

Geração de DSMs e ortoimagens RADARSAT-2 Ultra-Fine utilizando a modelagem Rational Polynomial Coefficients (RPCs)

Cleber Gonzales de Oliveira¹
Waldir Renato Paradella¹
Athos Ribeiro dos Santos¹
Arnaldo de Queiros da Silva¹
Rogério Ribeiro Marinho¹

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil
{cleber, waldir, athos, arnaldo, rogeosr} @dsr.inpe.br

Abstract. This paper presents the first results obtained in the evaluation of the planialtimetric accuracy of Digital Surface Models (DSM) and orthoimages generated from a stereo pair of RADARSAT-2 (RST-2) Ultra-Fine (UF) images, polarization C-HH, for an area located in the Curaçá River Valley, State of Bahia, Brazil. For the DSMs and orthoimage generation it was used a mathematical modeling based on the use of Rational Polynomial Coefficients (RPCs), available with RADARSAT-2 Ultra-Fine images. The DSMs and orthoimages were generated without and with one Ground Control Point (GCP). Precise topographic field information acquired from geodetic Global Positioning System (GPS) was used as GCPs for the generation of the DSM and orthoimages and as Independent Check Points (ICPs) for the calculation of the products accuracies. The analysis was performed following the calculations of systematic error (bias) and precision. The test for significant systematic error was based on the Student's-t distribution and the test of precision was based on the Chi-squared distribution. The results have shown that the accuracy of the RADARSAT-2 Ultra-Fine DSMs and orthoimages met the requirements for 1:50,000 map (Class A) as requested by the Brazilian Standard for Cartographic Accuracy. Thus, the use of RADARSAT-2 Ultra-Fine images can be considered a promising alternative for detailed topographic mapping in similar environments of the Brazilian territory.

Palavras-chave: DSM, Orthoimage, RADARSAT-2, Rational Polynomial Coefficients, DSM, Ortoimagem, RADARSAT-2, Coeficientes Polinomiais Racionais.

1. Introdução

Para uma boa parte do território brasileiro o mapeamento por sensores ópticos é prejudicado pelas condições atmosféricas, que afetam a obtenção sistemática e a radiometria destas imagens. Os sensores na faixa de microondas apresentam vantagem nesse aspecto, pois são menos suscetíveis aos fatores atmosféricos e, dependendo do comprimento de onda utilizado, esses fatores não prejudicam o imageamento.

Com o advento dos sistemas orbitais com sensores que operam no espectro das microondas, as aplicações cartográficas foram beneficiadas, sobretudo com o uso dos dados obtidos por radares de abertura sintética ou SAR (*Synthetic Aperture Radar*). O SAR é um dispositivo imageador em radiofrequência que fornece uma imagem bidimensional (*range*, *azimute*) da realidade tridimensional. Esse imageamento é feito pela detecção da radiação retroespalhada quando o sensor ilumina a superfície, sob um campo bem definido de microondas ativas (Lewis et al., 1998; Paradella et al., 2001).

Entre os sensores orbitais que operam no espectro de microondas e que fornecem um avanço para as aplicações cartográficas com dados SAR, podem ser destacados os novos satélites/sensores radar como o ALOS/PALSAR, COSMO-SkyMed, RADARSAT-2 e o TerraSAR-X, que apresentam grandes inovações tecnológicas.

O RADARSAT-2 (RST-2) é o segundo satélite canadense de uma série de satélites SAR, construído pela empresa MacDonald Dettwiler, em Richmond, B.C., Canadá, em parceria com a Agência Espacial Canadense (*Canadian Space Agency – CSA*) (Staples et al., 2004). O RST-2 opera na frequência de microondas conhecida como banda C, com 5,405 GHz ou 5,6

cm de comprimento de onda, transmitindo e recebendo a energia em quatro orientações ou polarizações (HH, HV, VH e VV). Em relação ao seu antecessor, o RST-2 apresenta uma resolução espacial de até 1 metro, flexibilidade na escolha de polarizações e imageamentos com visadas à direita e esquerda. Possui ainda uma maior capacidade de armazenamento e medidas precisas de sua posição e atitude (MDA, 2008).

