

Análise multitemporal da dinâmica fluvial do Rio Solimões no trecho entre Manaus e Codajás (Amazônia Ocidental) por meio de imagens Landsat-5/TM

Marcel Silva Passos¹
Emílio Alberto Amaral Soares¹

¹ Universidade Federal do Amazonas - UFAM
Caixa Postal 69077-000 - Manaus - AM, Brasil
marcel.silva.k2@gmail.com
easoares@ufam.edu.br

Abstract: Several studies have analyzed geomorphological features of the Solimões River through remote sensing images and letters of ancient navigation. Among the most emphasized factors, there is the rate of migration of the river channel and directly related to the style of deposition and erosion processes, influencing subsistence agriculture and construction projects. Therefore, this work demonstrates through multitemporal analysis of Landsat-5/TM fluvial evolution of the Solimões River in the stretch between Manaus and Codajás, between the years 1991 and 2011. According to the data obtained, it was possible to demonstrate the light predominance of depositional processes in relation to erosion in the stretch of analyzed channel, with areas of 8.56 km²/year and 6.86 km²/year, respectively, thus obtaining an average migration of 0.32%/ year. Depositional processes focus on the convex part of the intricacies and areas downstream of islands and erosion on the concave part of the intricacies and upstream of the islands, which usually occurs the phenomenon of "Terras Caídas". Although the dynamics of erosion and deposition observed in the Solimões River in the period of about 20 years, it is possible to observe a high standard of channel stability in the stretch analyzed, characteristic of fluvial style anabranching this river presents.

Keywords: Remote Sensing, Fluvial Terraces, Quaternary Deposits, Anabranching.

1. Introdução

Na região entre Manaus e Codajás, foco deste trabalho, a evolução quaternária do sistema fluvial Solimões-Amazonas permitiu o desenvolvimento de 3 níveis de terraços fluviais de disposição assimétrica, com idades entre 65 a 7,5 mil anos AP, desenvolvidos sobre as rochas siliciclásticas das formações Alter do Chão (Cretáceo) e Novo Remanso (Mioceno), que compõem o embasamento geológico desta região (Soares *et al.*, 2010).

Desde a década de 60, a caracterização geomorfológica deste sistema fluvial tem sido feita com base em imagens de Radar (Projeto Radam Brasil) e produtos de sensores remotos multiespectrais. Nos últimos anos, a análise multitemporal destes produtos tem ajudado a entender a dinâmica fluvial holocênica, como demonstrado em alguns estudos (Mertes *et al.*, 1996; Rozo, 2004, Rozo *et al.*, 2005; Rozo *et al.*, 2012; Passos *et al.*, 2013; Passos & Soares, 2013; Rozo *et al.*, 2014), onde foi constatado o elevado padrão de estabilidade do sistema fluvial Solimões-Amazonas nas últimas décadas, entre os rios Purus e Madeira. Em geral, os processos erosivos nos barrancos deste sistema, provocam transtornos constantes às comunidades ribeirinhas, sendo marcados por desmoronamentos, os quais têm sido associados ao fenômeno das "Terras Caídas" por Carneiro *et al.* (2009). Este termo é utilizado na Amazônia para caracterizar os processos naturais de erosão fluvial, gerados a partir da erosão da base das encostas, que causam ruptura, solapamento e o desmanche das margens dos rios por desmoronamentos e escorregamentos (Ladabessa, 2011).

Portanto, visando corroborar com os estudos de dinâmica fluvial quaternária na Amazônia, este trabalho visa estudar o trecho do Rio Solimões, compreendido entre Manaus e Codajás, especificando e quantificando as áreas de erosão e deposição, bem como a taxa de migração do canal, por meio da análise multitemporal de imagens ópticas Landsat-5/TM dos últimos 20 anos.

2. Metodologia

A análise multitemporal do trecho entre Manaus e Codajás utilizou imagens do sensor Landsat-5/TM, escolhidas em função da maior variação temporal, menor cobertura de nuvens e menores cotas do Rio Solimões no site do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Neste contexto foram utilizadas as imagens nas datas de 12/11/1991, 27/09/1995, 29/11/2009 e 25/10/2011, com cotas de 720 cm, 770 cm, 801 cm e 826 cm, respectivamente.

