

Avaliação da qualidade geométrica das imagens TM-LANDSAT

Antônio José Ferreira Machado e Silva ¹

Júlio Cesar Lima d'Alge ²

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

¹ Divisão de Desenvolvimento de Sistemas – DDS

² Divisão de Sensoriamento Remoto – DSR

Resumo

O objetivo deste trabalho é avaliar a qualidade geométrica das imagens analógicas TM-LANDSAT processadas pelo INPE com a finalidade de definir a escala máxima de utilização destas imagens como bases planimétricas para cartas topográficas e temáticas. O processamento das imagens pode ser feito com base em três níveis de correção geométrica de sistema (G=2, G=3, G=4) realizadas através de um modelo fotogramétrico baseado em equações de colinearidade. Os diferentes níveis de correção correspondem a dimensões diferentes da grade de "break-points". Os resultados mostram um erro médio quadrático de cerca de 54m para o nível 2, 50m para o nível 3 e 47m para o nível 4, o que significa ser 1:100.000 a escala máxima de utilização das imagens TM-LANDSAT como bases planimétricas.

Abstract

The purpose of this investigation is to evaluate the geometric quality of analog TM-LANDSAT images processed at INPE in order to define the maximum scale for the use of these images as planimetric bases for topographic and thematic maps. Image processing is based on three geometric correction levels (G=2, G=3, G=4) that are established through a photogrammetric model based on collinearity condition equations. The different correction levels correspond to different sizes of the break-point grid. Results show a root mean square error of about 54m for level 2, 50m for level 3, and 47m for level 4. This means that 1:100,000 is the maximum scale for the application of TM-LANDSAT images as planimetric bases.

Introdução

Os dados provenientes do sensor Mapeador Temático (“Thematic Mapper”) tornaram-se disponíveis aos usuários a partir do lançamento do quarto satélite da série LANDSAT em 1982. O sensor TM representou um grande avanço para a Cartografia devido ao seu maior poder resolutivo e maior número de bandas espectrais (tabela 1) em relação aos demais sensores orbitais até então existentes para fins civis.

TABELA 1 – BANDAS ESPECTRAIS DO SENSOR TM

BANDA ESPECTRAL	COMPRIMENTO DE ONDA (μm)	REGIÃO DO ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO	RESOLUÇÃO (m)
1	0,45 – 0,52	AZUL	30
2	0,52 – 0,60	VERDE	30
3	0,63 – 0,69	VERMELHO	30
4	0,76 – 0,90	IV PRÓXIMO	30
5	1,55 – 1,75	IV MÉDIO	30
7	2,08 – 2,35	IV MÉDIO	30
6	10,40 – 12,50	IV TERMAL	120

O sensor TM é composto, de forma simplificada, de um sistema ótico responsável pela filtragem da região desejada do espectro eletromagnético, de um espelho oscilante e de um conjunto de detetores (sensores propriamente ditos). A cena TM mede 185km x 185km e é formada por 386 varreduras. Cada varredura tem 16 linhas e cada linha tem 6.320 pixels.

Para se aumentar o poder resolutivo sem que se alterassem as características orbitais do satélite (deve-se lembrar que a plataforma é comum aos sistemas MSS e TM), e se mantivessem a taxa de amostragem do sensor e a abrangência da varredura, foi necessário duplicar o tempo útil da varredura, tornando-a ativa nos dois sentidos. A tabela 2 mostra o cálculo dos parâmetros de tempo útil e largura de varredura para os sistemas MSS e TM.

TABELA 2 – TEMPO ÚTIL E LARGURA DE VARREDURA

PARÂMETRO	TM	MSS
Tempo útil (mseg)	$6.320 \times 9,611 \mu\text{seg} = 60,742$	$3.240 \times 9,958 \mu\text{seg} = 32,264$
Largura (m)	$16 \times 30\text{m}$ ou $4 \times 120\text{m} = 480$	$6 \times 80\text{m}$ ou $2 \times 240\text{m} = 480$

Deste modo, tanto o sensor TM quanto o sensor MSS varrem praticamente a mesma região da Terra de forma simultânea.

Distorções geométricas

As distorções geométricas encontradas nas imagens TM são semelhantes às distorções existentes naquelas do sensor MSS, podendo ser classificadas como internas ou externas ao sistema de imageamento.

