

Detecção de movimentação crustal recente em Manaus (AM) utilizando informações de sensoriamento remoto por radar (interferometria RADARSAT-1 e modelo digital de elevação da SRTM).

Fernanda Ledo Gonçalves Ramos^{1,3}

Fernando Pellon de Miranda²

Luiz Landau³

Clauzionor Lima da Silva⁴

¹ Université de Savoie - LISTIC/Polytech Annecy-Chambéry
BP 80439 -74944 – Annecy-le-Vieux -France
fernanda@gmail.com

² Centro de Pesquisas e Desenvolvimento da Petrobras – CENPES
Avenida Horácio Macedo, 950, Cidade Universitária, Ilha do Fundão, CEP 21941-915 – Rio de Janeiro - RJ, Brasil
fmiranda@petrobras.com.br

³ Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE/UFRJ
Centro de Tecnologia, Bloco I -214, Cidade Universitária, Ilha do Fundão, CEP 21949-900 – Rio de Janeiro - RJ, Brasil
landau@lamce.coppe.ufrj.br

⁴ Universidade Federal do Amazonas – UFAM
Rua Desembargador Rodrigo Otávio Jordão Ramos, 3000
CEP 69077-000 – Manaus - AM, Brasil
csilva@ufam.edu.br

Abstract. Synthetic Aperture Radar (SAR) systems installed in orbital platforms have been lately used for the remote detection of recent crustal movement, possibly associated with neotectonic events. These systems are advantageous because they are able to cover vast regions using an extremely high accuracy, which represents an advance for terrain monitoring. The prime objective of the present paper is to understand, from a tectonic and structural standpoint, the results obtained by an interferometric study recently carried out in the Manaus area, Amazonas State, in which a stack of archived RADARSAT-1 data has been processed. The research question to be addressed has been approached through the analysis of the drainage network extracted with the aid of SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) data, as well as through the comparison with images from different optical sensors and with geologic/geomorphologic information available in the literature. As a result, it has been noticed that the area of crustal movement (AMC in Portuguese) detected by the interferometric study is located above the tectonic unstable watershed that separates the sub-basins of Igarapés Tarumã-Açu and São Raimundo. Both areas are characterized by the pronounced occurrence of tilting. In addition, the AMC is situated in the vicinities of a circular drainage anomaly with 4 km of diameter, which strongly suggests a geologic origin for the interferometric feature.

Palavras-chave: radar remote sensing, interferometry, RADARSAT-1, SRTM, neotectonics, Manaus, sensoriamento remoto por radar, interferometria, RADARSAT-1, SRTM, neotectônica, Manaus.

1. Introdução

O contínuo esforço pela apropriação de novas reservas faz com que a indústria do petróleo procure atuar em fronteiras exploratórias situadas em áreas cada vez mais remotas, tais como a Amazônia. Assim, a prospecção petrolífera tem se tornado uma atividade crescentemente complexa, exigindo a análise combinada de dados adquiridos por meio de diferentes tecnologias (Almeida Filho e Miranda, 2007).

Recentes desenvolvimentos na indústria de petróleo e na academia demonstram o potencial de uso de sistemas orbitais de sensoriamento remoto por radar de abertura sintética (SAR) em fronteiras exploratórias na Bacia do Amazonas. Informações obtidas a partir desta tecnologia podem ser integradas com aquelas derivadas de dados geofísicos (sísmica, gravimetria, magnetometria) e geoquímicos de superfície, com o objetivo de caracterizar feições morfoestruturais indicativas de trapas de óleo e gás.

