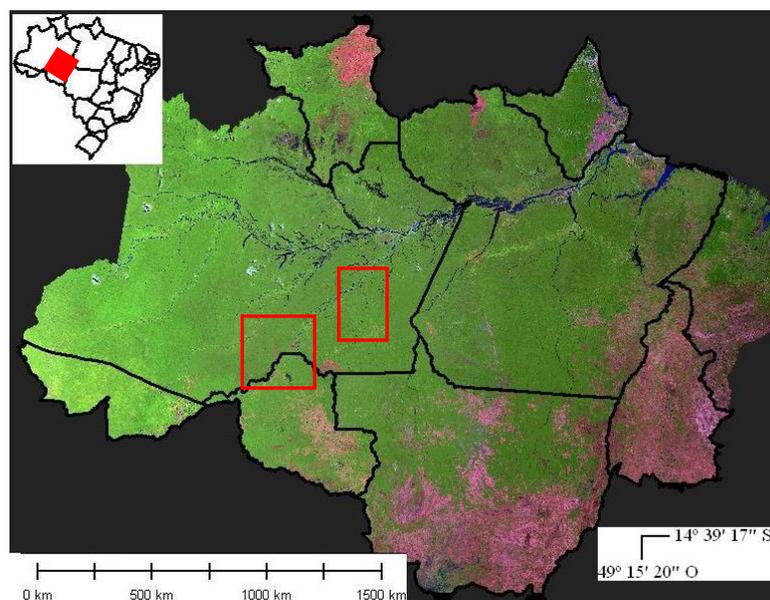


Figura 1. Localização das áreas de estudo em Porto Velho-Humaitá (sudoeste) e Manicoré (nordeste) (Mosaico de cenas *Landsat* da Amazônia legal do banco de dados Atlas-BR, obtido no endereço eletrônico <<http://www.dpi.inpe.br/spring/portugues/banco.html>>).

Os dois principais sistemas fluviais da área de estudo são representados pelos rios Madeira e Purus. O primeiro apresenta orientação preferencial de S-SW para N-NE, enquanto o segundo possui orientação geral para SW-NE. A cobertura vegetal predominante é representada por floresta tropical densa. Áreas de savana estão instaladas no domínio morfoclimático de estruturas dissecadas e/ou pediplanadas e compreendem, principalmente, as fisionomias de campo cerrado, parque e cerradão, este predominante nas áreas de contato savana/floresta (Brasil, 1978).

### 2. Material e Métodos

Este trabalho baseia-se na análise de imagens *Landsat-5/TM* (disponibilizadas gratuitamente no endereço eletrônico <[www.dgi.inpe.br](http://www.dgi.inpe.br)>) e de modelos digitais de elevação (MDE) *SRTM* (*Shuttle Radar Topography Mission*), obtidos diretamente do site <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/cbanddataproducts.html>, em resolução espacial de 3'' (aproximadamente 90 m). A rede de drenagem foi obtida em formato digital pelo SIVAM/IBGE (dado não publicado), e complementada com o banco de dados do SPRING, disponibilizados em <<http://www.dpi.inpe.br/spring/portugues/banco.html>>.

As imagens *Landsat-5/TM* selecionadas correspondem a cenas imageadas próximas ao ano de aquisição dos dados *SRTM*, e com baixa presença de cobertura de nuvens.

Composições coloridas e integração com a rede de drenagem foram geradas para ressaltar as feições de interesse utilizando-se do aplicativo SPRING 4.3.3. Os dados SRTM foram processados no aplicativo *Global Mapper 9.0* com intuito de ressaltar e melhorar a visualização das feições de interesse para este estudo. O procedimento contemplou a customização de cores, que foram atribuídas a conjuntos de valores de elevação. Após isto, procede-se com a interpretação visual no intuito de identificar e delinear as feições de interesse.

### 3. Caracterização morfológica das áreas de savana

Representadas por áreas de grandes dimensões, as manchas de savana, em escala regional, configuram formas geométricas alongadas de até 70 km de extensão por até 10 km de largura. Áreas menores também são comumente observadas. Essas manchas apresentam-se como cordões com geometria ligeiramente sinuosa, e bifurcam-se lateralmente, definindo um padrão próximo ao dendrítico (Figura 2A -C). Nota-se também que as manchas de savana não se distribuem aleatoriamente, ao contrário, organizam-se segundo uma orientação preferencial. Por exemplo, nas áreas próximas à Humaitá e Porto Velho, vários dos cinturões de savana estão orientados na direção principal NW-SE e N-S (Figura 2A), sendo que as ramificações convergem para um ponto comum no sentido SE/S.

