

Uso integrado de dados multifontes de sensoriamento remoto aplicado ao mapeamento geológico detalhado da região de Vila Tancredo, Norte de São Félix do Xingu (PA), Província Mineral de Carajás.

Jefferson Jesus de Souza¹
Arnaldo de Queiroz da Silva¹
Jaqueline Alcântara dos Santos²
Carlos Marcello Dias Fernandes²

¹ Universidade Federal do Pará - UFPA
Caixa Postal 479 - 68440-000 - Belém - PA, Brasil
jeff_0110@hotmail.com / arnaldoq@ufpa.br / jk_alcantara@hotmail.com/
cmdf@ufpa.br/

Abstract

Technological advancement is providing equipment and more efficient methods for the collection, processing and analysis of images easier access to isolated areas of geological knowledge. Because of this, the use of techniques such as remote sensing, airborne geophysics to, and other remote capture methods besides processing digital images become useful for geologic study. Existing cartographic products on Amazon are limited to regional scales, representing a major challenge to the country to improve the geological knowledge of the region with great economic potential. This study aimed to contribute to the refinement of the geology of the region of São Félix do Xingu, inserted in the tectonic area of the Amazonian Craton. For this integration of optical Landsat, SAR R99B and DEM / SRTM which enabled the identification of geological features, such as regional structural arrangements and variations of lithological units were used products. The combination bands of the RGB channels and principal component analysis of Landsat images and the evaluation of textural elements in R99B image were conclusive of the delimitation fotointerpretadas units and the use of DEM / SRTM demonstrated efficiency in the extraction of structural elements of relief. The vegetation was the main obstacle encountered in the use of remote sensing data, the most affected being the optical data.

Palavras-chave: remote sensing, image processing, geology, sensoriamento remoto, processamento de imagens, geologia.

1. Introdução

O avanço tecnológico vem disponibilizando equipamentos e métodos cada vez mais eficientes para a coleta, processamento e análise de imagens. Devido a isso, o uso de técnicas como o sensoriamento remoto, a geofísica aerotransportada, e outros métodos remotos de captura além de processamento digital de imagens tornam-se úteis para o estudo geológico.

O aumento crescente da utilização do sensoriamento remoto no mapeamento geológico pode ser justificado pela sua capacidade em gerar produtos de ampla cobertura espacial, com rapidez, melhor precisão geométrica e custos competitivos. Essas vantagens se tornam mais expressivas para regiões que dispõem de poucos dados aerofotogramétricos, como a Amazônia. Trabalhos anteriores como de Lima (1995), Carvalho (1997), Paradella *et al.* (2000, 2005) e Silva *et al.* (2013) indicam resultados

promissores quanto ao uso desses produtos aplicados ao mapeamento geológico na Amazônia. Esta é uma região do país em grande parte de sua área tem cobertura cartográfica restrita a escalas regionais impondo um grande desafio ao país de melhorar o conhecimento geológico dessa região de grande potencial econômico mineral.

O objetivo desse trabalho foi investigar abordagens do uso combinado de dados óticos, radar e modelo digital de elevação às técnicas de mapeamento tradicional baseada na fotointerpretação para o refinamento da geologia da região ao norte da cidade de São Félix do Xingu, inserida no domínio tectônico do Cratón Amazônico.

1.1 Localização

A área de estudo se localiza próximo à Vila Tancredo Neves, a Norte do município de São Félix do Xingu (PA), sudeste do Estado do Pará. O acesso à esta área se dar, a partir da cidade de Xinguara, pela rodovia PA-279 até a cidade de S. Félix do Xingu (Figura 1). No contexto geomorfológico, a área investigada está inserida no domínio