As principais distorções internas são devidas a:

- arrastamento da imagem durante uma varredura;
- não linearidade do movimento do espelho;
- variação do tempo útil de varredura, com a conseqüente variação no comprimento da varredura (em pixels).

O arrastamento da varredura na imagem TM tem um sentido diferente do mesmo efeito na imagem MSS. Durante uma oscilação ativa do espelho do sensor MSS o satélite está em movimento, causando varreduras não perpendiculares ao traço da órbita ("groundtrack") do satélite (figura 1a). Na imagem TM é necessária uma compensação no movimento do espelho para evitar que o arrastamento provoque um efeito de "zig-zague" na imagem (figura 1b). Assim, o espelho, durante sua oscilação lateral, sofre um efeito de compensação ao movimento do satélite deslocando-se para trás. Isto faz com que as varreduras se ajustem perpendicularmente ao traço da órbita (figura 1c).

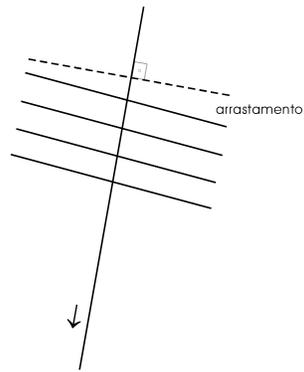


Figura 1a – Arrastamento na imagem MSS.

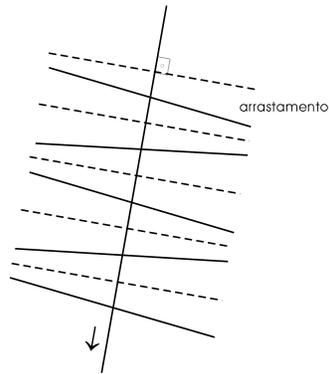


Figura 1b – Arrastamento na imagem TM (sem compensação).

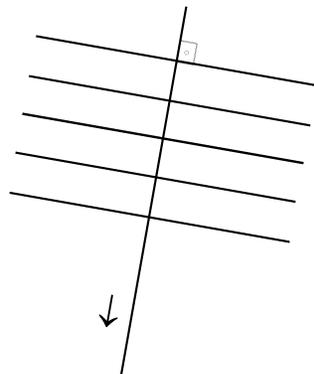


Figura 1c – Posição normal das varreduras.

O arrastamento fica então por conta de variações da velocidade do satélite, que afastam ligeiramente a varredura de sua posição normal ao traço da órbita.

As principais distorções externas são devidas a:

- variação da atitude (rolamento, arfagem e guinada) ao longo da cena;
- variação da velocidade e da altitude;
- rotação e esfericidade da Terra.

Essas são as principais fontes de distorção geométrica das imagens TM-LANDSAT. Para eliminar os efeitos provocados por tais distorções o INPE adotou um modelo fotogramétrico fundamentado no princípio das equações de colinearidade.

O objetivo do método é relacionar cada ponto da imagem, através de suas coordenadas (linha, coluna), com um ponto sobre o elipsóide de referência, através de suas coordenadas geodésicas, latitude (ϕ) e longitude (λ) (figura 2). A altitude é considerada nula, pois o desconhecimento de um modelo de elevação do terreno implica no posicionamento do ponto sobre a superfície do elipsóide em questão.

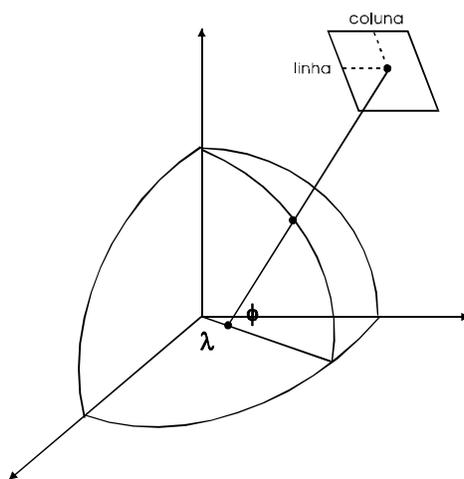


Figura 2 – Relação entre imagem e elipsóide.