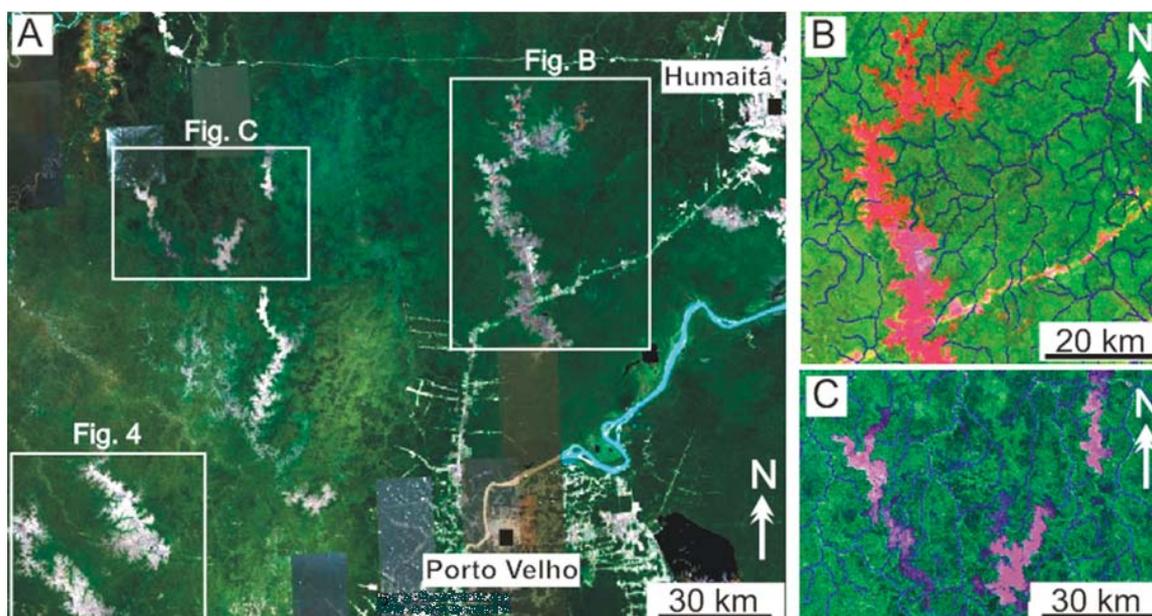


Figura 2. A) Vista geral dos cinturões de savana (rosa) em meio à floresta (verde) da área de estudo próxima a Porto Velho (RO) e Humaitá (AM) (Fonte: *Image 2007-Digital Globe*). B e C) Detalhes da figura A.

A partir da interpretação visual de cenas de sensores ópticos, essas manchas apresentam-se ora contínuas, ora descontínuas. Com o processamento dos MDE SRTM, ressaltam-se diferentes níveis altimétricos que também revelam a presença de cordões de savana em meio à floresta densa, e que em cenas Landsat-5/TM permaneciam ocultos. Estes cordões encontram-se mascarados devido à presença significativa de espécies arbóreas, mas apresentam geometria similar aos cordões de savana de vegetação rasteira, além de revelarem uma continuidade e correlação entre si, de forma a definir cordões alongados em meio à floresta densa (Figura 3A-C).