Assim, este trabalho apresenta os primeiros resultados no país alcançados na geração e avaliação da acurácia planialtimétrica de DSMs e ortoimagens gerados a partir de um par estereoscópico de imagens RADARSAT-2 (RST-2), modo Ultra-Fine (UF), e utilização da modelagem matemática baseada nos Coeficientes Polinomiais Racionais (*Rational Polynomial Coefficients* - RPCs).

2. Área de Estudo

A área de estudo está localizada na região do Vale do Rio Curaçá, cobrindo parte dos municípios de Abaré, Chorrochó, Curaçá e Juazeiro, no Estado da Bahia, entre as coordenadas 8° 30'S, 40°30'W e 9°45'S, 39°00'W. A topografia da região é caracterizada por um relevo com altitudes que variam de 330 a 840 metros (Figura 1).

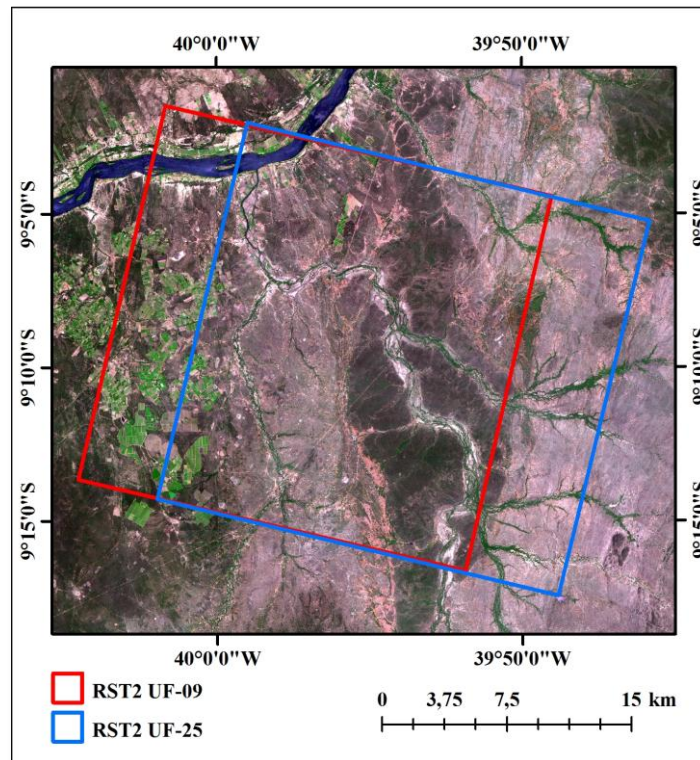


FIGURA 1 – Localização da área de estudo e das imagens RST-2 UF.

O Vale do Curaçá é importante devido à atividade mineral (mina de Caraíba) e favorável para a avaliação de informações geológicas a partir de dados SAR, pois a variação litológica e seus produtos de alteração são bem expostos em superfície. A exposição deste material é resultante do clima semi-árido e da fitofisionomia, caracterizada por vegetação esparsa (Caatinga) e solos pouco espessos, de 30 cm a 1,5 m (Paradella e Vitorello, 1995).

3. Conjunto de Dados e Abordagem Metodológica

3.1 Imagens RADARSAT-2 Ultra-Fine

As características das imagens RST-2 UF utilizadas neste trabalho são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Características das imagens RST-2 UF.

Modo e Posição	UF-09	UF-25
Data de Aquisição	14/06/2009	04/06/2009
Produto	SGX	SGX
Polarização	HH	HH
Azimute de Visada	282°	282°
Ângulo de Incidência (centro)	37,036°	47,875°
Espaçamento de Pixel (m)	1 × 1	1 × 1
Resolução Espacial Rg. × Az. (m)	3,13 × 2,80	2,20 × 2,80
Número de Looks Rg. × Az.	1 × 1	1 × 1

Dados diários de precipitação pluviométrica (mm) obtidos a partir da estação Agrometeorológica de Mandacaru – Juazeiro-BA (<http://www.cpatna.embrapa.br:8080/servicos/dadosmet/cem-dia.html>) indicaram que três dias antes da aquisição de cada imagem não houve precipitação. A Figura 2 apresenta as imagens RST-2 UF.