As imagens foram processadas na composição colorida 543 (RGB) do sensor Landsat-5/TM, que mostra maior diferenciação entre solo, vegetação e água permitindo assim uma melhor identificação dos aspectos geomorfológicos, conforme enfatizado por Rosa (2007). O georreferenciamento das imagens foi efetuado com base nas imagens do mesmo sensor, obtidas pelo site da *U.S. Geological Survey*. Posteriormente, as imagens brutas foram submetidas aos processos de correção atmosférica, visando minimizar o efeito de dispersão da energia eletromagnética nas partículas de água suspensas na atmosfera e aumento linear de contraste, para a obtenção da máxima variância do histograma, gerando um melhor contraste na composição colorida.

Devido a grande extensão da área de estudo, optou-se pela sua divisão nas áreas 1, 2 e 3. A área 1 limita-se entre Manaus e Manacapuru, a 2 entre Manacapuru e Anori e a 3 entre Anori e Codajás. Nas áreas 1 e 2 foram utilizadas as imagens de 1995 e 2011, e na área 3 imagens de 1991 e 2009, onde foram criados dados vetoriais do canal (ilhas e margens). Sobrepondo os dados vetoriais atuais sobre os antigos (2009-1991 e 2011-1995) e os antigos sobre os atuais, obtiveram-se as áreas de erosão e deposição, respectivamente. Para o cálculo de taxa de migração dos canais, ilhas e margens, utilizou-se a diferença das áreas dos vetores das imagens antigas (1991 e 1995) e das atuais (2011 e 2009), sendo o resultado recalculado em porcentagem anual.

3. Resultados e Discussão

Este trabalho apresenta a análise multitemporal do Rio Solimões utilizando imagens de 12/11/1991, 27/09/1995, 29/11/2009 e 25/10/2011 do sensor Landsat-5/TM no trecho entre Manaus e Codajás (Amazônia Ocidental). Os dados forneceram informações geomorfológicas que demonstraram as mudanças de erosão e deposição ocorridas nas ilhas e margens, cuja integração dos dados indica mudanças ocorridas na morfologia do canal do Rio Solimões, conforme demonstrados nas tabelas 1 e 2.

Tabela 1. Áreas de erosão e deposições anuais obtidas.

Região/Área	Margens			
	Área Inicial	Área Final	Erosão	Deposição
Area 1	29,58 km ²	29,44 km ²	1,82 km ²	1,53 km ²
Área 2	31,01 km ²	31,26 km ²	0,96 km ²	1,21 km ²
Área 3	33,12 km ²	33,89 km ²	0,42 km ²	1,20 km ²
TOTAL	93,72 km ²	94,60 km ²	3,20 km ²	3,94 km ²
Região/Área	Ilhas			
	Área Inicial	Área Final	Erosão	Deposição
Área 1	9,62 km ²	10,32 km ²	1,29 km ²	2,26 km ²
Área 2	10,16 km ²	10,05 km ²	1,47 km ²	1,36 km ²
Área 3	17,50 km ²	17,61 km ²	0,89 km ²	1,00 km ²
TOTAL	37,29 km ²	37,98 km ²	3,66 km ²	4,62 km ²
Região/Área	Canal			
	Área Inicial	Área Final	Erosão	Deposição
Área 1	19,96 km ²	19,12 km ²	3,11 km ²	3,79 km ²
Área 2	20,85 km ²	21,21 km ²	2,44 km ²	2,57 km ²
Área 3	15,62 km ²	16,28 km ²	1,31 km ²	2,19 km ²
TOTAL	56,43 km ²	56,61 km ²	6,86 km ²	8,56 km ²

Tabela 2. Taxas de migração anuais obtidas.

Local	Região			
	Área 1	Área 2	Área 3	TOTAL
Margens	0,49%	0,81%	2,33%	0,94%
Ilhas	7,27%	1,10%	0,61%	1,86%
Canal	4,23%	1,73%	4,26%	0,32%

As áreas estudadas estão ilustradas na Figura 1. A análise multitemporal das áreas 1 e 2 utilizou imagens de 27/09/1995 e 25/10/2011, com variação temporal de 16 anos. Na área 3 utilizou-se imagens de 12/11/1991 e 29/11/2009, com variação temporal de 18 anos.