Uma contribuição importante do sensoriamento remoto por radar nessa região frequentemente coberta por nuvens consiste na identificação de estruturas geológicas com movimentação recente. Tal atividade neotectônica pode comprometer a integridade do selo geológico, aumentando, portanto, o risco exploratório. Desse modo, como complemento metodológico ao estudo de Almeida Filho e Miranda (2007), o presente trabalho tem por objetivo discutir a possibilidade de movimentação crustal recente, em escala centimétrica, empregando a técnica de interferometria a partir de imagens do satélite RADARSAT-1, bem como contextualizar tal resultado do ponto de vista tectono-estrutural. Essa nova tecnologia pode identificar alterações sutis na superfície terrestre associadas à atividade neotectônica que ocorre na Bacia do Amazonas, região de Manaus, como reportado por Silva (2005). Os dados de campo obtidos pelo citado autor constituem a base para a caracterização do arcabouço morfoestrutural da região que inclui a capital do Estado do Amazonas. Pretende-se também analisar a rede de drenagem extraída do mosaico SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) e cotejá-la com as informações geológicas e geomorfológicas existentes.

Conforme discutido em Ramos (2009), a análise interferométrica dos dados RADARSAT-1 efetuada pela Petrobras (2008) indicou a existência de uma área de movimentação crustal nas proximidades da feição circular reportada por Simas et. al (2006) em Manaus. Tal feição é caracterizada por relevo relativamente mais alto e drenagem anelar bem marcada, com aproximadamente 4 km de diâmetro, situando-se no bairro de Cidade Nova (Figura 1a).

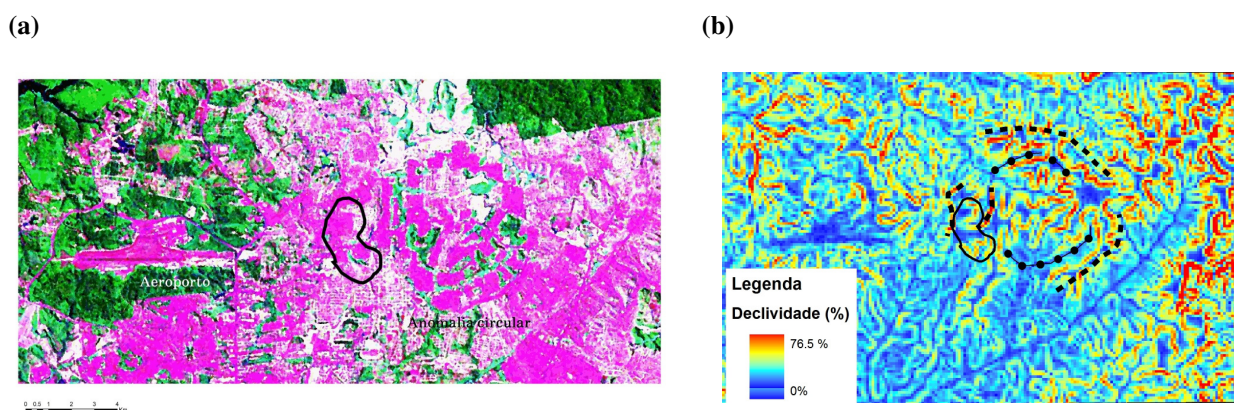


Figura 1. Localização da região de estudo: (a) área de movimentação crustal (AMC) identificada pela Petrobras (2008) em relação à anomalia circular reportada por Simas et al. (2006) em Manaus, bairro de Cidade Nova. Imagem Landsat-5 TM adquirida em 03/08/2001; (b) Mapa de declividade gerado a partir do MDE da SRTM. Linhas pontilhadas correspondem a segmentos curvilíneos de drenagem; linhas tracejadas correspondem a cristas com disposição curvilínea; a linha contínua representa a AMC.

2. Metodologia do Trabalho

Dentre os materiais utilizados para a geração de informações geológicas e geomorfológicas neste estudo, destacam-se as imagens de sensoriamento remoto na faixa de microondas obtidas pelo satélite RADARSAT-1, no modo de operação *Fine 2 Far*, que originaram os interferogramas, bem como o Modelo Digital de Elevação (MDE) da SRTM.