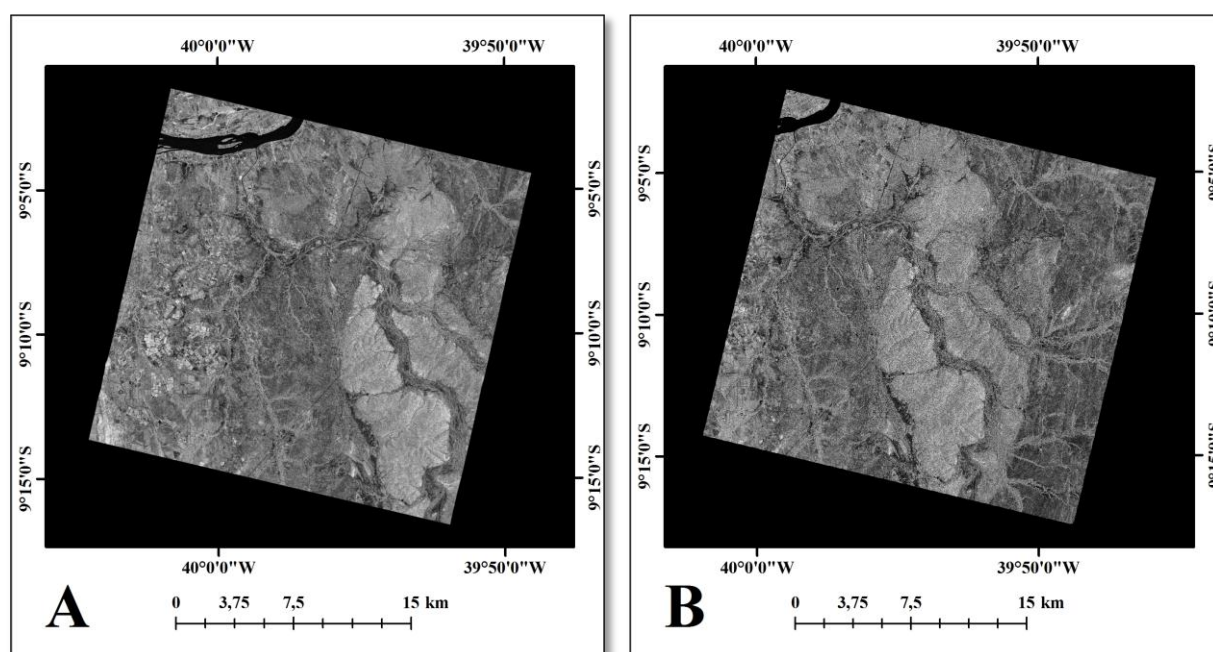


FIGURA 2 – Imagens RST-2 UF-09 (A) e UF-25 (B).

3.2 Dados GPS

Para a geração e avaliação dos DSMs e ortoimagens RST-2 UF, foram coletados pontos de controle no terreno (*Ground Control Points* – GCPs) em campanhas de campo realizadas nos períodos 29/Set-10/Out de 2008 e 06-13/Out de 2009.

Para a execução das duas campanhas de campo foram utilizados 4 equipamentos GPS Geodésicos, sendo dois de duas frequências (Topcon Hiper®) e dois de uma frequência (Sokkia Stratus®), resultando em 110 pontos levantados em campo. A estação base foi instalada durante todo o período do trabalho de campo na cidade de Curaçá (BA), adquirindo dados por cerca de 10 horas diárias. As coordenadas da estação base foram determinadas a

partir do transporte e ajustamento de coordenadas realizados com quatro (4) estações da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC): Campina Grande (PBCG), Crato (CRAT), Petrolina (PEPE), Recife (RECF). Já as coordenadas dos outros pontos foram determinadas a partir das coordenadas ajustadas da estação base. Vale destacar que os pontos de controle foram adquiridos para uma área maior do que a do estéreo-par UF-09×UF-25 (Figura 3).