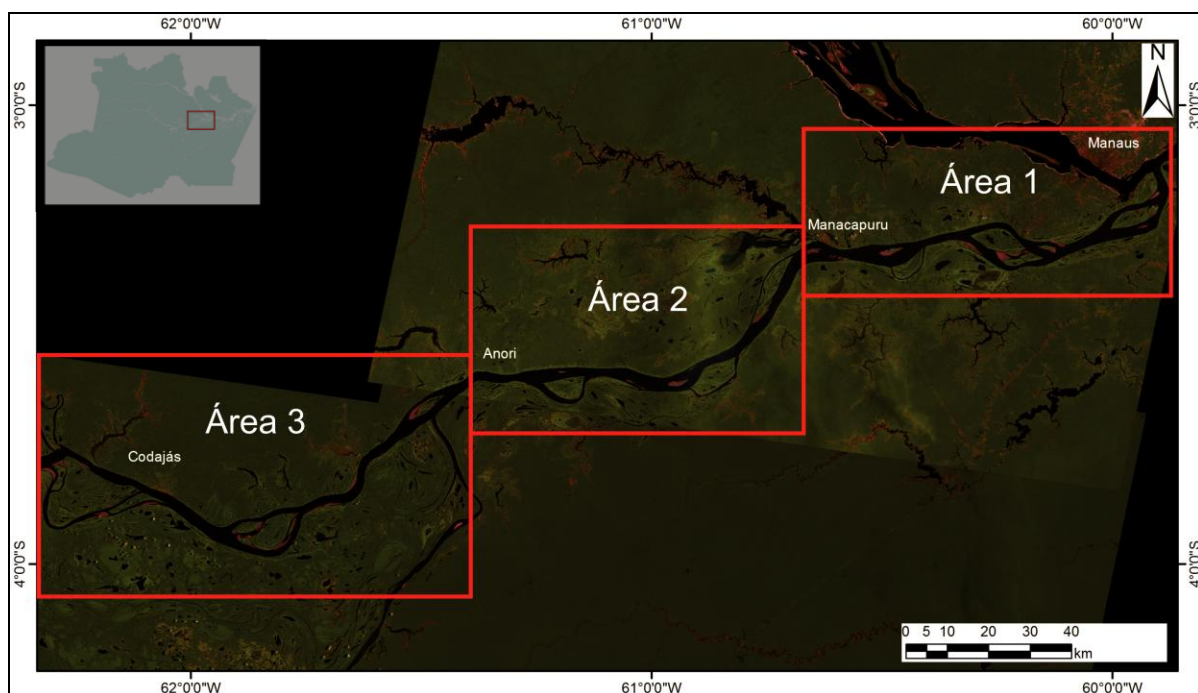


Figura 1. Imagens Landsat-5/TM mostrando as áreas 1, 2 e 3 no trecho do Rio Solimões, entre Manaus e Codajás.

Por meio da integração dos dados das áreas 1, 2 e 3 foi gerado um mapa integrando as áreas de erosão (Figura 2 e 3) e deposição (Figura 4 e 5) do trecho estudado do Rio Solimões (Figura 6). Em geral, houve predominância dos processos deposicionais nas margens (3,94 km²/ano), ilhas (4,62 km²/ano) e no canal (8,56 km²/ano), em relação aos erosivos, que apresentam os valores de 3,20 km²/ano (margens), 3,66 km²/ano (ilhas) e de 6,86 km²/ano (canal). Com base nestes dados foram obtidas taxas de migração de 0,94%/ano (margens), 1,86%/ano (ilhas) e de 0,32% (canal).



Figura 2. Zona de erosão na área 1, próximo ao município de Iranduba na margem direita do Rio Solimões.



Figura 3. Zona de erosão na área 1, próximo ao município de Manacapuru, demonstrando o desmoronamento de casa pelo fenômeno de "Terras Caídas".



Figura 4. Zona de deposição na área 2, próximo ao município de Anori, mostrando barras arenosas com vegetação pioneira.