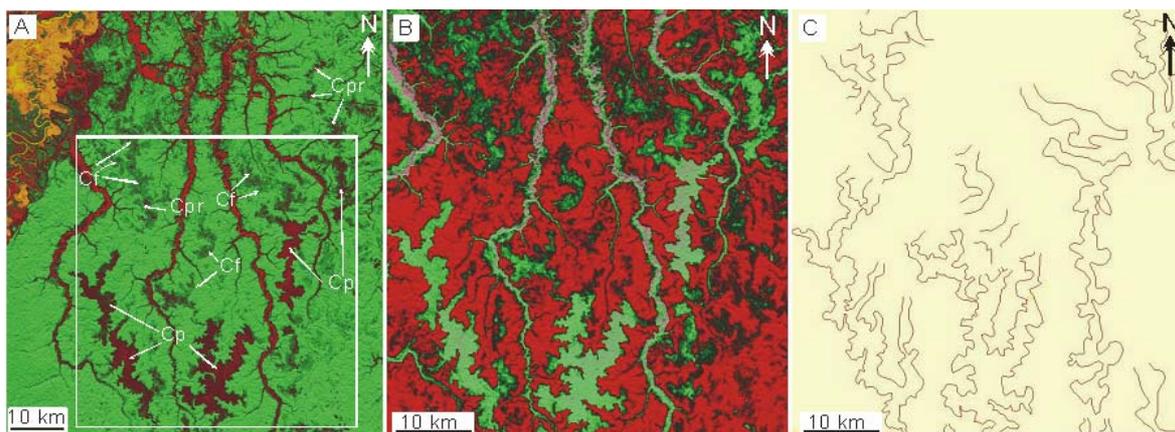


Figura 3. A) Dados SRTM ilustrando cordões de savana (Cp) da área de estudo, que estão em continuidade com feições similares em áreas de floresta (Cf), onde ocorrem somente resquícios de savana (Cpr). B) Detalhe da figura A. C) Delineamento das áreas de savana derivadas da figura B.

Observa-se também que alguns cinturões alongados de savana direcionam-se para áreas relativamente mais amplas, de geometria ligeiramente retangular, definidas por bordas retas, onde ocorre o estabelecimento de cursos de água retilíneos (Figura 4A,B ).

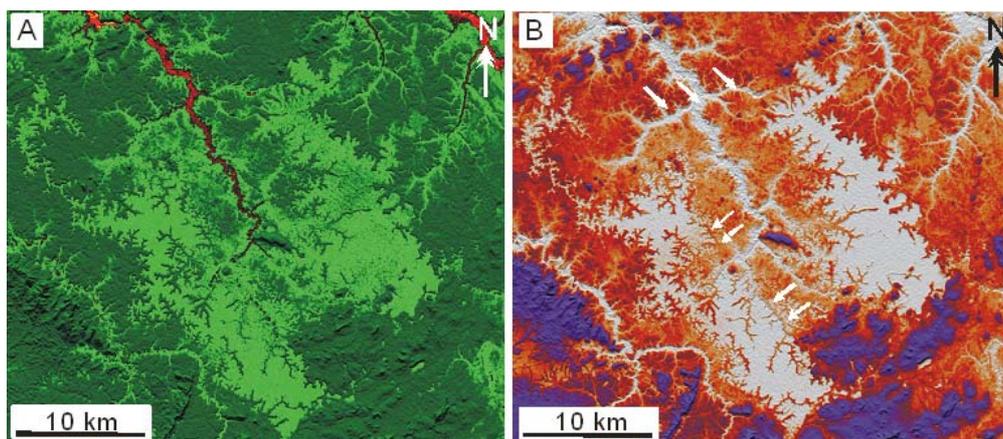


Figura 4. A,B) Dados SRTM processados em diferentes paletas de cores, ressaltando manchas de savana (verde claro em A e branco em B) em meio à floresta (verde escuro em A e laranja avermelhado em B). Notar a geometria retangular das áreas de savana, com limites retos, onde ocorrem cursos d'água retilíneos nas margens das áreas de savana (setas em B) (Área referente a porção 4 da figura 2A).

Perfis topográficos dos MDE SRTM revelam cotas topográficas inferiores nas áreas de savana em relação às de floresta adjacentes (Figura 5). Entretanto, a extração da rede de drenagem e sua integração com imagens Landsat-5/TM indicam que as áreas de savana são topograficamente mais elevadas que suas adjacências. Isto é evidenciado pelo fato das áreas de savanas atuarem como divisores de água (Figuras 2B,C). Estes dados são condizentes com observações realizadas pelo Projeto RADAMBRASIL (Brasil, 1978). Segundo as informações provenientes do Projeto supracitado, as áreas de savana localizam-se em interflúvios tabulares, sendo caracterizadas por relevo plano e suavemente ondulado. Nessas áreas também ocorrem pequenas depressões (microrelevo), que definem diferentes estados de umidade no solo. Em períodos de maior precipitação, é comum a formação de pequenos lagos que se conectam com redes de drenagem que se dirigem das áreas de savana em direção à floresta densa.

