Paleorias fluviais associadas ao rio Madeira, sudoeste da Amazônia brasileira

Thiago de Castilho Bertani [1]
Dilce de Fátima Rossetti [1]
Eicson Hideki Hayakawa [2]

[1] Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil
{thiagob, rossetti}@dsr.inpe.br

[2] Universidade Federal de Alfenas - UFAL
37130-000 - Alfenas - MG, Brasil
{ericson_geo}@yahoo.com.br

Abstract. This paper discusses the use of remote sensing to improve the morphological description of open vegetation patches and *ria* lakes in two distinct areas on the Brazilian Amazon. JERS-1 images, SRTM-DEM and multispectral Landsat TM-5 images were used to extract water and vegetation features, which were discretized in groups of pixels using an object-oriented approach. Several attributes regarding geometry and spatial distribution of lakes, *ria* lakes and open vegetation patches were calculated. Six attributes were identified by the *InfoGain* algorithm as the most pertinent to individualize each group. The major shape similarity between *ria* lakes and open vegetation patches suggests a common origin to these features. The distribution of lakes in the Solimões River floodplain also indicates a major shift in this river course toward the South. By comparison with the *ria* lakes of the Solimões River, it is also suggested that the Madeira River shifted its course to the East and during this process, the left margin tributaries were progressively abandoned. These ancient fluvial morphologies have provided a different geological substrate in which the open vegetation has growth. Previous studies within the Brazilian Amazon have also related open vegetation patches with depositional sites that have been active during the late Quaternary.

Palavras-chave: remote sensing, fluvial *ria* lake, open vegetation, paleomorphologies.

1. Introdução

Manchas de vegetação aberta em contraste brusco com a floresta tropical densa são bem conhecidas nas áreas de terras baixas amazônicas (Takeuchi, 1960 SanaiottI et al., 2002) e comumente têm sua gênese associada a períodos glaciais pleistocênicos, quando o clima era mais seco relativamente ao atual (Haffer e Prance, 2001). Trabalhos recentes em áreas distintas da Amazônia baseados em dados de subsuperfície (Rossetti et al., 2010) e sensoriamento remoto (Bertani, 2011; Hayakawa et al., 2010) tem sugerido que mudanças na organização dos sistemas de drenagem durante o Quaternário implicam na presença de manchas de vegetação aberta em áreas de concentração de morfologias fluviais e sistemas deposicionais abandonados. Isto se deve a controles estruturais exercidos por áreas de subsidência ativa e sua influência na configuração dos elementos da paisagem.

Estas feições podem apresentar comprimento e largura similares a rias fluviais, estas também tipicamente encontradas na região amazônica, sendo localizadas relativamente próximas aos cursos fluviais principais. Rias fluviais consistem em lagos derivados de drenagens de tributários com padrão dendrítico que foram bloqueados por agradação acelerada nas proximidades da desembocadura com o rio principal (Holz et al., 1979). Sua origem ainda é debatível, porém, mais comumente tem-se atribuído sua origem a oscilações eustáticas pós-glaciais (Irion, 2010), sendo que a conformação destes lagos na paisagem é relacionado com a presença de estruturas neotectônicas (Dumont et al., 1991; Sternberg, 1955). Isto se deve a configurações de agrupamento destes lagos, as quais acompanham o eixo superimposto da bacia, evidenciando a diferença destes em relação a lagos erosivos em planícies de inundação.

A extração de superfícies de água é um tipo de aplicação bastante difundido entre imagens multiespectrais. Lagos de até 0.6 hectare podem ser detectados imagens Landsat TM e alargamentos de canais fluviais de até 3-5 metros de largura (France et al., 1986). A baixa refletividade de superfícies de água, principalmente na região do infravermelho, faz com que as bandas TM4 e TM5 tornem-se ideais para delineamento de lagos e meandros abandonados por proporcionar grande contraste em relação a outros alvos (Frazier e Page, 2000). A utilização de informações sobre a forma e geometria de lagos e superfícies de água a partir de conjuntos de *pixels* permite identificar características de processos fluviais atuantes, bem como realizar estudos da evolução de planícies fluviais em áreas tropicais (Paira e Drago, 2007; Rozo et al., 2012). Similarmente, apesar de limitações como a média resolução espacial das bandas multiespectrais (30 metros) e baixa resolução temporal (16 dias), estes dados têm sido aplicados, com sucesso, em mapeamentos de vegetação amazônica, principalmente em nível de comunidades vegetais, com exatidão média a alta (Salovaara et al., 2005).