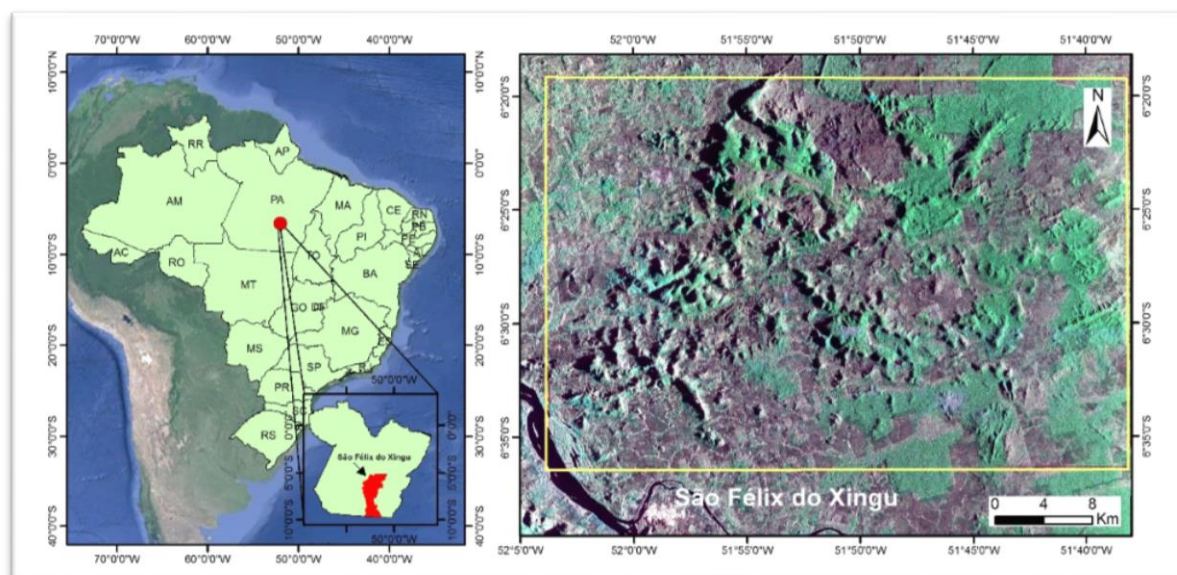


Figura 1: Mapa de localização da área de estudo (Fusão das imagens R99B-SAR e GeoEye)

denominado de Superfícies Aplainadas do Sul da Amazônia, composto predominantemente por superfícies aplainadas e, de forma restrita, no domínio de regiões dissecadas caracterizado por relevo colinoso. Destaca-se, ainda, significativo número de feições residuais em meio às superfícies aplainadas, tais como agrupamentos de *inselbergs*, pequenas cristas, *hogbacks* ou baixos alinhamentos de morrotes. A rede de drenagem apresenta um padrão dendrítico a subdendrítico. Solos pobres e bem drenados e vegetação densa. Contudo, a despeito da implantação de extensas áreas de terras indígenas, deve-se ressaltar o avanço da fronteira agrícola sobre essa vasta região (CPRM, 2013).

1.2 Geologia

A região de Vila Tancredo Neves ocorre no contexto do Cratón Amazônico (Almeida et al., 1981) e abrange porções arqueanas representadas por unidades do

Terreno Granito–*Greenstone* do Sul do Pará (TGGSP) e do Cinturão de Cisalhamento Itacaiúnas (Araújo et al., 1988), bem como conjuntos intrusivos máficos–ultramáficos e ácidos, paleoproterozóicos e mesozóicos, coberturas sedimentares plataformais mesoproterozóicas e coberturas sedimentares cenozóicas (Macambira & Vale, 1997; Lagler, 2011). O TGGSP é definido como um terreno de idade arqueana superior não retrabalhado pelo Cinturão de Cisalhamento Itacaiúnas; ocorre na porção S–SE da área estudada, sendo constituído por uma faixa orientada na direção NW–SE que se estende até a região de Rio Maria. É composto por rochas tonalíticas a monzograníticas, correlacionáveis ao Granodiorito Rio Maria (Medeiros et al., 1987).