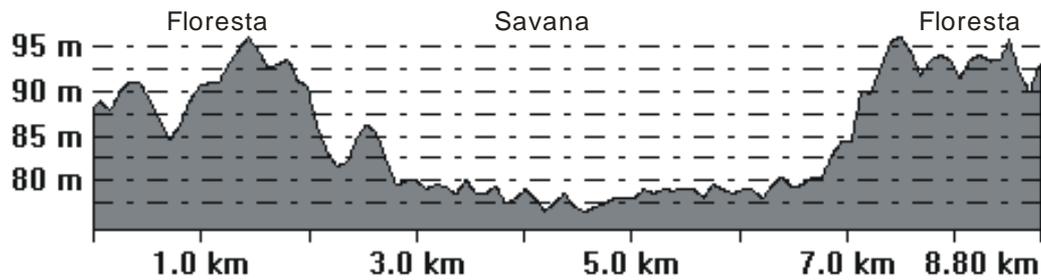


Figura 5. Perfil topográfico com base em dados SRTM transversal a cinturão de savana.

Considerando que os dados SRTM sofrem o fenômeno de efeito dossel em áreas de vegetação densa, a representação do perfil topográfico não representa fidedignamente a topografia da área, e sim a influência do dossel. Dessa forma, a descrição emitida pelo Projeto RADAMBRASIL (Brasil, 1978) de que a área representa um interflúvio tabular é corroborada.

Quanto às áreas de vegetação de savana próximas a Manicoré (adjacências dos rios Ji-Paraná e Manicoré), estas também se apresentam predominantemente recobertas por vegetação de savana e margeados por floresta densa, semelhante ao observado próximo a Humaitá e Porto Velho. Adicionalmente, o delineamento dos cordões de savana revelam uma organização em padrão dendrítico e com sentido de fluxo de norte para sul, o que destoia do sentido de fluxo da rede de drenagem atual, o qual flui de sul para norte (Figura 6A-D). A atuação dos cordões de savana como divisores de água também é evidenciada.

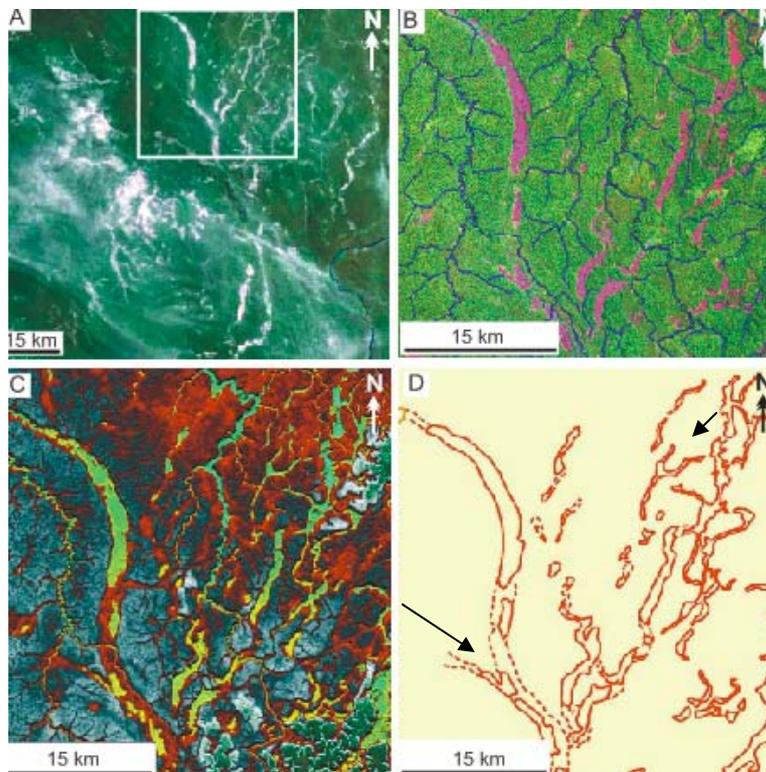


Figura 6. A) Vista geral de cordões alongados, estreitos e sinuosos, dominados por savana (rosa) em meio à floresta (verde) próximos a margem esquerda do rio Ji-Paraná. B-D) Detalhes da área indicada pelo quadrado inserido em A, visto em imagem Landsat-5/TM (B; cordões em magenta) e dados SRTM (C; cordões em verde) e salientado por vetores (D). Em D, as setas indicam fluxo de norte para sul.