Este trabalho propõe a utilização de dados de sensoriamento remoto para ampliar a caracterização morfológica de manchas alongadas de vegetação aberta e de rias fluviais modernas em áreas distintas da Amazônia brasileira. O objetivo principal foi verificar se essas ocorrências de vegetação aberta podem estar relacionadas a paleomorfologias representativas do abandono de rias fluviais pretéritas. O cálculo de atributos geométricos serviu de base para identificar características morfológicas úteis para a elaboração de um modelo que explica sucessões florísticas em função de alterações progressivas relacionadas com o abandono de rias fluviais durante o final do Quaternário.

2. Material e métodos

Duas áreas foram selecionadas para o presente estudo (Figura 1). Uma inclui área com grande concentração de lagos e rias fluviais modernas no baixo rio Solimões (centro do Estado do Amazonas). A outra corresponde a um conjunto de manchas de vegetação aberta às margens do rio Madeira (sul do Estado do Amazonas**).**

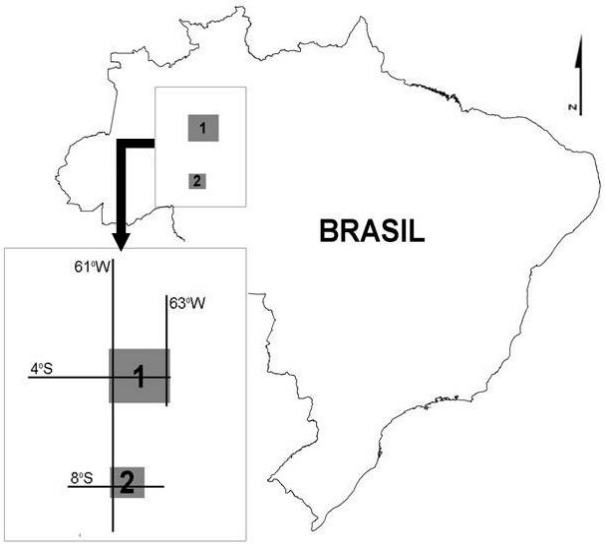


Figura 1. Localização das áreas selecionadas para o estudo. A área 1 indicada no mapa corresponde ao entorno de um segmento do rio Solimões e a área 2 ao entorno de um segmento do rio Madeira, ambas situadas no oeste da Amazônia brasileira.

Foram utilizados, como fonte primária de informações, dados de sensoriamento remoto que incluíram mosaico de imagens multiespectrais adquiridas pelo sensor TM do satélite Landsat-5 para as áreas de estudo. Essas imagens fazem parte do arquivo global do Serviço

Geológico dos Estados Unidos (USGS) e seu acesso é livre no endereço eletrônico http://eros.usgs.gov/. As imagens são corregistradas e geometricamente corrigidas, com nível de processamento L1T. Outros produtos de sensoriamento remoto utilizados correspondem a imagens de radar adquiridas pelo *Japanese Earth Resource Satellite*-1 (JERS-1), derivadas em banda L (23,5 cm) e com polarização HH; e Modelo Digital de Elevação (MDE) em resolução espacial de 3" (aproximadamente 90 m) adquirido em banda C (5,6 cm) pela *Shuttle Radar Topography Mission* (http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/cbanddataproducts.html).

Os dados disponíveis foram utilizados de forma simultânea no aplicativo *Definiens Developer* (Lang e Tiede, 2007), sendo que as bandas multiespactrais foram segmentadas e utilizadas para extração de superfícies de água e vegetação aberta. Para esta segmentação utilizou-se o algoritmo de segmentação multirresolução (Baatz e Schäpe, 2000), posteriormente definindo-se limiar para extração de superfícies de água a partir dos valores de *pixels* da banda TM5 e vegetação aberta, a partir dos valores da banda TM4. Após a fusão dos limites internos dos conjuntos de *pixels* classificados, foram eliminados os de área inferior a 1000 *pixels*, bem como os cursos fluviais ativos. Em seguida, os corpos d'água foram separados em grupos a partir da localização ou áreas de concentração. Para delimitação das áreas menos elevadas e sujeitas a inundação nos períodos de cheia, aplicou-se o segmentador *Spectral Difference Segmentation* para criação de estratos altimétricos a partir dos valores de elevação do MDE. Estas áreas correspondem, de forma aproximada, às planícies de inundação atuais e pretéritas dos rios principais.