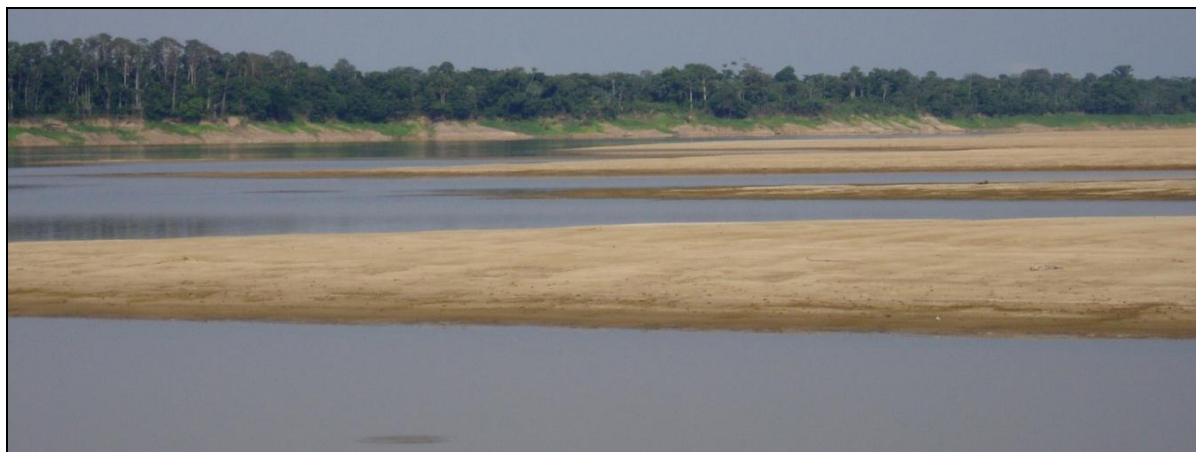


Figura 5. Zona de deposição na área 2, próximo ao município de Anori, mostrando barras arenosas não vegetadas.

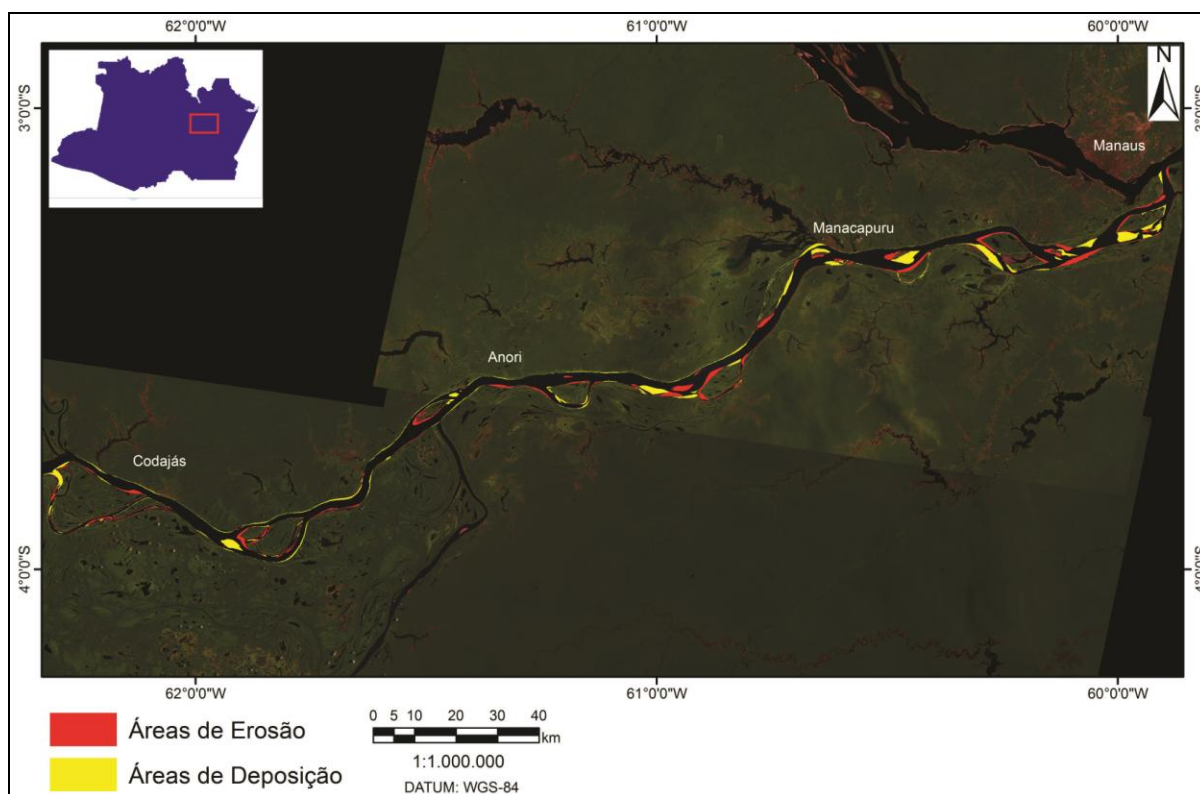


Figura 6. Imagem Landsat-5/TM da região entre Manaus e Codajás apresentando as áreas de erosão e deposição.