O Cinturão Itacaiúnas ocupa a faixa central e nordeste da área de estudos separando o TGGSP do Médio Xingu (Macambira & Vale, 1997). Compreende conjuntos rochosos arqueanos e divide-se em domínios Imbricado e Transcorrente. O Domínio Imbricado inclui as rochas dos complexos Pium e Xingu, Grupo Sapucaia e Granito Plaquê; tem direção E-W e NW-SE mergulhando para NNE, NE e SSW em zonas de cisalhamentos dúcteis de baixo ângulo e movimentação sinistral na direção SW-NE. O Domínio Transcorrente divide-se em sistema Anaporã e Araraquara. O primeiro tem direção predominante E-W com movimentação sinistral NE-SW, NW-SE, de baixo ângulo formando duplexes compressivos assimétricos, com padrão estrutural elíptico, que apresenta internamente padrão divergente, com fortes mergulhos em direção ao centro do embaciamento abrangendo as rochas dos Grupos Grão-Pará, Aquiri e São Sebastião (Macambira & Vale, 1997). O Sistema Araraquara abrange as rochas do Grupo São Félix, Complexo Xingu e granito Plaquê em zonas de cisalhamento transcorrente com direção N-S e movimento dextral. Também são identificadas zonas de cisalhamento de cavalgamento oblíquo que definem uma estrutura *pull-a-part*, formando duas estruturas romboédricas separadas por um alto estrutural do complexo Xingu (Juliani, C. e Fernandes, C.M.D., 2010).

Os elementos estruturais do Proterozóico são formados por: 1) Feixes de falhas normais lítricas, de direção NW-SE e E-W subordinadamente, com forte caimento para NE - produto de reativação de antigas zonas de fraqueza crustal sendo as principais representantes as falhas de Campos Altos, Cocal, Floresta, Maguari, Carapanã; 2) Conjuntos de falhas transcorrentes NE-SW, ENE-WSW que resultaram na implantação da Bacia do Médio Xingu que abrigou o vulcano–plutonismo paleoproterozoico das formações Sobreiro e Santa Rosa e falhas transcorrentes N-S associadas à intrusão dos corpos máfico-ultramáficos. (Juliani, C. e Fernandes, C.M.D., 2010).

2. Material e Métodos

Foram utilizadas imagens óticas Landsat 5 e 8, imagens SAR do sensor aerotransportado R99B (Mura, 2007) e o Modelo Digital de Elevação MDE obtido na missão SRTM (Shuttle Radar Topography Mission). A Tabela 01 apresenta algumas características desses produtos.

As imagens Landsat TM passaram por correção atmosférica, antes da conversão da energia refletida em radiância para em seguida ser novamente convertida para reflectância. Este produto foi georreferenciado tomando como referência imagens geocover baixadas do site do Global Land Cover Facility – GLCF (<http://glcf.umd.edu/data/mosaic/>). Imagens geocover correspondem a imagens Landsat 7 (ETM) corrigidas geometricamente com precisão estimada apropriada para escala

1:100.000 (RMS < 50 m (Turcker et al, 2014). O georreferenciamento foi realizado com o empregado do modelo polinomial que utiliza um conjunto de pontos de controle de terreno (Ground Control Point – GCP)

Tabela 01. Características dos produtos de sensoriamento remoto utilizados

Produto	Sensor	Data	Órbita/Ponto	Resolução espacial
Landsat 5	MMS/TM	30/09/2010	225/064	Bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7 – 30m Banda 6 – 120m
Landsat 8	OLI/ETM+	23/08/2013	225/064	Bandas 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 9 – 30m Pan – 15m 10 e 11 – 100m
SAR	R99B		-	Banda L (HH,VV,HV,VH) – 16m
DEM/SRTM	Endeavour	02/2000	-	Banda C - 90 m

Para a imagem Landsat 8 o processamento aplicado foi apenas o georreferenciamento pois os dados foram adquiridos com correção atmosférica. A figura 2 apresenta de forma resumida o pré-processamento utilizado nas imagens Landsat.