Para as manchas de vegetação aberta e corpos d'água, calcularam-se 30 atributos (Tabela 1) relativos à forma (geometria) e distribuição espacial dos *pixels*. A ferramenta estatística principal utilizada pelo aplicativo para o cálculo dos valores para um conjunto de *pixels* **S** consistiu de matriz de covariância, obtida pela Equação 1:

$$S = \begin{pmatrix} Var\,(X) & Cov(XY) \\ Cov(XY) & Var(Y) \end{pmatrix} \quad (1)$$

As grandezas absolutas de área e distância obtidas a partir de objetos vetorizados na imagem *raster* foram utilizadas para o cálculo dos atributos geométricos, bem como de retângulos, círculos e elipses envolventes. Adicionalmente, os valores de alguns atributos teve como base a divisão do objeto a partir de uma linha principal e ramificações. Esta divisão foi obtida pela triangulação *Delaunay*, sendo que cada ponto médio dos triângulos criados corresponde a um nó. Mais detalhes sobre o cálculo destes atributos podem ser encontrados em Definiens (2007).

Tabela 1. Atributos utilizados para descrever os corpos d'água e áreas de vegetação aberta.

1-Área	11-Índice de borda	21-Comprimento médio das arestas
2-Comprimento de borda	12-Compacidade	22-Comprimento da aresta mais longa
3-Comprimento	13-Densidade	23-Número de arestas
4-Comprimento/espessura	14-Elipsidade	24-Número de polígonos internos
5-Comprimento/largura	15-Direção principal	25-Perímetro
6-Número de *pixels*	16-Raio da maior elipse envolvente	26-Auto-intersecção (polígono)
7-Espessura	17-Raio da menor elipse envolvente	27-Comprimento médio das ramificações
8-Volume	18-Retangularidade	28-Curvatura/comprimento
9-Largura	19-Circularidade	29-Grau de ramificação
10-Assimetria	20-Índice de forma	30-Comprimento da linha principal

Em seguida, utilizou-se o algoritmo *InfoGain* disponível no aplicativo *Weka* (Hall et al., 2009) para seleção de atributos. Esta etapa teve como objetivo identificar a semelhança entre atributos que descrevem de forma mais eficiente as propriedades geométricas e espaciais de rias fluviais, lagos de erosão e manchas de vegetação aberta selecionados.

3. Resultados e Discussão

A segmentação das imagens de sensoriamento remoto e a criação de limiares através dos valores dos *pixels* nas imagens multiespectrais permitiu extrair satisfatoriamente as feições correspondentes a superfícies de água e áreas de vegetação aberta em ambas áreas estudadas. As imagens JERS-1 foram utilizadas para análise visual e sobrepostas ao MDE, sendo que foram delimitados pacotes altimétricos a partir de valores de altitude para identificar áreas topograficamente rebaixadas em relação ao restante da cena (Figura 2).