Foram empregadas, ainda, imagens Landsat e IKONOS na faixa óptica do espectro eletromagnético, assim como observações de aspectos geológico-geomorfológicos realizadas no campo. Os resultados da interpretação das imagens de sensoriamento remoto foram integrados com o arcabouço tectono-estrutural da região de estudo utilizando-se um SIG (Sistema de Informações Geográficas).

2.1 Resultados do estudo de interferometria efetuado pela Petrobras

De acordo com o relatório da Petrobras (2008), os dados do satélite RADARSAT-1 (modo de operação *Fine 2 Far*) foram coletados entre agosto de 2006 e dezembro de 2007, totalizando 26 cenas sobre a área investigada (parte do flanco norte da Bacia do Amazonas).

As imagens complexas (formato SLC) foram co-registradas, adotando-se como referência uma cena tomada no centro do intervalo de tempo de aquisição do conjunto. Posteriormente, o conjunto co-registrado foi georreferenciado em relação ao MDE da SRTM com resolução espacial de 90 m, originando interferogramas topograficamente corrigidos. O período de coleta mínimo de um ano (ou 15 aquisições) é recomendado para minimizar qualquer efeito atmosférico sobre os resultados (Petrobras, 2008).

A influência atmosférica observada na região amazônica através do processamento interferométrico dos dados RADARSAT-1 é distinta da usual. Tipicamente, a atmosfera possui correlação espacial na escala de 15-18 km; contudo, a correlação observada sobre a cidade de Manaus apresentou um comprimento de onda muito mais curto, de aproximadamente 2 km, efeito evidenciado como falsas franjas nos interferogramas.

Os interferogramas foram inicialmente gerados a partir dos métodos estatísticos Common Master Geometry e Leap Frog Geometry, com a finalidade de remover os efeitos da influência atmosférica e aqueles associados à variação do terreno e de baseline (distância perpendicular entre os satélites no momento da aquisição). Devido à predominância da cobertura vegetal, os interferogramas exibiram maior coerência local no interior e no entorno da área urbana, que foi extraída como um subconjunto de toda a série. Uma correção de baseline de primeira ordem foi aplicada sobre este subconjunto assim gerado. As estimativas para a segunda ordem, no entanto, não puderam ser obtidas para uma área tão pequena (Petrobras, 2008).

Os interferogramas com *baseline* espaciais grandes (>750m) apresentam perda de coerência. Normalmente, esses interferogramas podem ser substituídos por dois ou mais que apresentem baselines menores e que constituam a mesma observação que o interferograma original. Entretanto, a rigidez técnica dos métodos *Common Master Geometry* e *Leap Frog Geometry* não permite a inclusão de tal variação, o que levou à aplicação do algoritmo de *Network Inversion*.

Tal método possibilita a extração de toda a informação presente no conjunto de dados, realçando determinadas observações sobre outras, através de critérios pré-definidos e da interação do usuário. A ênfase sobre certas observações é dada a partir de diferentes pesos atribuídos a elas. A modelagem dos dados irá depender do tipo de aplicação e das características do sinal. A escolha dos parâmetros adequados inclui a ênfase sobre interferogramas que possuam distâncias de *baseline* perpendiculares pequenas (o que evita a baixa coerência). A flexibilidade inerente ao método de *Network Inversion* permite acomodar diferentes séries de dados e, principalmente, a experiência do usuário.

Para a série histórica de dados RADARSAT-1 *Fine 2 F* utilizada no presente trabalho, não foi realizada a cadeia de inversão automática. Entretanto, foi feita uma investigação manual da série de dados de entrada para a inversão. A rede foi invertida através do método *Singular Value Decomposition*, que permite minimizar as inconsistências de forma robusta.

O que se procura na investigação manual com o emprego do método de *Network Inversion* são as discontinuidades nas fases interferométricas que tenham alta probabilidade de não estar associadas a ruídos atmosféricos. Se a possibilidade de uma causa atmosférica for

descartada, em geral, tais discontinuidades podem ser relacionadas à movimentação no terreno.