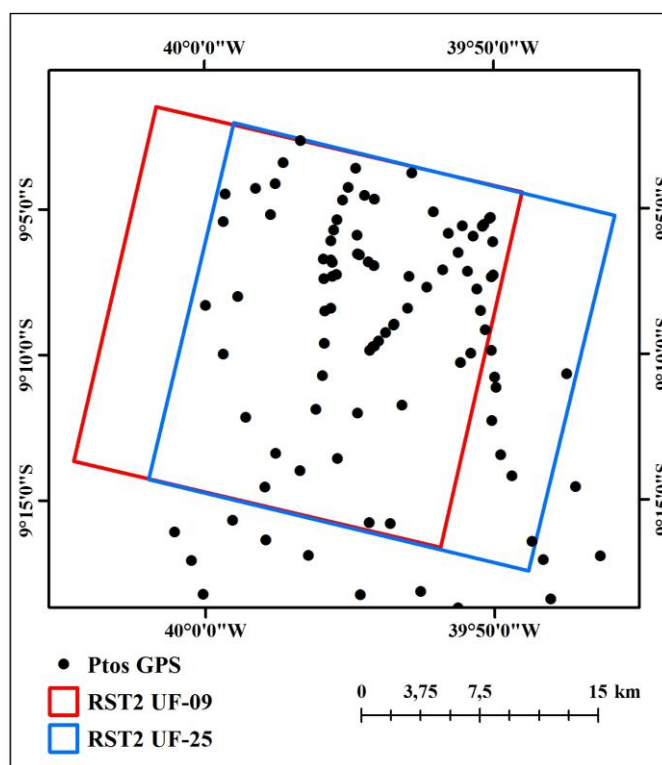


FIGURA 3 – Localização dos pontos de controle sobre a área do estéreo-par UF-09×UF-25.

4. Abordagem Metodológica

4.1. Modelagem Matemática

Nas últimas décadas duas modelagens matemáticas têm sido utilizadas para orientação e posicionamento de sensores orbitais: modelo matemático rigoroso (ou modelo físico) e modelo matemático não rigoroso (modelo empírico). Geralmente, os modelos rigorosos são mais acurados que os modelos empíricos, pois consideram todas as informações do sensor, e de movimento do satélite e da Terra. Entretanto, a grande vantagem de simplificar a relação entre os espaços imagem e objeto usando os modelos matemáticos empíricos é que um conjunto de equações pode ser usado diretamente e pode ser aplicado a diferentes imagens de diferentes sensores (Shaker, 2008).

Um exemplo de modelo empírico é aquele baseado nos Coeficientes Polinomiais Racionais (*Rational Polynomial Coefficients* - RPCs), que tem grande interesse na comunidade de fotogrametria e sensoriamento remoto. É um modelo sensor generalizado, utilizado como uma alternativa ao modelo matemático rigoroso e faz pleno uso dos parâmetros auxiliares das imagens de satélite. Nesta modelagem as coordenadas dos pixels da imagem (linhas, colunas) são expressas como a razão de polinômios das coordenadas do terreno (Latitude, Longitude, Altitude) (Zhang et al., 2010).

4.2. Geração dos DSMs e ortoimagens

Os DSMs e as ortoimagens RST-2 UF foram gerados com base na modelagem matemática RPC, sem e com um GCP, disponível no módulo *OrthoEngine* do software *PCI Geomatica V10.3*.

As etapas para geração do DSM e ortoimagens sem pontos de controle foram: 1) criação do projeto; 2) leitura das imagens; 3) coleta de pontos de amarração (*Tie Points* – TPs); 4) geração de imagens epipolares; 5) geração e geocodificação do DSM com 4 metros de resolução espacial; 6) geração das ortoimagens; e 7) análise estatística dos resultados.