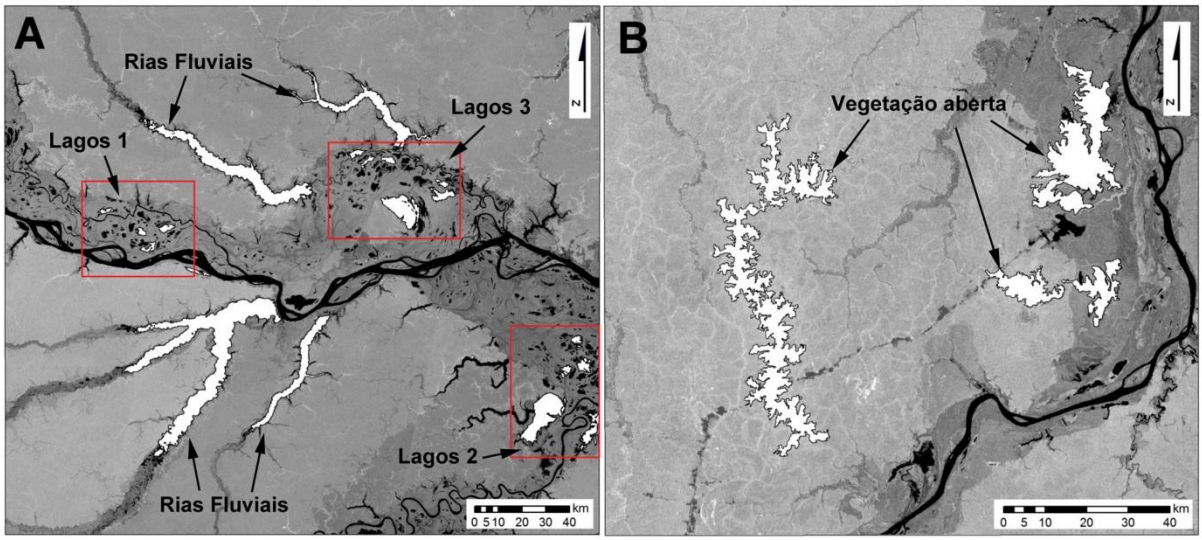


Figura 2. Imagem JERS sobreposta a dados altimétricos extraídos de MDE utilizando-se 25% de transparência. Esquerda: A) Concentração de lagos e rias fluviais no entorno do rio Solimões (Área 1). Direita: B) Manchas de vegetação aberta no entorno do rio Madeira (Área 2). As áreas em branco correspondem às feições selecionadas para o estudo. Tons de cinza mais escuros correspondem a áreas topograficamente rebaixadas.

A análise visual dos corpos d'água na área 1 revelou sua distribuição de acordo com quatro grupos principais. O grupo que ocupa a maior área corresponde às rias fluviais, cujas dimensões individuais alcançam cerca de 80 km de extensão por aproximadamente 10 km de largura. Os outros três grupos correspondem a concentrações de lagos situados na planície aluvial do rio Solimões, referidos como Lagos 1, Lagos 2 e Lagos 3 (Fig. 2A). Lagos individuais dentro dos agrupamentos propostos podem alcançar comprimento de até 10 km com largura de aproximadamente 5 km, sendo separados por distâncias de até algumas dezenas de quilômetros. As manchas de vegetação aberta localizadas na área 2 (Fig. 2B) exibem dimensões inidividuais de até 85 km de comprimento e 20 km de largura. Apesar dos segmentos apresentarem dimensões e geometrias bastante distintas, estes foram mantidos como um grupo único, reflexo das características geométricas das manchas de vegetação aberta (Figura 3). É interessante observar que as terminações das rias fluviais são notavelmente paralelas aos limites das planícies de inundação em ambas as margens do rio Solimões e as terminações dos segmentos de vegetação aberta apresentam orientação paralela ao rio Madeira.