O modelo de equações de colinearidade apresenta diversas vantagens, dentre as quais pode-se destacar:

- eliminação de praticamente todas as distorções, internas ou externas ao sistema de imageamento, de baixa ou de alta frequência;
- a interdependência das diversas distorções é considerada no modelo;
- um pequeno número de pontos de controle pode ser usado (apesar de não ser obrigatório) para refinar a qualidade geométrica do produto final.

Níveis de correção geométrica

As imagens TM processadas no INPE apresentam cinco níveis de correção geométrica.

Nível 0:

Não são realizadas correções geométricas.

Nível 1:

Este nível só é processado quando não se tem acesso aos dados de efemérides e atitude que o satélite transmite. Os dados de efemérides podem então ser obtidos a partir dos parâmetros orbitais do satélite e a atitude é considerada nula. Os procedimentos são idênticos aos que serão descritos no nível 2.

Nível 2:

O modelo de equações de colinearidade é aplicado sobre duas grades primárias regulares de 25x18 "break-ponts" (uma grade para varreduras ímpares e outra para varreduras pares). Para cada "break-point" de uma grade primária são conhecidos os pares ordenados (linha, coluna) e (latitude, longitude).

As coordenadas geodésicas são transformadas para coordenadas plano-retangulares de uma certa projeção cartográfica, sendo então transladadas e rotacionadas para o sistema de referência plano-retangular da imagem (X_{im} , Y_{im}).

A partir dos conjuntos de pares ordenados de coordenadas de imagem são determinados polinômios do 5^o grau, completos (21 coeficientes em cada equação), que relacionam (linha, coluna) com coordenadas plano-retangulares de imagem (X_{im} , Y_{im}):

$$X_{im} = a_0 + a_1\text{linha} + a_2\text{coluna} + \dots + a_{19}\text{linha}^5 + a_{20}\text{coluna}^5,$$
$$Y_{im} = b_0 + b_1\text{linha} + b_2\text{coluna} + \dots + b_{19}\text{linha}^5 + b_{20}\text{coluna}^5.$$

O sistema resultante é sobredeterminado (25x18 equações para 42 parâmetros a determinar), sendo então utilizado o método dos mínimos quadrados para solucionar o problema.

Quando da aplicação da correção, as grades primárias são recuperadas a partir dos polinômios. Estas são ampliadas para 193x50 utilizando-se interpolação linear na direção do traço da órbita (25→193) e interpolação cúbica ao longo das varreduras (18→50). Finalmente aplica-se para cada ponto da imagem, analogicamente, uma interpolação linear para determinação das coordenadas plano-retangulares de imagem.

Nível 3:

Os procedimentos são idênticos aos aplicados ao nível 2, mas são suprimidas as etapas de determinação dos polinômios de 5^o grau para recuperação posterior das grades primárias. As grades primárias são ampliadas diretamente para 193x50 "break-points".

Nível 4:

O modelo de equações de colinearidade é aplicado a duas grades de 193x18 "break-points", transformando-se posteriormente as coordenadas geodésicas em plano-retangulares no sistema da imagem (X_{im} , Y_{im}).

As grades são ampliadas para 193x50 por meio de interpolação cúbica ao longo das varreduras. A cada ponto da imagem é aplicada interpolação linear para a determinação das coordenadas plano-retangulares de imagem.

O Sistema de Processamento e Geração de imagens TM-LANDSAT está apto a gerar imagens corrigidas em duas projeções cartográficas: SOM ("Space Oblique Mercator") e UTM ("Universal Transverse Mercator").

O produto padrão do INPE é o de nível 2. Diariamente são aplicados os cálculos de correção geométrica para todas as cenas adquiridas pela Estação de Recepção e Gravação, sendo então armazenados os diversos conjuntos de coeficientes dos polinômios de 5^a grau. Quando o usuário solicita uma imagem com nível 2 de correção geométrica o sistema recupera os coeficientes relativos à imagem em questão e dá prosseguimento aos procedimentos para correção geométrica. Ao ser solicitada uma imagem com nível 3 ou 4 de correção geométrica o sistema precisa recuperar os dados de efemérides e atitude relativos à cena e então proceder a todos os passos necessários para a correção em questão.

Os polinômios de 5^a grau servem, portanto, para economizar memória (42 coeficientes contra 840 valores de latitude/longitude) e tempo de processamento.