As etapas para geração do DSM e ortoimagens com um ponto de controle foram: 1) criação do projeto; 2) leitura das imagens; 3) coleta de um ponto de controle (GCP); 4) coleta de pontos de amarração (TPs); 5) geração de imagens epipolares; 6) geração e geocodificação do DSM com 4 metros de resolução espacial; 7) geração das ortoimagens; e 8) análise estatística dos resultados.

Para a análise estatística dos produtos gerados, foram utilizados 30 pontos independentes de verificação (*Independent Check Points* – ICPs) selecionados a partir dos pontos de controle levantados nas campanhas de campo de 2008 e 2009.

5. Resultados e Discussões

5.1. DSM e ortoimagens gerados sem GCP

O DSM e a ortoimagem UF-09 gerados sem GCP e a distribuição dos 30 ICPs, utilizados para a avaliação da acurácia destes produtos, são apresentados na Figura 4.

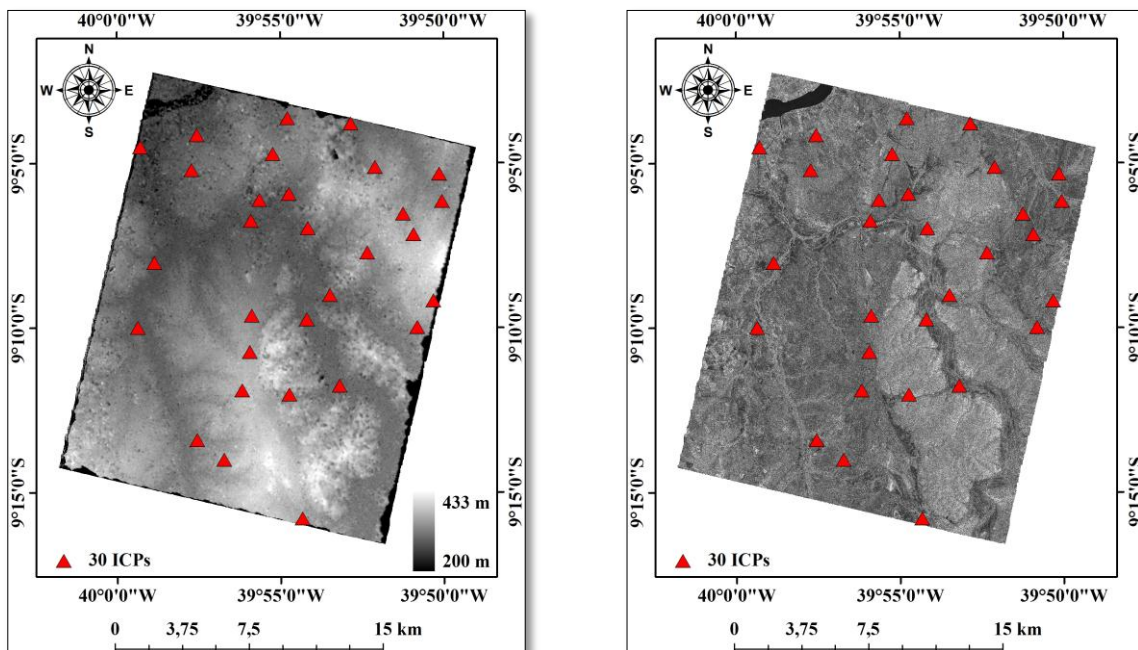


FIGURA 4 – DSM e ortoimagem UF-25 gerados sem GCP e distribuição dos 30 ICPs.

5.2. DSM e ortoimagens gerados com um GCP

O DSM e a ortoimagem UF-09 gerados com um GCP e a distribuição dos 30 ICPs, utilizados para a avaliação da acurácia destes produtos, são apresentados na Figura 5.