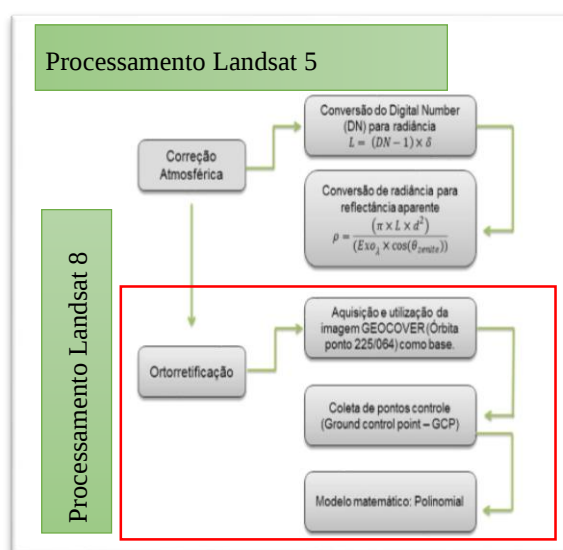


Figura 2 - Fluxograma esquemático do processamento das imagens Landsat 5 e 8. (δ = coeficiente de calibração ajustado para cada banda espectral; DN = número digital; d = distância Sol-Terra para o dia de aquisição; E_{s0k} = irradiância solar exoatmosférica ajustado a cada banda espectral; θ_{zenite} = ângulo de zênite solar)

As imagens R99B-SAR, por serem obtidas por plataforma aerotransportada, possuem valores elevados do ângulo de depressão o que acentua o ruído de padrão de antena. Por essa razão essas imagens passaram pela filtragem desse ruído por meio da técnica conhecida como correção do padrão de antena (Mura, J.C.; Correia, A.H.; Honda, P. 2007). Após esse procedimento as imagens SAR também foram georreferenciadas tendo novamente as imagens Geocover como referência.

Para as imagens Landsat foram testadas diferentes composições de bandas (associação das bandas espectrais com os canais de cor RGB) e análise por principais componentes, técnica que define um novo conjunto de imagens a partir da combinação linear das bandas originais visando reduzir a correlação entre as novas imagens (Silva, A. M, 2000).

Os dados MDE/SRTM utilizados foram adquiridos no site <http://glcf.umd.edu/data/mosaic/>, já corrigidos quanto a presença de vazios gerados na obtenção e processamento dos dados. A partir desse produto foram geradas imagens de relevo sombreado sobre diferentes combinações de ângulo de elevação e azimuth de visada. Variações nos valores desses ângulos resultaram em imagens que acentuam diferentes *trends* estruturais.

3. Resultados

Diferentes análises foram conduzidas no sentido de avaliar qual produto derivado de imagens produzidas por sensoriamento remoto melhor se aplica na identificação de unidades litológicas. A figura 3 mostra as combinações RGB que apresentaram melhor resultado quanto a diferenciação de unidades fotolíticas a partir de análise visual. A combinação R5G4B3, vista na Figura 3A, acentua a diferença entre áreas vegetada e solo exposto, mas ainda assim, apresenta limitações para o objetivo deste estudo devido à forte interferência da cobertura vegetal. Na Figura 3B tentou-se realçar a vegetação com a combinação R4G1B3, o que também resultou em um realce melhor da textura da imagem o que pode ser reflexo de variações litológicas. Nas Figuras 3C e 3D foram avaliadas combinações de imagens derivadas por principais componentes, em imagens do Landsat 5 e 8, respectivamente. O diferencial desse processamento foi o melhor realce dos aspectos texturais da imagem, como pode ser observado na Figura 3C (R-pc4 G-pc2 B-pc1). Os critérios cor e textura foram utilizados para estabelecer os limites entre as unidades fotointerpretadas, entretanto, a vegetação ainda limita a distinção entre as unidades.