#### 4. Discussão

A análise dos cordões de savana na área de estudo com base em imagens Landsat-5/TM e MDE SRTM permite levantar a hipótese destes estarem ressaltando feições morfológicas do terreno, relacionadas a ambientes físicos que teriam dominado a paisagem em tempos pretéritos. Os cordões alongados e sinuosos que ocorrem sob forma de segmentos que se bifurcam formando padrão dendrítico são comparáveis à morfologia de sistemas de drenagens atuais. A distribuição organizada sob forma de vários cordões que convergem para um cordão principal é consistente com a presença de grupos de tributários que drenavam para um canal principal. Portanto, interpreta-se que os cordões de savana aqui descritos denotem a presença de canais fluviais pretéritos que foram abandonados e, conseqüentemente, colmatados, total ou parcialmente.

Trabalhos anteriores já descreveram como paleocanais (Latrubesse, 2002) os cordões predominantemente recobertos por vegetação de savana próxima a Manicoré. Situação similar ocorre no sul da Ilha do Marajó, onde são registrados paleocanais cobertos por savana em meio às áreas de floresta (Rossetti et al. neste volume). Naquela área, o contraste de vegetação promoveu o reconhecimento de morfologias relacionadas a paleocanais em imagens de sensoriamento remoto.

Embora relativamente mais largos, os cordões de savana registrados nas adjacências de Porto Velho-Humaitá possuem morfologia comparável aos paleocanais revestidos de savana de Manicoré e da Ilha do Marajó. Uma feição comum a todas essas ocorrências é o fato dos cordões convergirem para um cordão principal orientado em sentido contrário ao deslocamento dos fluxos d'água modernos. Além disto, como registrado na Ilha do Marajó (Mantelli, 2008; Rossetti et al., 2005), as morfologias dos paleocanais, tanto na área de Manicoré, quanto de Porto Velho-Humaitá, atuam como divisores de água.

Propõe-se que os cordões de savana de Porto Velho-Humaitá registrem paleocanais de dimensões maiores (pelo menos até 10 km de largura) que os verificados em Manicoré e Ilha do Marajó. Uma vez abandonados, os canais são progressivamente preenchidos por sedimentos até sua colmatação final, quando se tornam substratos firmes e favoráveis à colonização arbórea. A identificação de morfologias em cordões em meio à floresta que mostram continuidade com os cordões de savana evidenciam que partes das morfologias relacionadas a paleocanais na área de estudo já atingiu este estágio de desenvolvimento. Por outro lado, áreas dos canais que foram recentemente abandonadas são sítios mais favoráveis ao crescimento de savana. A presença de cordões com resquícios de savana em meio à floresta é relacionada a estágios intermediário de abandono de canais, os quais eventualmente podem ainda ser alagados em alguns pontos durante as cheias.

Levando-se em consideração o modelo acima exposto, interpreta-se que os paleocanais da área de estudo possam ter sido mais amplos do que registrado nos dados de sensoriamento remoto. Ou seja, a tendência é que, com o tempo e à medida que o substrato torna-se mais estável, as áreas de savana sejam invadidas e colonizadas progressivamente por espécies arbóreas. Estudos de campo na região de Humaitá registram o avanço de floresta sobre as áreas de savana, além de sugerirem a idade entre 7 e 3 mil anos para o domínio de savana na região, período este relacionado a variações climáticas (Pessenda et al., 1998a,b; Vidotto et al., 2007). Interpretação similar foi levantada para explicar o abandono de paleocanais na região de Manicoré, o qual foi associado a variações climáticas durante o Último Máximo Glacial (Latrubesse, 2002).

Por outro lado, Souza Filho et al. (1999) relacionam o abandono de paleocanais na região do Alto rio Madeira principalmente a fatores tectônicos. Na área de estudo, a ocorrência de paleocanais que se direcionam em sentido contrário à drenagem atual favorece essa interpretação, uma vez que tal inversão de drenagem requer movimentação do terreno por efeito tectônico. Em particular, a ocorrência de manchas alargadas de savana com geometria

retangular, como registradas na Figura 4, é consistente com o desenvolvimento de áreas alagadas (lagos), geradas, possivelmente, por deslocamentos do terreno como reflexo de falhas tectônicas. A ocorrência de canais atuais retilíneos que acompanham a margem dessas feições é consistente com esta interpretação. Inversões de drenagem contemporâneas na Ilha do Marajó também estão ligadas à reativação de falhas tectônicas (Rossetti et al., 2008a).