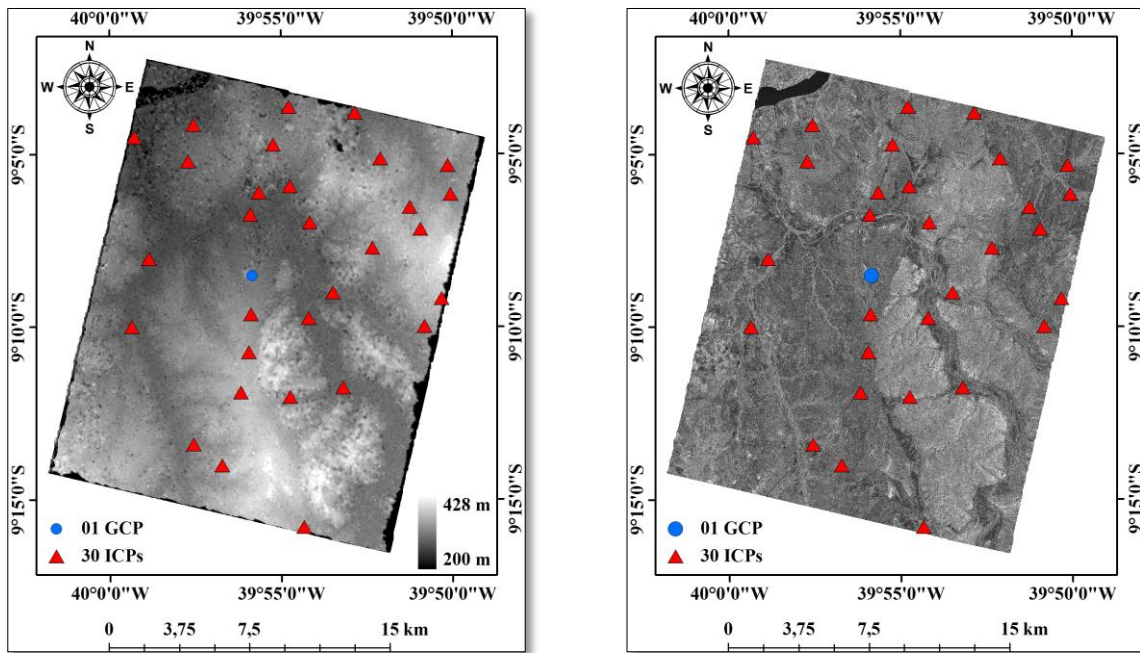


FIGURA 5 – DSM e ortoimagem UF-25 gerados com um GCP e distribuição dos 30 ICPs.

5.3. Análises estatísticas dos DSMs e ortoimagens

As análises estatísticas dos produtos gerados foram calculadas através da comparação entre os valores de elevação dos DSMs e valores das componentes planimétricas (E, N) das ortoimagens, com as coordenadas planialtimétricos obtidas dos 30 ICPs. As análises estatísticas foram realizadas seguindo a metodologia proposta por Galo e Camargo (1994): cálculo de erros sistemáticos (tendência) e precisão. Estas análises são realizadas a partir do cálculo das médias dos resíduos amostrais (μ), para avaliar a presença de erros sistemáticos, e do desvio padrão amostral (s), para avaliar a precisão dos produtos. Para isto, os testes estatísticos de *t-Student* e *Qui-quadrado* são utilizados, respectivamente.

O teste para avaliar a presença de erros sistemáticos (tendência) nos produtos gerados é realizado pela comparação entre os valores tabelados de $t_{(n-1,\alpha)}$ com a estatística amostral $t_{amostral}$, baseada na equação (1):

$$t_{amostral} = \frac{\mu}{s} \sqrt{n}, \quad (1)$$

na qual n é o número de amostras testadas.

Se $|t_{amostral}| < t_{(n-1,\alpha)}$, então o produto testado é aceito como livre de erro sistemático. O teste para avaliar a precisão dos produtos gerados é realizado pela comparação entre os valores tabelados de $\chi^2_{(n-1,\alpha)}$ com a estatística $\chi^2_{amostral}$, baseada na equação (2):

$$\chi^2_{amostral} = (n - 1) \frac{s^2}{\sigma^2}, \quad (2)$$

na qual s varia em função da escala do mapa testado.