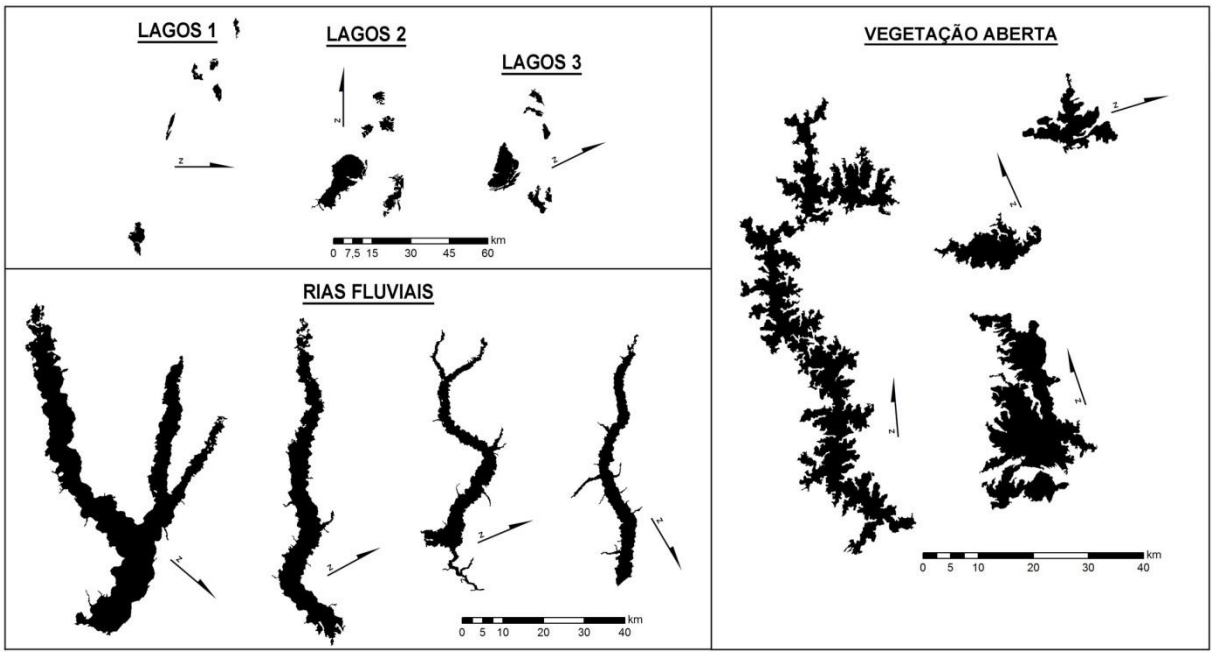


Figura 3. Agrupamento de feições realizado a partir de análise visual anterior à seleção de atributos geométricos.

A seleção de atributos realizada pelo algoritmo *InfoGain* indicou seis atributos como os mais pertinentes para individualização dos grupos criados (Figura 4). Apesar da aparente diferença nas dimensões absolutas, como Área, Comprimento e Largura, os atributos Número de arestas e Compacidade foram indicados como os mais pertinentes para separação dos grupos. Nota-se que estes exibem valores bastante similares para os grupos Vegetação Aberta e Rias fluviais, em contrapartida aos grupos que compõem os agrupamentos de lagos. Esta mesma relação pode ser observada, embora de forma mais suave, nos demais atributos apresentados. Os resultados aqui apresentados permitem propor que pelo menos uma importante parcela dos contrastes vegetacionais dessa região coincidem com limites paleomorfologias fluviais preservadas na paisagem.

A configuração das rias do rio Solimões e sua similaridade morfológica com as manchas de vegetação aberta mapeadas na margem esquerda do rio Madeira são sugestivos de processos de formação similares. Observando-se a concentração dos lagos nas planícies aluviais ao longo do rio Solimões é possível especular que houve deslocamento do curso do rio principal para sul, resultando em grande paleovárzea abandonada em sua margem esquerda, como descrito também anteriormente (Latrubesse e Franzinelli, 2002). Por comparação com as rias do rio Solimões, interpreta-se que o rio Madeira também mudou sua posição com o tempo, ocupando posição a leste de seu curso original na área de estudo. À medida que este processo ocorreu, seus tributários da margem esquerda tiveram suas desembocaduras bloqueadas por sedimentação aluvial, transformando-se em rias, que foram progressivamente abandonadas e colmatadas com o tempo, Estes sítios deposicionais recentes serviram de sustrato para o desenvolvimento de vegetação aberta. Um estudo prévio registrou um desvio do curso principal do rio Madeira de mais de 100 km a nordeste da área de estudo (Hayakawa et al., 2010). Este processo pode ter bloqueado as desembocaduras dos tributários, causando o afogamento dos sistemas de drenagem e, consequentemente, originando rias fluviais. A finalização das paleomorfologias relacionadas com rias fluviais em distâncias equivalentes do rio Madeira reforça estas interpretações.