Portanto, embora variações climáticas sejam significativas nas metamorfoses fluviais e no rearranjo da distribuição da vegetação, a dinâmica de evolução de sistemas de drenagens na Amazônia pode ser mais complexa e envolver causas tectônicas. A análise de produtos de sensoriamento remoto permite delimitar, com grande precisão, áreas com contrastes de vegetação relacionadas a paleocanais, que devem ser futuramente investigadas em campo, a fim de subsidiar discussões adicionais sobre estes temas.

## 5. Conclusão

A interpretação de dados de sensoriamento remoto aqui apresentada sustenta que as áreas de savana em meio à floresta na área de estudo estão desenvolvidas sobre feições morfológicas relacionadas a paleocanais e paleolagos. Os paleocanais mostram orientação principal contrária ao fluxo da drenagem moderna, sugerindo influência tectônica. A combinação do modelo de evolução de paisagens aqui sugerida com base em dados de sensoriamento remoto deve, agora, ser combinada com informações diretas em campo. Com isto, será possível uma reconstrução da evolução paleogeográfica mais precisa e uma discussão do grau de influência de fatores tectônicos e climáticos no processo de abandono de paleodrenagens e no estabelecimento de cordões de savana em áreas de floresta na Amazônia.

## Agradecimentos

Ao CNPq pela concessão de bolsa de doutorado a Ericson Hideki Hayakawa. Os autores também agradecem as contribuições de Márcio de Morisson Valeriano, Arimatéia de Carvalho Ximenes, Giselle Trevisan, dentre outros parceiros de trabalho do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Divisão de Sensoriamento Remoto).

## Referências Bibliográficas

- BRASIL. **Departamento Nacional de Produção Mineral**. Projeto RADAMBRASIL. Folha SB.20 Purus; geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra. Rio de Janeiro, 1978.
- Coudun, C.; Gégout, J. C.; Piedallu, C.; Rameau, J.C. Soil nutritional factors improve models of plant species distribution: an illustration with *Acer campestre* (L.) in France. **Journal of Biogeography**, v. 33, p. 1750-1763, 2006.
- Duivenvoorden, J.F. Tree species composition and rain forest-environment relationships in the middle Caqueta area, Colombia, NW Amazonia. **Vegetatio**, v. 120, p. 91-113, 1995.
- Duque, A.; Sa´nchez, M.; Cavelier, J.; Duivenvoorden, J.F. Different floristic patterns of woody understorey and canopy plants in Colombian Amazônia. **Journal of Tropical Ecology**, v. 18, p. 499-525, 2002.
- Latrubesse, E.M. Evidence of Quaternary palaeohydrological changes in middle Amazônia: The Aripuanã-Roosevelt and Jiparaná “fans”. **Z. Geomorph. N.F.**, v. 129, p. 61-72, 2002.
- Ledru, M.P. Late Quaternary history and evolution of the cerrados as revealed by palynological records. In: Oliveira, P.S. & Marquis, R.J. (eds.) **The Tropical Cerrados of Brazil: Ecology and Natural History of a Neotropical Savanna**, NY, Columbia University Press, p. 33-52, 2002.
- Ledru, M. P.; Ceccantini, G.; Gouveia, S.E.M.; López-Sáez, J.A.; Pessenda, L.C.R.; Riberito, A.S. Millennial-scale climatic and vegetation changes in a northern Cerrado (Northeast, Brazil) since the Last Glacial Maximum. **Quaternary Science Reviews**, v. 25, p. 1110-1126, 2006.