Considerando que o Erro Padrão de um produto cartográfico é fixado não para uma coordenada, mas para a resultante, considera-se para os testes altimétricos $\sigma = EP$ e para os testes planimétricos $\sigma = EP/\sqrt{2}$. Se $|\chi^2_{amostral}| < \chi^2_{(n-1,\alpha)}$, então o produto testado atende a precisão para a escala do mapa testada.

Os valores de μ e s para os DSMs e ortoimagens gerados são apresentados nas Tabelas 2 e 3, respectivamente.

Tabela 2. Valores de μ e s para os DSMs gerados.

DSM	Média das Discrepâncias (μ)	Desvio Padrão (s)
Sem GCP	3,990 m	4,790 m
Com 1 GCP	-0,443 m	3,604 m

Tabela 3. Valores de μ e s para as ortoimagens geradas.

Ortoimagens		Média das Discrepâncias (μ)	Desvio Padrão (s)
Sem GCP	UF-09 (E)	18,837 m	4,948 m
	UF-09 (N)	-10,138 m	5,368 m
	UF-25 (E)	20,243 m	5,484 m
	UF-25 (N)	-8,632 m	5,075 m
Com 1 GCP	UF-09 (E)	-0,822 m	2,936 m
	UF-09 (N)	-2,397 m	2,357 m
	UF-25 (E)	-1,438 m	2,540 m
	UF-25 (N)	-1,233 m	1,672 m

Os resultados da análise de erros sistemáticos (tendência), para os DSMs e ortoimagens gerados, são apresentados nas Tabelas 4 e 5, respectivamente.

Tabela 4. Resultados da análise de erro sistemático (tendência) para os DSMs.

DSM	$t_{amostral}$	$t_{(30-1;5\%)}$	$t_{amostral} < t_{(30-1;5\%)}$
Sem GCP	4,563	1,699	FALSO
Com 1 GCP	0,673	1,699	VERDADEIRO

Tabela 5. Resultados da análise de erros sistemáticos (tendência) para as ortoimagens.

Ortoimagens		$t_{amostral}$	$t_{(30-1;5\%)}$	$t_{amostral} < t_{(30-1;5\%)}$
Sem GCP	UF-09 (E)	20,850	1,699	FALSO
	UF-09 (N)	10,345	1,699	FALSO
	UF-25 (E)	20,219	1,699	FALSO
	UF-25 (N)	9,316	1,699	FALSO
Com 1 GCP	UF-09 (E)	1,533	1,699	VERDADEIRO
	UF-09 (N)	5,570	1,699	FALSO
	UF-25 (E)	3,102	1,699	FALSO
	UF-25 (N)	4,039	1,699	FALSO

Os resultados da análise de precisão, para os DSMs e ortoimagens gerados, são apresentados nas Tabelas 6 e 7, respectivamente.

Tabela 6. Resultados da análise de precisão dos DSMs para a escala 1:50.000 Classe A.

DSM	$\chi^2_{amostral}$	$\chi^2_{(30-1;10\%)}$	$\chi^2_{amostral} < \chi^2_{(30-1;10\%)}$
Sem GCP	14,971	39,087	VERDADEIRO
Com 1 GCP	8,474	39,087	VERDADEIRO

Tabela 7. Resultados da análise de precisão das ortoimagens para a escala 1:50.000 Classe A.