Para a cidade de Manaus, foi identificada uma área de movimentação crustal (Petrobras, 2008), aqui informalmente designada como AMC. A discontinuidade de fase observada na AMC é evidenciada em múltiplos interferogramas de datas independentes (Figura 2). Admita-se, nesse caso, que a origem atmosférica pode ser a princípio descartada. Ademais, como já mencionado, a AMC está situada na periferia da estrutura circular identificada por Simas et al. (2006) na capital do Estado do Amazonas.

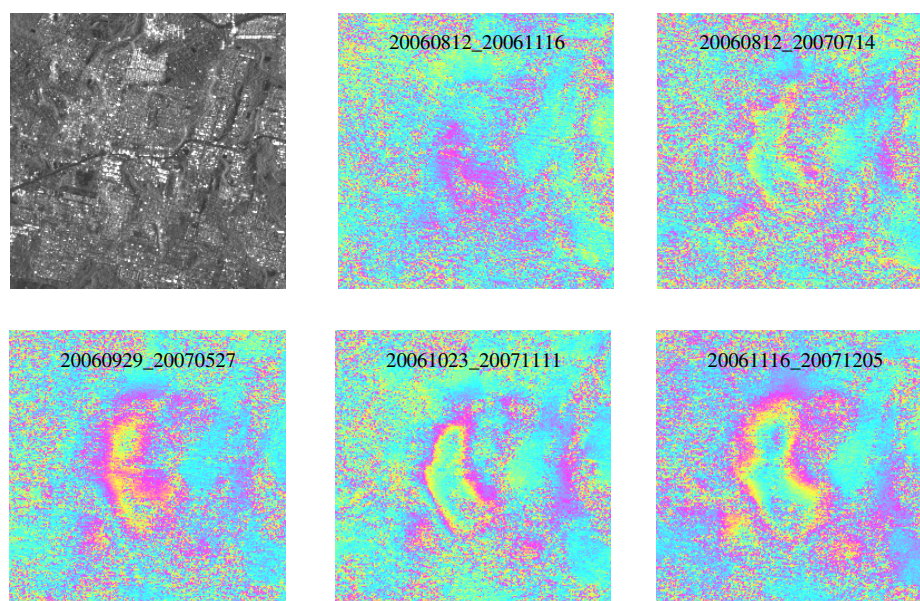


Figura 2. Detalhe dos interferogramas obtidos na área de movimentação crustal (AMC). As datas de aquisição das cenas RADARSAT-1 Fine 2 F, que aparecem na parte superior dos frames, formam pares e estão referidas como ano/mês/dia.

2.2 Análise das sub-bacias de drenagem

A manipulação do MDE da SRTM permitiu: (a) a extração da rede de drenagem; (b) a edição dos lineamentos de drenagem anteriormente identificados por Silva (2005); (c) a análise do basculamento das bacias de drenagem; (d) o mapeamento de corpos d'água e áreas alagáveis; (e) a geração do mapa de declividade.

A partir dos limites das bacias hidrográficas e da distribuição de sua rede de drenagem, foi efetuada a análise sobre o basculamento destas importantes unidades geomorfológicas. Para a determinação de possíveis arranjos espaciais, em cada uma das sub-bacias, resultantes de processos tectônicos de basculamento, foi aplicado o método de quantificação a partir do fator de assimetria da bacia de drenagem (FABD), conforme Cox (1994) (Equação 1):

$$FABD = 100.(Ar/At), \quad (1)$$

onde Ar é a área da bacia à direita do rio e At é a área total da bacia de drenagem.