Conclusões

Por meio dos dados da análise multitemporal gerados pelas imagens Landsat-5/TM obtidas nos anos de 1991, 1995, 2009 e 2011, foi possível identificar as mudanças morfológicas ocorridas nas ilhas e margens do canal do Rio Solimões, no trecho entre Manaus e Codajás.

A integração das áreas 1, 2 e 3 no trecho estudado do Rio Solimões revelou a predominância dos processos deposicionais em relação aos erosivos, com áreas médias anuais de 8,56 km² e 6,86 km², respectivamente. Os cálculos de áreas nas ilhas e margens do canal do Rio Solimões permitiram sugerir que os processos erosivos foram mais atuantes na parte externa (côncava) dos meandros dos canais (principais e secundários) e a montante das ilhas, enquanto os processos deposicionais se concentraram na parte interna (convexa) dos meandros e a jusante das ilhas.

Os alinhamentos estruturais presentes na região foram definidos nos estudos de Igreja *et al.* 1990 e Latrubesse e Franzinelli, 2002. Estas feições controlam a direção dos fluxos das águas e o estilo fluvial, os quais influenciam na intensidade dos processos de deposição e erosão em trechos distintos do Rio Solimões.

Apesar da predominância dos processos de deposição em relação aos de erosão, a elevada estabilidade de 0,32%/ano dos limites do canal do Rio Solimões no trecho entre Manaus e Codajás, é condizente com a elevada taxa definida por Rozo (2004) e Rozo *et al.* (2012) para o trecho inicial do Rio Amazonas, entre a Ilha do Careiro (próximo a Manaus) e a confluência com o Rio Madeira (próximo a Itacoatiara), com taxas de migração de 0,7%/ano e 0,6%/ano, respectivamente. Rozo *et al.* (2014) definiu uma taxa de migração de 1,9% a 2% para o Rio Amazonas no Peru, entre Caballo Cocha (Peru) até Benjamim Constant (Brasil). Estas taxas de migração podem ser consideradas baixas quando comparadas a elevada taxa de migração de 37%/ano definida Kalliola *et al.* (1992), na porção inicial do Rio Amazonas (confluência dos rios Ucayali e Marañon), gerada possivelmente devido por basculamentos tectônicos.

A elevada taxa de estabilidade dos canais é condizente com o estilo fluvial *anabranching* definido por Latrubesse & Franzinelli (2002) para o sistema Solimões-Amazonas. Este estilo se caracteriza por uma rede interconectada de canais, separados por ilhas vegetadas e planícies de inundação, segundo as definições de Smith & Smith (1980), Makaske (2001) e Latrubesse *et al.* (2009). Até mesmo no período de enchente, onde parte das ilhas pode ser cobertas pelas águas de inundação, elas separam canais que mantêm uma independência ou identidade hidráulica-hidrológica. Os múltiplos canais, característicos deste estilo fluvial, induzem aos inúmeros processos de erosão de deposição observados ao longo dos canais (principais e secundários). O padrão de estabilidade dos canais, ilhas e margens do sistema Solimões-Amazonas é também denotado pela presença de sítios arqueológicos no topo da ilha do Careiro, a sudeste de Manaus, com cerca de 2.800 anos AP (Soares, 2007). Além disso, a composição predominantemente argilosa das ilhas e barras marginais deste sistema as torna mais coesas e dificultam a ação dos agentes erosivos (Soares, 2007).

As barras em pontal com estratificação heterolítica inclinada dos terraços fluviais do Rio Solimões, bem como a presença de paleocanais na planície, são característicos do estilo fluvial meandrante do Rio Solimões no Pleistoceno (Soares, 2007; Soares *et al.*, 2010), que difere do atual *anabranching*.