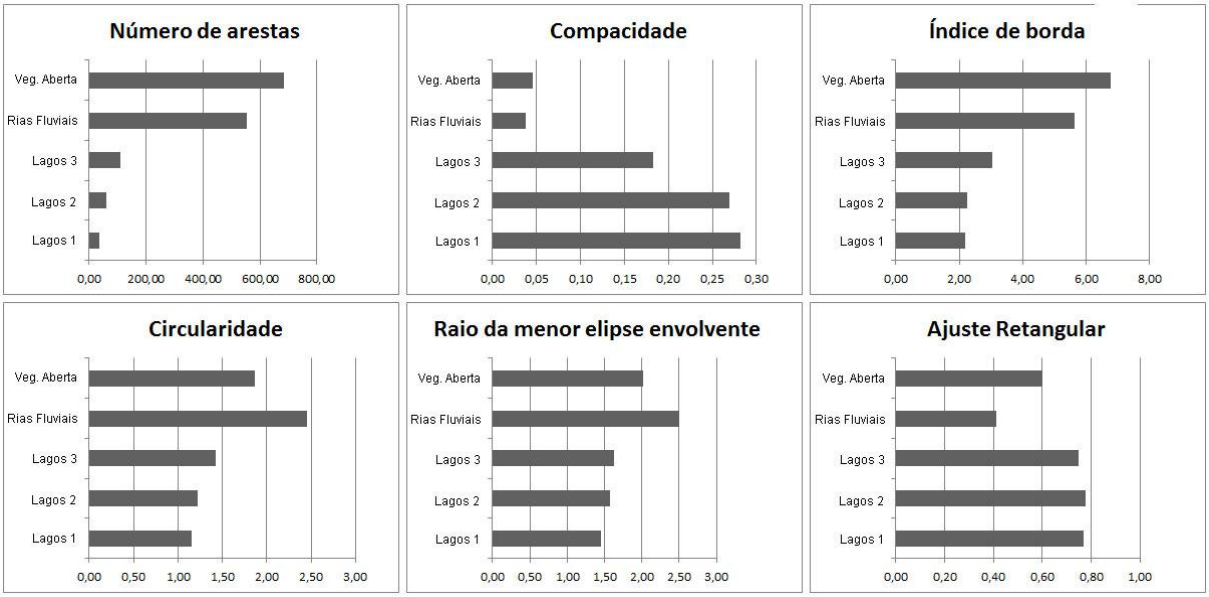


Figura 4. Valores dos atributos indicados como os mais pertinentes para separação dos agrupamentos realizados. Notar que os atributos Número de arestas e Compacidade exibem grande competência para diferenciar os grupos de lagos das rias fluviais e manchas de vegetação aberta, sendo que as últimas possuem maior similaridade geométrica entre si como também observado em menor grau nos demais valores de atributos.

Existem diferentes hipóteses para a origem de rias na bacia amazônica, sendo que algumas delas incluem o fator tectônico (Sternberg, 1950). De acordo com esses autores, a gênese de rias fluviais implica na presença de zonas de falhas e movimentação de blocos. Entretanto, informações adicionais, principalmente referentes à análise morfoestrutural detalhada, serão necessárias para se discutir melhor estas interpretações. Entretanto, é interessante mencionar que estudos prévios em outras áreas amazônicas registram o relacionamento de manchas de vegetação aberta com sítios deposicionais que se mantiveram ativos durante o Quaternário tardio (Rossetti et al., 2010, 2012). Esses estudos, em combinação com o presente estudo, permitem concluir que a história geológica pode influenciar no desenvolvimento de padrões vegetacionais atuais na Amazônia à medida que a dinâmica dos elementos do sistema fluvial favorece o abandono de morfologias, resultando em substratos com características geológicas, pedológicas e topográficas diferenciadas de seu entorno.

4. Conclusões

Os dados de sensoriamento remoto analisados permitiram extrair e comparar características geométricas de feições peculiares em meio à floresta tropical densa amazônica. A comparação de manchas de vegetação aberta nas margens do rio Madeira com rias fluviais modernas levou à interpretação das primeiras como antigas rias fluviais abandonadas. Estudos futuros são necessários para melhor caracterizar as áreas relacionadas com as paleorias fluviais caracterizadas neste estudo com base em informações sedimentológicas de subsuperfície. Importante, também, será a datação dos sedimentos, a fim de se estabelecer o tempo de formação e abandono dessas rias na paisagem amazônica, o que será de grande relevância para entender seu processo de formação.

5. Bibliografia

BAATZ, M.; SCHÄPE, A. Multiresolution segmentation: an optimization approach for high quality multi-scale image segmentation. In: ANGEWANDTE GEOGRAPHISCHE INFORMATIONSVERARBEITUNG, 12, 2000, Heibelberg. **Proceedings...** Heidelberg: Wichmann-Verlag, 2000.