A assimetria de uma bacia reflete o componente de deslocamento lateral do seu rio principal, perpendicularmente à direção de seu eixo. Esta migração é causada por processos fluviais internos e/ou por forças tectônicas (Salamuni *et al.*, 2004). Depois de calculados os índices de cada uma das sub-bacias no entorno da área investigada, foi gerada uma escala relativa à magnitude do efeito da tectônica, considerando os valores de FABD e o sentido do basculamento (Tabela 1). Com base nesta escala, foram analisadas relações topológicas entre os diversos divisores de águas.

Tabela 1. Relação entre o valor de FABD e o efeito da tectônica (adaptado de Salamuni et al., 2004).

FABD	Efeito da tectônica
$0 > a < 35$	Bastante
$35 \geq a < 41$	Moderado
$41 \geq a \leq 52$	Pouco
$52 > a \leq 66$	Moderado
$66 < a \leq 100$	Bastante

2.3 Dados geológicos e geomorfológicos

Os dados geológicos e geomorfológicos existentes na área de estudo foram empregados nas seguintes etapas: (a) análise estatística dos lineamentos de drenagem por direção (azimute); (b) comparação com o levantamento de campo; (c) aquisição da documentação existente sobre geologia e sua integração em ambiente SIG; (d) definição de faixas estruturais; (e) interpretação da drenagem referente à anomalia circular próxima da área de movimentação crustal (AMC).

A análise estatística dos lineamentos de drenagem foi efetuada no *software* Spring (Câmara et al., 1996), permitindo seu agrupamento segundo intervalos de azimute e a identificação das classes de maior distribuição na área de estudo. A seleção de tais classes teve por critério o comprimento absoluto das feições lineares. Tal resultado foi posteriormente comparado com as estatísticas de frequência absoluta. As classes de lineamentos de drenagem selecionadas através da análise estatística, consideradas representativas de faixas estruturais, foram integradas à base de dados, a fim de se compreender seu controle geológico-geomorfológico sobre a rede hidrográfica.

Os dados de campo levantados por Silva (2005) dizem respeito à litologia predominante e a informações sobre as estruturas geológicas observadas em afloramentos e cortes de estrada. Os pontos levantados foram integrados às feições de lineamentos de drenagem, no contexto do ambiente SIG, a fim de se comparar qualitativamente tais informações.

2.4 Imagens ópticas dos satélites Landsat e IKONOS

A interpretação e a extração dos lineamentos curvilíneos de drenagem presentes na anomalia circular próxima à AMC foram efetuadas no *software* PCI Geomatica, com base nas imagens IKONOS com 1 (um) metro de resolução espacial. A imagem Landsat-5 TM, adquirida no ano de 1986, permitiu a observação da área investigada sob menor densidade de ocupação urbana, o que facilitou a interpretação da rede de drenagem e da cobertura vegetal. Tais produtos auxiliaram na interpretação dos lineamentos de drenagem em conjunto com o MDE da SRTM.

2.5 Geração do mapa de declividade

Além das informações hidrológicas, o MDE da SRTM foi utilizado para gerar um mapa de declividade (Figura 1b).

3. Resultados e discussões

3.1 Análise estatística de lineamentos de drenagem

As faixas estruturais definidas na etapa de análise estatística dos lineamentos de drenagem se dispuseram segundo quatro direções principais: NE (N40-60E), NW (N30-50W), E-W (N80-90E a N80-90W) e N-S (N0-10E a N0-10W). Considera-se neste trabalho que as citadas faixas estruturais são representativas de proeminentes lineamentos associados a estruturas do embasamento. Tais feições alongadas de expressão regional, na concepção de

Cordani *et al.* (1984), foram rejuvenescidas ao longo da história geológica da Bacia do Amazonas. Assim, a faixa estrutural NE (N40-60E) é parte integrante do Lineamento Lucas Borges, enquanto que a faixa estrutural NW (N30-50W) se associa ao Lineamento Manacapuru-Rio Negro e ao Lineamento Baependi-Cuieiras. Além disso, Silva (2005) atribuiu uma movimentação transcorrente dextral às feições lineares com orientação NE que definem a margem esquerda do Rio Amazonas, na parte leste-sudeste de Manaus.