Referências

- Carneiro, D.S. Morfodinâmica do rio Solimões e implicações sociais: uma proposta de educação ambiental com o suporte das geotecnologias e do conhecimento tradicional. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 14, 2005, **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2009. Artigos, p. 2381-2387. CD-ROM.
- Igreja, H.L.S., Borges, M.S.; Alves, R.J.; Costa Jr, P.S.C.; Costa, J.B.S. Estudos neotectônicos nas ilhas do Outeiro e Mosqueiro, NE do Estado do Pará. In: Congresso Brasileiro de Geologia (CBG), 36, 1990, **Anais...** Natal, SBG, 1990. Artigos. v. 5, p. 2110-2123.
- Kalliola, R.; Salo, J.; Puhakka, M.; Rajasilta, M.; Häme, T.; Neller, R. J.; Rasänen, M.E.; Danjoy Arias, W.A. Upper Amazon channel migration. **Naturwissenschaften**, v. 79, p. 75-79, 1992.
- Ladabessa, A.S. "Terras Caídas", as causas naturais e antrópicas: uma ocorrência na comunidade de São Carlos - Médio Madeira/RO. **Revista do Programa de Pós-Graduação em Geografia – UEM**, v. 3, n. 1, p. 45-61. 2011.
- Latrubesse, E.M.; Franzinelli, E. The Holocene alluvial plain of the middle Amazon River, Brazil. **Elsevier Science B. V. Geomorphology**, v. 44, n.3-4, p. 241-257, 2002.
- Latrubesse, E.M.; Morais, R.P.; Aquino, S. The Geomorphologic response of a large pristine alluvial river to tremendous deforestation in the South American tropics: the case of the Araguaia River. **Geomorphology**, v. 113, p. 239-252, 2009.
- Makaske, B. Anastomosing rivers: a review of their classification, origin and sedimentary products. **Earth-Science Review**, v. 53, p. 149-196, 2001.

Mertes, L.A.K.; Dunne, T.; Martinelli, L.A. Channel-floodplain geomorphology along the Solimões-Amazon River, Brazil. **Geologica Society of America Bulletin**, v. 108, n. 9, p. 1089-1107, 1996.

Passos, M.S.; Soares, E.A.A.; Salazar, C.A. Análise bitemporal do Rio Solimões no trecho entre Manacapuru e Manaus (Amazônia Central) por meio de imagens Landsat-5/TM. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 16, 2013, **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2013. Artigos, p. 3627-3634. CD-ROM.

Passos, M.S.; Soares, E.A.A. Análise bitemporal do Rio Solimões no trecho entre Manacapuru e Codajás (Amazônia Ocidental) por meio de imagens Landsat-5/TM. In: Simpósio de Geologia da Amazônia (SGA), 13, 2013, **Anais...** p. 517-519.

Radam Brasil. **Departamento Nacional de Produção Mineral**. Folha SA 20-Manaus. Rio de Janeiro (Levantamento de Recursos Naturais, 18). 628 p. 1978.

Rozo, J.M.G. **Evolução Holocênica do Rio Amazonas entre a Ilha do Careiro e a foz do Rio Madeira**. MS Dissertation, Universidade Federal do Amazonas, Manaus-AM. 125 p. 2004.

Rozo, J.M.G.; Nogueira, A.C.R.; Carvalho, A.S. Análise multitemporal do sistema fluvial do Amazonas entre a ilha do Careiro e a foz do Rio Madeira. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 12, 2005, **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005. Artigos, p. 1875-1882. CD-ROM.

Rozo, J.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**, v. 37, p. 1471-1488. 2012.

Rozo M.G., Nogueira, A.C.R., Castro, C.S. Remote sensing-based analysis of the planform changes in the Upper Amazon River over the period 1986 e 2006. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 51, p. 28-44. 2014.

Rosa, R. **Introdução ao Sensoriamento Remoto**, 6^o edição, Universidade Federal de Uberlândia. 2007.

Smith, D.G.; Smith, N.D. Sedimentation in anastomosed river systems: examples from alluvial valleys near Banff, Alberta. **Journal of Sedimentary Petrology**, v. 50, p. 157-160. 1980.

Soares, E.A.A. **Depósitos pleistocenos da região de confluência dos rios Negro e Solimões, porção oeste de bacia do Amazonas**. Unpubl. Ph.D. Thes is. University of São Paulo, Brazil. 205 p. 2007.

Soares, E.A.A.; Silva, J.H.A.; Teixeira, S.G.; Riker, R.L. Sedimentação Quaternária nas regiões de Caapiranga, Anamá, Anori e Beruri, Amazônia Ocidental. In: Congresso Brasileiro de Geologia (CBG), 45, 2010, **Anais...** Belém: SBG, 2010. Artigos. CD-ROM.