A seguir serão apresentados a metodologia e os resultados da avaliação geométrica das imagens TM nos níveis 2, 3 e 4, tanto para a projeção UTM quanto para a projeção SOM.

Material

Foram utilizadas 18 imagens TM-LANDSAT na escala 1:1.000.000 (banda 3), em transparência positiva, sobre Eliseu Martins (PI), Florianópolis (SC) e São Paulo (SP). Para cada localidade foi produzido um conjunto de 6 imagens, constituído por 3 imagens SOM (G=2, G=3, G=4) e 3 imagens UTM (G=2, G=3, G=4).

Cartas topográficas na escala 1:50.000 foram usadas para controlar a geometria das imagens.

Segue-se a descrição da órbita/base de cada cena citada:

- ELISEU MARTINS 219/66
- FLORIANÓPOLIS 220/79
- SÃO PAULO 219/76

O instrumento utilizado para medir coordenadas de imagem foi o estereocomparador da Carl Zeiss Jena, Stecometer C, cujas características são descritas abaixo:

- precisão de leitura em X e Y: $1\mu\text{m}$;
- erro médio das coordenadas: $< 2\mu\text{m}$.

Para a medição de coordenadas de carta utilizou-se o Datagrid, da Bendix, que tem as seguintes características:

- precisão da leitura em X e Y: $25,4\mu\text{m}$;
- erro médio das coordenadas: $50,8\mu\text{m}$.

Metodologia

Inicialmente foram escolhidos os pontos de controle sobre as cartas e as imagens. Das cartas topográficas foram extraídas, por interpolação, as coordenadas geodésicas dos pontos de controle, formando um arquivo PCCARTA.DAT por cena. Devido às características do Datagrid e à escala das cartas adotadas, o erro médio de leitura das coordenadas é inferior a $2,5\text{m}$. Quando da medição de coordenadas de imagem é gerado um arquivo PCIMAGEM.DAT para cada cena. Levando em conta as características do Stecometer C e a escala das imagens, o erro médio de leitura das coordenadas é inferior a 2m .

É fácil, portanto, concluir que o erro maior fica por conta da identificação dos pontos de controle em cada imagem TM-LANDSAT. A resolução do olho humano é, em média, 0,2mm. Utilizando-se uma lente com fator de ampliação de 8 vezes, a incerteza na identificação dos pontos sobre as imagens gira em torno de 25m, ou seja, é inferior a 1 ponto ("pixel").

É bom lembrar que os arquivos PCCARTA.DAT não dependem de projeção cartográfica nem de nível de correção geométrica. O mesmo já não acontece com os arquivos PCIMAGEM.DAT, pois eles são gerados para cada par projeção-nível de correção geométrica.

A comparação entre as coordenadas de imagem e de carta é realizada sobre sistemas plano-retangulares, sendo então necessário transformar as coordenadas geodésicas (PCCARTA.DAT) em coordenadas plano-retangulares de uma projeção qualquer. O presente estudo, como já foi dito, restringiu-se às projeções SOM e UTM. Assim, cada um dos arquivos PCCARTA.DAT originou dois arquivos de coordenadas planas: PCSOM.DAT e PCUTM.DAT. Estes arquivos foram comparados com o arquivo PCIMAGEM.DAT através de transformações geométricas que levam o plano da imagem para o plano de projeção procurando minimizar os resíduos existentes entre os dois conjuntos de pontos:

$$\text{PCUTM.DAT} = f(\text{PCIMAGEM.DAT}) \quad \therefore (X_u, Y_u) = f(X_{im}, Y_{im});$$

$$\text{PCSOM.DAT} = f(\text{PCIMAGEM.DAT}) \quad \therefore (X_s, Y_s) = f(X_{im}, Y_{im}).$$

O trabalho utilizou transformações polinomiais e transformações de afinidade e de similaridade. Essas transformações são descritas em detalhe a seguir.

Transformação de similaridade

Esta transformação não introduz distorções no plano da imagem, pois restringe-se a uma rotação, um fator de escala e duas translações. O modelo matemático é representado por

$$X_u(X_s) = X_0 + kX_{im}\cos\theta + kY_{im}\sin\theta,$$

$$Y_u(Y_s) = Y_0 + KY_{im}\cos\theta - kX_{im}\sin\theta,$$

onde k é o fator de escala, θ é o ângulo de rotação e X_0 e Y_0 são as translações.