Por sua vez, Silva (2005) considera que a faixa estrutural N-S (N0-10E a N0-10W) está relacionada com a falha normal do Tarumã-Açu e com estruturas a ela subparalelas. Finalmente, a porção meridional da faixa estrutural E-W (N80-90E a N80-90W), mostrada na Figura 3, representa o prolongamento, na região de Manaus, da linha de escarpa de igual direção existente a oeste na área de Paricatuba. Os dados de campo levantados por Silva (2005) indicam a existência de falhas normais N80W/70SW e N85W/55NE no ponto 4 da Figura 3, bem como de uma falha normal N85E/50SE no ponto 5 da referida figura.

3.2 Determinação do basculamento das bacias hidrográficas, seu condicionamento pelo tectonismo e relações topológicas entre seus interflúvios

O fator de assimetria da bacia de drenagem (FABD) foi calculado para cada sub-bacia hidrográfica na região de estudo, com a finalidade de determinar possíveis arranjos espaciais resultantes de processos tectônicos de basculamento. Para a sub-bacia do Igarapé Tarumã-Açu (Figura 3), o valor do FABD foi de 31, indicando basculamento para a direita, em uma área bastante afetada pelo efeito da tectônica (conforme estabelecido na Tabela 1). Para o Igarapé São Raimundo, FABD assumiu o valor de 68, sugestivo de um basculamento para a esquerda, em uma área também bastante afetada pela tectônica. Por sua vez, o interflúvio que separa duas sub-bacias hidrográficas bastante afetadas pela tectônica é classificado por Ramos (2009) como sendo instável. Esse é o caso da feição limítrofe entre os igarapés Tarumã-Açu e São Raimundo. Como pode ser ainda observado na Figura 3, fica patente a influência da faixa estrutural E-W sobre o interflúvio instável que separa as sub-bacias dos igarapés Tarumã-Açu e São Raimundo. É exatamente nessa porção da Bacia Sedimentar do Amazonas que se localizam a anomalia circular de drenagem e a AMC detectada pelo estudo de interferometria SAR.

3.3 Controle geológico-geomorfológico da área de movimentação crustal (AMC) identificada no estudo de interferometria SAR

A análise da Figura 1b indica que a anomalia circular de drenagem expressa na imagem Landsat (Figura 1a) é circundada por cristas alongadas no relevo com disposição aproximadamente curvilínea. O gradiente do relevo no cume dessas feições morfológicas atinge valores de até 76,5%, sugerindo a existência de controle pela estruturação geológica. A área ocupada pela AMC também exibe bordas íngremes marcadas por fortes gradientes, se localizando imediatamente a oeste da anomalia circular de drenagem (Figura 1b). O posicionamento dos lineamentos curvilíneos de drenagem presentes na anomalia circular que está bem próxima da AMC pode ser extraído em detalhe com o emprego da imagem IKONOS com um (1) metro de resolução espacial.

4.0 Conclusões

A análise de informações obtidas através do sensoriamento remoto por radar (interferometria RADARSAT-1 e MDE da SRTM) resultou na contextualização geológico-geomorfológica de uma área de movimentação crustal (AMC) na zona urbana de Manaus. Essa feição encontra-se nas proximidades de uma anomalia circular de drenagem anteriormente identificada em imagens Landsat. As evidências reunidas neste trabalho

indicam ainda que a AMC está localizada sobre o interflúvio tectonicamente instável que separa as sub-bacias dos igarapés Tarumã-Açu e São Raimundo, ambas caracterizadas por forte fenômeno de basculamento. Considera-se aqui que o fenômeno de basculamento na área de estudo se desenvolveu após a implantação da rede de drenagem, o que permite atribuir tal movimentação à atividade neotectônica. Ademais, ficou patente o condicionamento do interflúvio Tarumã-Açu/São Raimundo pela faixa estrutural E-W, que tem continuidade a oeste como uma linha de escarpa na região de Paricatuba.