BERTANI, T. C. **Sensoriamento remoto aplicado ao mapeamento de paleomorfologias no interflúvio Madeira-Purus, sudoeste da Amazônia brasileira**.104p. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). São José dos Campos: INPE, 2011.

DEFINIENS. **Definiens developer 7**: reference book. Munique: Definiens AG, 2007. 197 p. Versão do documento: 7.0.2.936.

DUMONT, J. F.; DEZA, E.; GARCIA, F. Morphostructural provinces and neotectonics in the Amazonian lowland of Peru. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 4, p. 373-381

FRANCE, M. J.; COLLINS, W. G.; CHINDELEY, T. R. Extraction of hydrological parameters from Landsat Thematic Mapper Imagery. In: 20th International symposium on Remote Sensing of environment. **Proceedings…** p. 1165-1173, 1986.

FRAZIER, P. S.; PAGE, K. J. Water body detection and delineation with Landsat TM data. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 66, p. 1461-1467, 2000.

HAFFER, J.; PRANCE, G. T. Climatic forcing of evolution in Amazonia during the Cenozoic: On the refuge theory of biotic differentiation. **Revista do Instituto de Estudos Avançados da Universidade de São Paulo**, v. 46, p. 1-33, 2001.

HALL, M.; FRANK, E.; HOLMES, G.; PFAHRINGER, B.; REUTEMANN, P.; WITTEN, I. H. The WEKA Data Mining Software: An Update. **SIGKDD Explorations**, v. 11, n. 1, 2009.

HAYAKAWA, E. H.; ROSSETTI, D. F.; VALERIANO, M. M. Applying DEM-SRTM for reconstructing a late Quaternary paleodrainage in Amazonia. **Earth and Planetary Sciences Letters**, v. 297, p. 262-270, 2010.

HOLZ, K. R.; BAKER, V. R.; SUTTON, S. M.; PENTEADO-ORELLANA, M.M. South American river morphology and hydrology: **NASA Special Publication 412, Apollo-Soyuz Test Project Summary Science Erport**, v. 2, p. 545-594, 1979.

IRION, G.; KALLIOLA, R. Long-term landscape development processes in Amazonia. In: Hoorn, C.; Wesselingh, F. **Amazonia: Landscape and Species Evolution: A Look into the Past**. Oxford: Wiley & Blackwell, 2010. Cap. 11, p. 185-197.

LANG, S.; TIEDE, D. Definiens developer. **GIS Business**, v. 9, p. 34-37, 2007.

LATRUBESSE, E. M.; FRANZINELLI, E. The holocene alluvial plain of the middle Amazon river, Brazil. **Geomorphology**, v. 44, p. 241-57, 2002.

PAIRA, A. I.; DRAGO, E. C. Origin, evolution, and types of floodplain water bodies. In: Iriondo, M. H.; Paggi, J. C.; Parma, M. J. **The Middle Paraná River: Limnology of a Subtropical Wetland**. Springer-Verlag: Berlin, 2007. Cap. 4.

ROSSETTI, D.; ALMEIDA, S.; AMARAL, D.; LIMA, C. M.; PESSENDA, L. Coexistence of forest and savanna in an Amazonian area from a geological perspective. **Journal of Vegetation Science**, v. 21, n. 1, p. 120-132, 2010.

ROSSETTI, D. F.; BERTANI, T. C.; ZANI, H.; CREMON, E. H.; HAYAKAWA, E. H. late Quaternary sedimentary dynamics in Western Amazonia: Implications for the origin of open vegetation/forest contrasts. **Geomorphology** (online), 2012.

ROZO, M. G.; NOGUEIRA, A. C. R.; TRUCKENBRODT, W. The anastomosing pattern and the extensively distributed scroll bars in the middle Amazon River. **Earth Surface Processes and Landforms** (online), 2012.

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.

SANAIOTTI, 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.

STERNBERG, H. O. Sismicite et morphologie en Amazonie bresilienne. Annales de Geographie, v. 342, p. 97-105, 1955.

STERNBERG, H. O. Vales tectônicos na planície amazônica? **Revista Brasileira de Geografia**, v. 12, n. 4, p. 511-531, 1950.

TAKEUCHI, M. A estrutura da vegetação na Amazônia. II - As savanas do Norte da Amazônia. **Boletim do Museu Paraense Emilio Goeldi**, v. 7, p. 3-14, 1960.