Transformação de afinidade

Nesta transformação o paralelismo é mantido, mas as formas podem sofrer modificações. O exemplo clássico é o de um quadrado que se transforma num paralelogramo. A transformação fica determinada através de seis parâmetros ($A_0, A_1, A_2, B_0, B_1, B_2$) e seu modelo matemático é

$$X_u(X_s) = A_0 + A_1X_{im} + A_2Y_{im},$$

$$Y_u(Y_s) = B_0 + B_1X_{im} + B_2Y_{im}.$$

Transformações polinomiais

Foram usadas transformações polinomiais completas, de 2^o ao 4^o grau, e transformações polinomiais envolvendo termos de primeiro grau acrescidos de um termo de grau variando entre 2 e 5, ou seja,

$$X_u(X_s) = A_0 + A_1X_{im} + A_2Y_{im} + A_3X_{im}^nY_{im}^m,$$

$$Y_u(Y_s) = B_0 + B_1X_{im} + B_2Y_{im} + B_3X_{im}^nY_{im}^m,$$

onde $2 \leq n + m \leq 5$.

Essas transformações polinomiais foram aplicadas para se tentar definir os coeficientes que ainda diminuem os resíduos encontrados após a aplicação da transformação de afinidade. O polinômio completo do 5^o grau não foi testado devido ao grande número de pontos de controle necessários à determinação de seus coeficientes.

Resultados

As tabelas 3, 4 e 5 mostram os resultados da avaliação geométrica das imagens através das transformações de similaridade. Convém lembrar que o eixo x é

definido pelo traço da órbita do satélite e o eixo y é definido pelas varreduras. O erro médio quadrático, RMS, é dado em metros.

TABELA3 – SÃO PAULO (13 PONTOS DE CONTROLE)

PROJEÇÃO	G	RMS _x	RMS _y	RMS _{xy}
UTM	2	40,4	37,5	55,1
UTM	3	33,6	36,4	49,5
UTM	4	34,0	27,5	43,7
SOM	2	41,2	36,9	55,3
SOM	3	34,1	36,3	49,8
SOM	4	33,8	27,3	43,4

TABELA4 – ELISEU MARTINS (13 PONTOS DE CONTROLE)

PROJEÇÃO	G	RMS _x	RMS _y	RMS _{xy}
UTM	2	34,7	37,6	51,2
UTM	3	33,2	35,8	48,8
UTM	4	31,6	35,0	47,2
SOM	2	35,6	37,3	51,6
SOM	3	33,7	36,1	49,4
SOM	4	32,6	34,8	47,7

TABELA5 – FLORIANÓPOLIS (14 PONTOS DE CONTROLE)

PROJEÇÃO	G	RMS _x	RMS _y	RMS _{xy}
UTM	2	45,3	36,4	58,1
UTM	3	40,6	36,1	54,3
UTM	4	38,8	36,0	52,9
SOM	2	43,2	36,1	56,3
SOM	3	40,2	35,4	53,6
SOM	4	38,4	35,6	52,4

É oportuno ressaltar o número total de pontos de controle identificados em cada imagem. Em SÃO PAULO foram obtidos 31 pontos, sendo 13 destinados à determinação dos parâmetros e outros 13 usados no cálculo dos RMS (5 pontos foram descartados). Em ELISEU MARTINS foram identificados 26 pontos e, novamente, dois conjuntos distintos de 13 pontos foram utilizados para a determinação dos parâmetros da transformação e dos RMS.

Enfatiza-se que, apesar do maior número de pontos de controle identificados em FLORIANÓPOLIS, houve também uma maior dificuldade para a realização dessa tarefa. Isto significa que os dois conjuntos de 14 pontos usados na determinação dos parâmetros e dos RMS possuem qualidade inferior aos que foram utilizados em SÃO PAULO E ELISEU MARTINS, o que de certa forma explica os valores um pouco maiores mostrados na tabela 5.