Tal abordagem é potencialmente relevante para a exploração petrolífera na Bacia do Amazonas, pois pode contribuir na identificação de áreas sedimentares onde o risco para a integridade do selo geológico é alto. No entanto, em função da magnitude da influência atmosférica sobre regiões tropicais (como é o caso de Manaus), que introduz erros significativos na produção dos interferogramas, recomenda-se a complementação do presente estudo usando séries de dados RADARSAT-2 com maior cobertura temporal. Ademais, faz-se necessário o desenvolvimento de procedimentos de correção atmosférica dos interferogramas concebidos especificamente para regiões tropicais úmidas, onde rápidas variações no conteúdo de vapor d'água na coluna de ar produzem resultados com alta variação espacial, difíceis de serem removidos utilizando os métodos tradicionais.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Petrobras pelas informações sobre o estudo interferométrico realizado na cidade de Manaus e seu entorno.

Referências Bibliográficas

Almeida Filho, R.; Miranda, F.P. Mega capture of the Rio Negro and formation of the Anavilhanas Archipelago, Central Amazonia, Brazil: evidences in an SRTM digital elevation model. **Remote Sensing of Environment**, v. 110, p. 387-392, 2007.

Câmara, G.; Souza, R.C.M.; Freitas, U.M.; Garrido, J.C.P. 1996. SPRING: Integrating Remote Sensing and GIS with Object-Oriented data Modelling. **Computers and Graphics**, v.20, p.395-403, 1996.

Cordani, U.G.; Neves, B. B. B.; Fuck, R.A.; Porto, R.; Thomaz Filho, A.; Cunha, F.M.B. **Estudo preliminar de integração do pré-cambriano com os eventos tectônicos das bacias sedimentares brasileiras**. Rio de Janeiro: Ciência-Técnica do Petróleo, Seção: Exploração de Petróleo, v. 15, 1984. 70 p.

Cox, R.T. Analysis of drainage and basin symmetry as a rapid technique to identify areas of possible Quaternary tilt-block tectonics: an example from the Mississippi Embayment. **Geologic Society of America Bulletin**, v. 106, p. 571-581, 1994.

Petrobras. **Aplicação de tecnologia INSAR orbital na Bacia Hidrográfica do Rio Solimões, Amazônia: relatório de análise temporal INSAR orbital**. Rio de Janeiro: Petrobras/CENPES, 2008. 38 p.

Ramos, F.L.G. Utilização de sensoriamento remoto por radar (interferometria RADARSAT-1 e mosaico SRTM) para mapeamento de atividades neotectônicas na região de Manaus (AM). 2009. 140 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro/Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pesquisa de Engenharia, Rio de Janeiro. 2009.

Salamuni, E.; Ebert, H.D.; Hasui, Y. Morfotectônica na bacia sedimentar de Curitiba. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 34, p. 469-477, 2004.

Silva, C.L. Análise da tectônica cenozóica da região de Manaus e adjacências. 2005. 282p. Tese (Doutorado em Geologia Regional) – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Rio Claro. 2005.

Simas, J.L.; Silva, C.L.; Morales, N., 2006, Anomalia circular na região de Manaus. In: XLIII Congresso Brasileiro de Geologia, 2006, Aracaju. Anais, SBG-Núcleo Bahia/Sergipe, 2006, v. 1, p. 266.