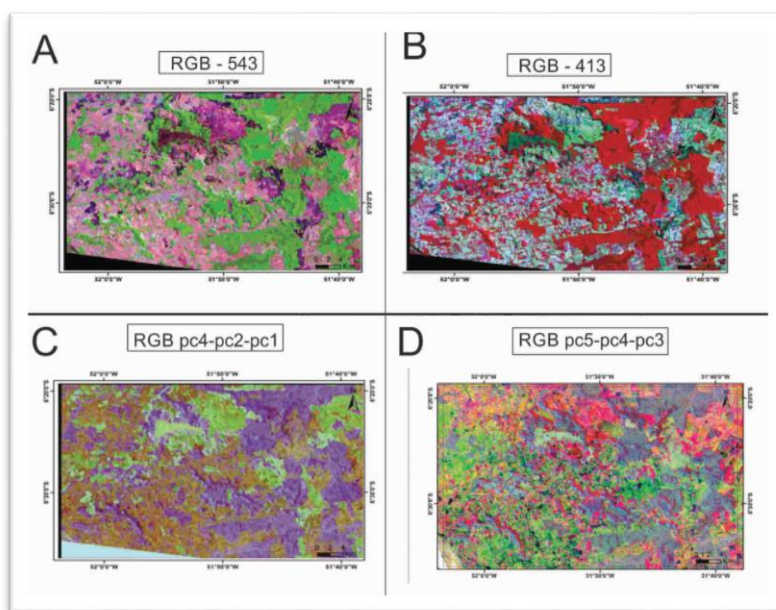


Figura 3: Em A imagem Landsat 5 com composição falsa cor R5, G4, B3. Em B composição R4G3B1 com realce da textura e área vegetada destacada em vermelho. Em C análise de principais componentes da Landsat 5 com composição R_{pc4}, G_{pc2} e B_{pc1} realçando a textura e em D análise de principais componentes da Landsat 8 com composição R_{pc5}, G_{pc4} e B_{pc3}.

Em relação as imagens óticas, as imagens SAR apresentaram melhor performance para delimitação de unidades fotolitológicas em função da sua maior capacidade em realçar a textura do terreno devido o retroespalhamento ser fortemente influenciado pela rugosidade dos alvos que tanto pode se manifestar em micro, macro e meso escalas. Em microescala a rugosidade superficial influencia na intensidade do sinal e é determinada pela relação entre a dimensão do comprimento de onda da radiação e a dimensão das irregularidades na superfície dos alvos. A rugosidade em macro e meso escalas são determinadas por variações na superfície topográfica, em escala decamétrica, e exerce forte influência no padrão textural da imagem (Dierking, 1999). Baseada na variação textural foi possível delimitar diferentes contatos nas imagens SAR, que é perceptível inclusive em regiões com cobertura florestal como mostra a figura 4.

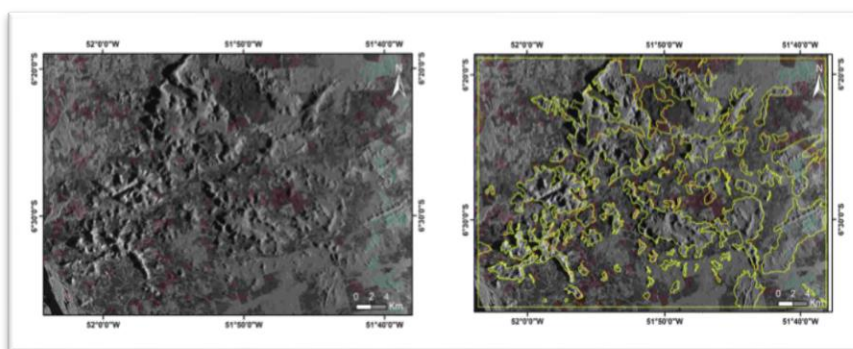


Figura 4: A esquerda, imagem da SAR-R99B (R-L_{hh} G-L_{hv} B-L_{vv}), e a direita, linhas amarelas definindo o contorno das unidades fotointerpretadas.

A extração dos elementos estruturais foi feita a partir da análise das imagens de relevo sombreado geradas com ângulo de elevação a 70° e com fonte de iluminação nos azimutes 45°, 135°, 245° e 315°. Dessas configurações, a imagem com iluminação a sudeste foi a que ressaltou melhor as feições estruturais (Figura 5). As estruturas apresentam direções preferenciais nas direções NE-SW e NW-SE, como mostra a figura 5.