Ortoimagens		$\chi^2_{amostral}$	$\chi^2_{(30-1;10\%)}$	$\chi^2_{amostral} < \chi^2_{(30-1;10\%)}$
Sem GCP	UF-09 (E)	6,312	39,087	VERDADEIRO
	UF-09 (N)	7,427	39,087	VERDADEIRO
	UF-25 (E)	7,752	39,087	VERDADEIRO
	UF-25 (N)	6,638	39,087	VERDADEIRO
Com 1 GCP	UF-09 (E)	2,222	39,087	VERDADEIRO
	UF-09 (N)	1,433	39,087	VERDADEIRO
	UF-25 (E)	1,663	39,087	VERDADEIRO
	UF-25 (N)	0,721	39,087	VERDADEIRO

Com base nos resultados apresentados nas Tabelas 2 e 3, pode-se verificar que a inclusão de apenas um GCP na modelagem RPC resultou numa melhora de aproximadamente 33% na acurácia do DSM e aproximadamente 55% na acurácia das ortoimagens. Dos resultados apresentados nas Tabelas 4 e 5, pode-se verificar que apenas o DSM gerado com um GCP não apresentou erro sistemático (tendência). Com base nos resultados da análise de precisão (Tabelas 6 e 7), todos os produtos podem ser classificados na Classe A para a escala 1:50.000. Entretanto, vale ressaltar que os produtos gerados sem GCPs apresentaram tendência significativa e isto deve ser levado em consideração quando da utilização destes produtos.

6. Conclusões

Os resultados apresentados neste trabalho demonstraram que a utilização conjunta das imagens RADARSAT-2, modo Ultra-Fine, com a modelagem matemática baseada nos Coeficientes Polinomiais Racionais (*Rational Polynomial Coefficients* - RPCs), apresenta grande potencial para a produção cartográfica de escala 1:50.000, Classe A. Além disso, quando pontos de controle não estão disponíveis, pode-se gerar DSMs e ortoimagens com acurácia compatível com a escala 1:50.000, mesmo que estes produtos apresentem erros sistemáticos (tendência). A utilização de apenas um GCP apresentou resultado livre de tendência apenas para o DSM gerado e a continuidade deste trabalho irá investigar a quantidade mínima de GCPs para que ortoimagens possam ser geradas sem tendência.

Agradecimentos

Os autores da pesquisa agradecem à (1) CSA (SOAR proposta # 2356) e (2) CAPES/CNPq pelo suporte de bolsas de pesquisa (primeiro e segundo autores, respectivamente).

Referências

Galo M.; Camargo P.O. O uso do GPS no controle de qualidade de cartas. In: Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário (COBRAC-1994), 1, **Anais...** UFSC, Florianópolis, SC, Brasil, 1994.

Lewis, A. J.; Henderson, F. M.; Holcomb, D. W. Radar Fundamentals: the geoscience perspective In: Henderson, F.; Lewis, A. **Principles & applications of imaging radar**, manual of remote sensing, 3. ed. New York: John Wiley & Sons, 1998, cap. 3, p. 132-181.

MDA - MacDonald Dettwiler. **RADARSAT-2 - A New Era In SAR**. Disponível em: <<http://www.radarsat2.info>>. Acesso em: 10 jul. 2008.

Paradella, W. R.; Cecarelli, I.C. F.; Luiz, S.; Morais, M.C.; Oliveira, C. G.; Cottini, C., A Geração de Modelos Digitais de Elevação pela Estereoscopia de Radar: conhecimento atual e resultados com imagens RADARSAT-1 na Amazônia. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 10, 2001, Foz do Iguaçu, PR **Anais...**São José dos Campos: INPE, 2001.

Paradella, W.R.; Vitorello, I. Geobotanical and soil spectral investigation in the “Caatinga” environment (Brazil) base on multitemporal remote sensing data. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v.21, n. 1, p. 52 - 59, 1995.

Shaker, A. Satellite sensor modeling and 3D geo-positioning using empirical models. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 10, p.282-295, 2008.

Staples, G.; Hornsby, J.; Branson, W.; O’Neill, K.; Rolland, P. Turning the scientifically possible into the operationally practical: RADARSAT-2 commercialization plan. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 30, n. 3, p. 408 – 414, 2004.

Zhang, G.; Fei, W.; Li, Z.; Zhu, X.; Li, D. Evaluation of the RPC Model for Spaceborne SAR Imagery. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 76, n. 6, p. 727-733, 2010.