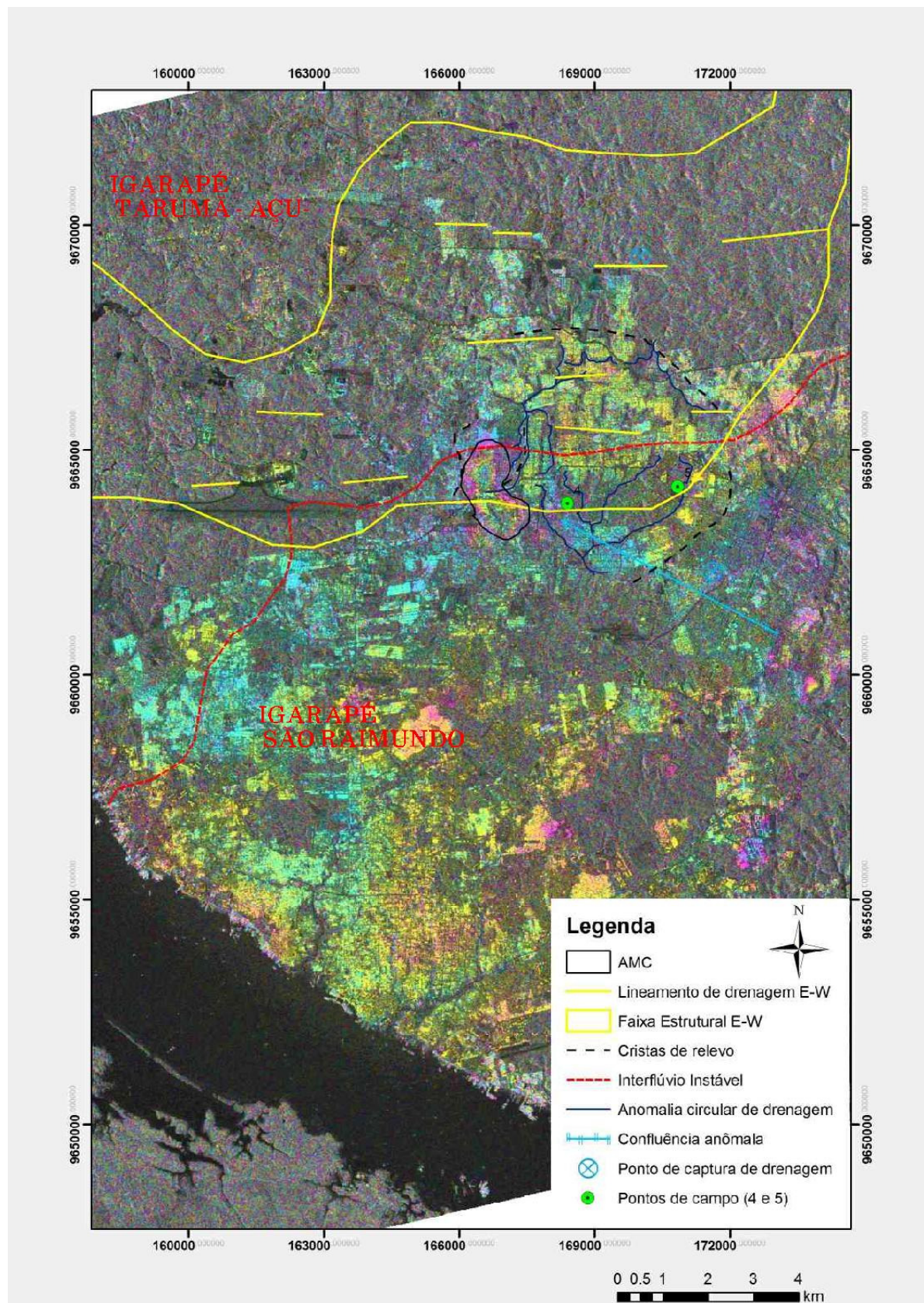


Figura 3. Interferograma SAR com sobreposição dos limites da faixa estrutural E-W (incluindo seus lineamentos de drenagem), do interflúvio instável Igarapé Tarumã-Açu/Igarapé São Raimundo, das estruturas geológicas observadas no campo por Silva (2005), da confluência anômala e da captura de drenagem do Igarapé São Raimundo, da anomalia circular de drenagem e do limite da AMC.