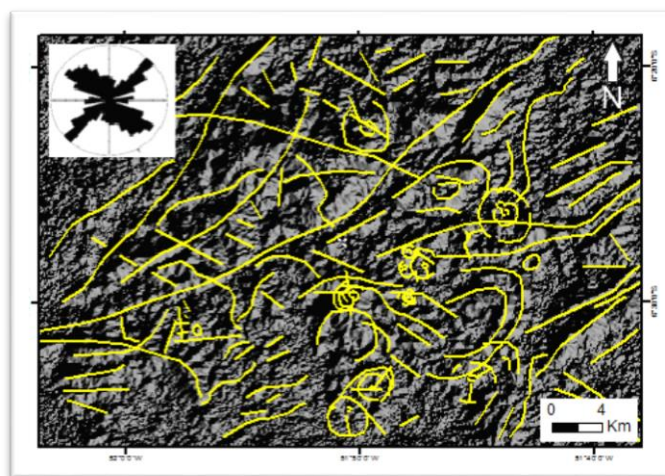


Figura 5: Imagem relevo sombreado gerada com ângulo de elevação a 70° e azimute de 135°. Os traços definem a disposição espacial das principais feições estruturais. . No canto esquerdo superior é mostrado diagrama de roseta dos lineamentos fotointerpretados indicando duas direções preferencias: NW-SE e NE-SW.

A combinação dos resultados acima permitiu elaborar o mapa fotogeológico mostrado na Figura 6A. A validação deste mapa foi feita comparando o mapa de Jesus *et al.* (2013) para a região de estudo, mostrado na Figura 6B. Este mapa possui amostragens de campo e descrição petrográfica das unidades que foram utilizados como referência para identificar os elementos foto interpretados.

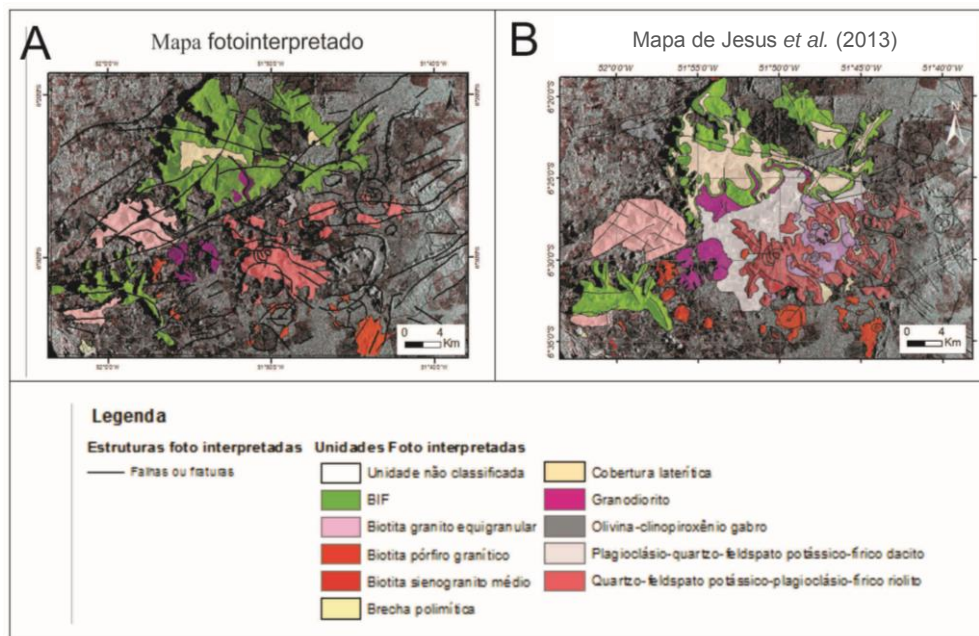


Figura 6: A) Mapa fotogeológico elaborado a partir da análise de imagens R99B-SAR complementado por imagens Landsat. B) Mapa geológico de Jesus *et al.* (2013)