- Mantelli, L.R. **Análise do modelo de elevação do terreno com base em dados SRTM na região de Breves, sudeste da Ilha do Marajó**. 2008, 143 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2008.
- Miranda, M. C. C.; Rossetti, D. F.; Behling, H. Caracterização paleoambiental de depósitos Quaternários na Ilha do Marajó: 13 C, 15 N, C/N E PALINOMORFOS. In: **Congresso Brasileiro de Geologia**, 44, 2008, Curitiba, Brasil. Anais...Curitiba, Sociedade Brasileira de Geologia, 2008.
- Pessenda, L.C.R.; Gomes, B.M.; Aravena, R.; Ribeiro, A.S.; Boulet, R.; Gouveia, S.E.M. The carbon isotope Record in soils along a Forest-cerrado ecosystem transect: implications for vegetation changes in the Rondonia state, southwester Brazilian Amazon region. **The Holocene**, v. 8, p. 599-603, 1998a.
- Pessenda, L.C.R.; Gouveia, S.E.M.; Gomes, B.M.; Aravena, R.; Boulet, R.; Ribeiro, A.S. Studies of palaeovegetation changes in the central Amazon by carbon isotopes ( $^{12}\text{C}$ ,  $^{13}\text{C}$ ,  $^{14}\text{C}$ ) of soil organic matter. In: **Proceedings of an international symposium on isotope Techniques in the Study of past and current environmental changes in the hydrosphere and the atmosphere**, 1998b, Vienna. Anais...Vienna, International Atomic Energy Agency, 1998b, p. 645-652.
- Rossetti, D. F.; Toledo, P. M.; Góes, A.M. New geological framework for Western Amazonia (Brazil) and implications for biogeography and evolution. **Quaternary Research**, v. 63, p. 78-89, 2005.
- Rossetti, D. F.; Valeriano, M. M. Applying SRTM topographic data to characterize a Quaternary paleovalley in northern Brazil. In: **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, 13, 2007, Florianópolis, Brasil. Anais...São José dos Campos, INPE, 2007. p. 2125-2132.
- Rossetti, D. F.; Valeriano, M. M., Miranda, A. C da C. Quaternary tectonics in a passive margin: Marajó Island, northern Brazil. **Journal of Quaternary Science**, v. 23, p. 121-135, 2008a.
- Rossetti, D.F.; Valeriano, M. M.; Góes, A. M.; Thallés, M. Palaeodrainage on Marajó Island, northern Brazil, in relation to Holocene relative sea-level dynamics. **The Holocene**, v. 18, p. 923-934, 2008b.
- Salovaara, K.J.; Thessler, S.; Malik, R.N.; Tuomisto, H. Classification of Amazonian primary rain forest vegetation using Landsat ETM+ satellite imagery. **Remote Sensing of Environment**, v. 97, p. 39-51, 2005.
- Sanaïotti, T.M.; Bridgewater, S.; Ratter, J.A. A floristic study of the savanna vegetation of the State of Amapá, Brazil, and suggestions for its conservation. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi**, v. 13, p. 3-29, 1997.
- Sanaïotti, T.M.; Martinelli, L.A.; Victoria, R.L.; Trumbore S.E.; Camargo, P.B. Past vegetation changes in Amazon savannas determined using carbon isotopes of soil organic matter. **Biotropica**, v. 34, p. 2-16, 2002.
- Takeuchi, M. A estrutura da vegetação na Amazônia. II - As savanas do Norte da Amazônia. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi**, v. 7, p. 3-14, 1960.
- SOUZA FILHO, P. W. M.; QUADROS, M. L. E. S.; SCANDOLARA, J. E.; FILHO, E. P. S.; REIS, M. R. Compartimentação morfoestrutural e neotectônica do sistema fluvial Guaporé-Mamoré-Alto Madeira, Rondônia, Brasil. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 29 (4), p. 469-476, 1999.
- Tuomisto, H.; Poulsen, A.D.; Moran, R.C. Edaphic distribution of some species of the fern genus *Adiantum* in western Amazonia. **Biotropica**, v. 30, p. 392-399, 1998.
- Vidotto, E.; Pessenda, L. C..R.; Ribeiro, A.S.; Freitas, H.A.; Bendassolli, J.A. Dinâmica do ecótono floresta-campo no sul do estado do Amazonas no Holoceno, através de estudos isotópicos e fitossociológicos. **Acta Amazônica**, v. 37, n. 3, p. 385-400, 2007.
- Vormisto, J.; Phillips, O.L.; Ruokolainen, K.; Tuomisto, H.; Vásquez, R. A comparison of fine-scale distribution patterns of four plant groups in an Amazonian rainforest. **Ecography**, v. 23, p. 349-359, 2000.
- Vormisto, J.; Tuomisto, H.; Oksanen, T. Palm distribution patterns in Amazonian rainforests: what is the role of topographic variation? **Journal of Vegetation Science**, v. 15, p. 485-494, 2004.