A observação das tabelas 3, 4 e 5 torna evidente a ordem crescente de qualidade geométrica das imagens testadas: $G=2$, $G=3$, $G=4$. Os níveis 3 e 4 de correção mostram resultados compatíveis com o erro planimétrico admitido em cartas 1:100.000. Quanto ao nível 2 pode-se afirmar que o registro entre imagem e carta ainda é feito com boa qualidade, pois os erros médios quadráticos encontrados, embora ligeiramente maiores, aproximam-se bastante do erro planimétrico padrão das cartas 1:100.000.

Determinadas distorções não são consideradas com a aplicação da transformação de similaridade. É o caso de escalas diferentes nas direções do traço da órbita e das varreduras, de um ângulo de "skew" (rotação da Terra) residual ou mesmo dos erros introduzidos pelas interpolações lineares realizadas. Aplicam-se, então, polinômios completos de 1^a grau (transformação de afinidade), 2^a, 3^a e 4^a grau e polinômios de 1^a grau acrescidos de termos isolados com grau variando de 2 a 5. Os resultados dessas transformações polinomiais indicam que o polinômio do 1^a grau modelou satisfatoriamente as distorções não consideradas pela transformação de similaridade. Nota-se também que dos termos isolados acrescidos ao polinômio de 1^a grau o único a dar uma contribuição sistemática é o termo Y^2 sobre as coordenadas X. Isto significa que prevalecem os seguintes modelos para o refinamento de qualidade geométrica do produto analógico TM processado pelo INPE:

$$X_u(X_s) = A_0 + A_1X_{im} + A_2Y_{im} + A_3Y_{im}^2,$$

$$Y_u(Y_s) = B_0 + B_1X_{im} + B_2Y_{im}.$$

ou então,

$$X_u(X_s) = A_0 + A_1X_{im} + A_2Y_{im},$$

$$Y_u(Y_s) = B_0 + B_1X_{im} + B_2Y_{im}.$$

A instabilidade relativa às contribuições dos demais termos isolados não permite conjecturas sérias à respeito de suas participações em modelos de refinamento da qualidade geométrica das imagens TM.

Os polinômios de 2^a, 3^a e 4^a grau completos apresentam resultados normalmente tendenciosos na medida em que a necessidade de um maior número de pontos de controle dificulta o uso de dois conjuntos distintos de pontos de controle para a determinação dos coeficientes e dos RMS.

Conclusões

Como o maior erro que interfere neste tipo de análise é o proveniente da identificação de pontos de controle sobre as imagens, sugere-se para trabalhos futuros a participação de vários técnicos para identificar pontos sobre imagens em diversas escalas. É interessante também que sejam testadas imagens em papel para permitir investigações à respeito do trabalho do papel e para fornecer aos usuários dados mais precisos sobre o produto mais difundido pelo INPE.

Para trabalhos em que as imagens TM sejam utilizadas como bases planimétricas é aconselhável que o usuário solicite os níveis de correção G=3 ou G=4, muito embora o nível G=2 possa ser usado com resultados bastante satisfatórios.

Com base nos resultados conseguidos com a transformação polinomial do 1^a grau ou transformação de afinidade, entende-se que o INPE deva adotar esta

transformação como parte integrante do conjunto de procedimentos de correção geométrica das imagens TM-LANDSAT.

A análise realizada neste trabalho indica que as imagens analógicas TM processadas pelo INPE podem ser utilizadas como bases planimétricas para cartas topográficas e temáticas em escala máxima de 1:100.000.

Bibliografia consultada

Borgeson, W. T.; Batson, R. M.; Kiefer, H. H. Geometric accuracy of LANDSAT-4 and LANDSAT-5 Thematic Mapper images. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 51(12):1893-1898. [1985].

Colvocoresses, A. P. Image mapping with Thematic Mapper. U. S. Geological Survey. [1985].

Ford, G. E.; Zanelli, C. I. Analysis and quantification of errors in the geometric correction of satellite images. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 51(11):1725-1734. [1985].

Machado e Silva, A. J. F. Modelo fotogramétrico para correção de imagens MSS-LANDSAT. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. [1984].

Welch, R; Jordan, T. R.; Ehlers, M. Comparative evaluation of the geodetic accuracy and cartographic potential of LANDSAT-4 and LANDSAT-5 Thematic Mapper image data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 51(9):1249-1262. [1985].