4. Conclusões

As propriedades texturais das imagens R99B-SAR mostraram melhor desempenho para separação de unidades fotolitológicas que as respostas espectrais observadas nas imagens ópticas (LANDSAT), permitindo que fosse feito um refinamento no contorno das unidades fotolitológicas. As feições estruturais foram extraídas do relevo sombreado derivado do MDE/SRTM que realçou os trends NW-SE e NE-SW associados a zona de cisalhamento Itacaiúnas, superpostos a fases de deformação dúcteis aproximadamente E-W (Jesus *et al.* 2013). A vegetação e a falta de continuidades vertical e lateral das unidades geológicas são os principais obstáculos ao uso de dados de SR, afetando diretamente a fotointerpretação.

5. Referências bibliográficas

- ALMEIDA, F.F.M., HASUI, Y., BRITO NEVES, B.B. AND FUCK, R.A., 1981. Brazilian structural provinces: An introduction. *Earth Sci. Rev.*, 17(1-2): 1–29.
- ARAÚJO, O.J.B., MAIA, R.G.N., JORGE JOÃO, X.S. AND COSTA, J.B.S., 1988. A megaestrutura arqueana da folha Serra dos Carajás. In: SBG (Editor), Congresso Latinoamericano de Geologia. Anais, Belém, pp. 324–333.

- CPRM, 2013. Serviço Geológico do Brasil. Geodiversidade do Estado do Pará, cap. 3 Origem das paisagens – p 23-54.
- DIERKING, W. Quantitative roughness characterization of geological surfaces and implications for radar signature analysis. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol, 37, n. 5, p. 2397-2412, Sept. 1999.
- JESUS A.J.C., FERNANDES C.M.D., CRUZ R.S., NASCIMENTO T.S., JULIANI C., MISAS C.M.E., LAGLER B. 2013. Geologia e potencial metalogenético das rochas Arqueanas da região de Vila Tancredo, norte de São Félix do Xingu (PA), Província Mineral de Carajás. *In: 3º Simpósio Brasileiro de Metalogenia*. Gramado, v. p. CD-ROM.
- JULIANI, C. AND FERNANDES, C.M.D., 2010. Well-preserved Late Paleoproterozoic volcanic centers in the São Félix do Xingu region, Amazonian Craton, Brazil. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 191(3-4): 167–179.
- MACAMBIRA, E.M.B. AND VALE, A.G., 1997. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. São Félix do Xingu. Folha SB-22-Y-B. Estado do Pará, CPRM, Brasília.
- MEDEIROS, H., GASTAL, M.C.P., DALL’AGNOL, R. AND SOUZA, Z.S., 1987. Geology of the Rio Maria area (Eastern Amazonian Region - Brasil): an example of Archean granite-greenstone terrane intruded by anorogenic granites of Middle Proterozoic ages. *In: IUGS (Editor), Final meeting of the working group, Carajás, Pará, Brasil. UNESCO*, pp. 7–105.
- MURA, J. C.; CORREIA, A. H. Calibração preliminar dos dados SAR polarimétricos em banda L do sensor R99B do CENSIPAM. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13., Florianópolis. Anais... Florianópolis: INPE, 2007, p. 4951-4958.*
- SILVA, A. M. Curso de Processamento Digital de Imagens. Apostila. Porto Alegre: XX Congresso Brasileiro de Cartografia, 2000.
- PARADELLA, W.R.; SANTOS, A.R.; DALL’AGNOL, R.; PIETSCH, R.W.; SANT’ANNA, M.V. A geological investigation based on airborne (SAREX) and spaceborne (RADARSAT-1) SAR integrated products in the Central Serra dos Carajás granite area, Brazil. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 24, 376-392, 1998.
- TRUCKER, C.J.; GRANT D.M. & DYKSTRA J.D. Nasa’s Global Orthorectified Landsat Data Set, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 70, No. 313-322, 2014.
- TOUTIN T. & RIVARD B. A new tool for depth perception of multi-source data, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 61, No. 10, 1209-1211, 1995.