

QUALIDADE GEOMÉTRICA DE IMAGENS TM DO LANDSAT-5

Júlio Cesar Lima d'Alge

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE

Divisão de Processamento de Imagens – DPI

julio@dpi.inpe.br

1. Introdução

Qualquer imagem de satélite que venha a ser utilizada em mapeamentos temáticos ou na cartografia sistemática deve sujeitar-se a um processo de avaliação de sua qualidade geométrica. No caso de produtos LANDSAT, avaliações têm sido conduzidas pelo INPE e por várias empresas, universidades e instituições de pesquisa no exterior.

Kratky (1973) apresentou uma discussão geral a respeito dos problemas provenientes da adoção de uma determinada projeção cartográfica para o processamento de imagens MSS do LANDSAT-1. Imagens MSS, "bulk" e "precision", processadas no INPE, foram analisadas por Machado e Silva (1983), resultando para erro interno, respectivamente, 120m e 60m.

Welch, Jordan e Ehlers (1985) avaliaram imagens digitais TM com correção de sistema, nas projeções SOM e UTM, obtendo valores entre 7,5m e 30m para o erro interno e enfatizaram a necessidade de se extrair pontos de controle da imagem com uma precisão melhor que 1 pixel. Avaliações semelhantes foram conduzidas por Borgeson, Batson e Kieffer (1985) e por Machado e Silva e d'Alge (1986).

Este trabalho tem por objetivo apresentar aos usuários de produtos LANDSAT uma avaliação da qualidade geométrica das imagens digitais do sensor TM processadas no INPE com correção geométrica de sistema (Serra, 1987).

A avaliação foi conduzida de modo a fornecer informações ligadas à geometria interna das imagens (erro interno e variações de escala ao longo da órbita e das varreduras) e informações a respeito do erro de posicionamento. Os dados

sobre a geometria interna das imagens são importantes para o registro entre as imagens e o sistema de coordenadas planas UTM, sendo então de interesse para a produção de cartas temáticas ou atualização de cartas planimétricas. Já as informações sobre o erro de posicionamento interessam diretamente à confecção de cartas planimétricas em regiões desprovidas de documentos cartográficos, ou então à identificação de feições com base em coordenadas geodésicas.

2. Metodologia

2.1 Considerações iniciais

A experiência acumulada pelo INPE nas avaliações de qualidade geométrica de imagens LANDSAT realizadas nos últimos anos (Machado e Silva, 1983; Machado e Silva e d'Alge, 1986) e a literatura internacional mostram que a variação da área de estudo para a análise de um determinado produto faz-se necessária quando se deseja investigar os efeitos da quantidade de pontos de controle e das distorções devido ao relevo sobre os resultados da avaliação. No presente caso, optou-se por uma única área de estudo de relevo moderado, dotada de um número suficiente de pontos de controle. Devido ao alto grau de similaridade entre as projeções SOM e UTM (Welch et alii, 1985; d'Alge e Machado e Silva, 1986), fixou-se esta última para a imagem TM a ser avaliada. Assim sendo, a área de estudo abrange a região noroeste do estado de São Paulo e a avaliação foi realizada sobre uma CCT, WRS 222/075, quadrante B, de 24 de agosto de 1985, na banda 3 ($0,63\mu\text{m} \leq \lambda \leq 0,69\mu\text{m}$), com correção geométrica de sistema ($G = 2$).

2.2 Levantamento de pontos de controle

A escolha da banda 3 do sensor TM diz respeito às feições escolhidas para pontos de controle: cruzamentos de rodovias. Para facilitar a tarefa de identificar pontos de controle foram utilizadas uma imagem em papel na escala 1:250.000 e uma transparência positiva na escala 1:500.000 do quadrante em questão.

As seguintes cartas topográficas na escala 1:50.000 foram usadas para controlar a geometria da imagem:

Araçatuba	- 1967 (IGGSP),
Birigui	- 1967 (IGGSP),
Buritama	- 1967 (IGGSP),
Aracanguá	- 1967 (IGGSP),
Ribeiro do Vale	- 1967 (IGGSP),
Penápolis	- 1967 (IGGSP),
Gastão Vidigal	- 1967 (IGGSP),
Guararapes	- 1967 (IGGSP),
Major Prado	- 1967 (IGGSP),
Planalto	- 1972 (FIBGE),
Clementina	- 1974 (FIBGE),
Rinópolis	- 1974 (FIBGE).

O procedimento inicial foi a ampliação da transparência positiva 1:500.000 para a escala das cartas topográficas através do projetor PROCOM (Gregory Geoscience), quando então foi feita a escolha preliminar dos pontos de controle com base nos registros entre a imagem e as cartas. Não houve nesta etapa preocupação em se detectar erros grosseiros provenientes da desatualização das cartas utilizadas.

O passo seguinte consistiu numa análise visual mais rigorosa sobre a imagem e as cartas com a finalidade de se eleger um subconjunto formado pelos melhores pontos de controle. Resultaram então 28 pontos bem distribuídos, os quais foram marcados e numerados sobre as cartas topográficas e sobre a imagem em papel na escala 1:250.000.

Com o auxílio de um coordenatógrafo DZT (Zeiss/Jena) e de um software para interpolação linear foram determinadas as coordenadas plano-retangulares UTM dos 28 pontos de controle. Em seguida, através do visualizador COMTAL (ligado a um computador VAX 11/780) foram retiradas da imagem digital as coordenadas (linha, coluna) desses pontos de controle.

Enfatiza-se que 28 pontos de controle são mais que suficientes para uma determinação precisa dos parâmetros das transformações geométricas usadas neste trabalho para ajustar a imagem ao sistema de coordenadas UTM.

2.3 Transformações geométricas entre coordenadas de imagem e coordenadas de projeção

2.3.3 Transformação afim-ortogonal – 5 parâmetros

Sabe-se perfeitamente que uma transformação isogonal ou de similaridade fica definida através de quatro parâmetros: uma rotação, um fator de escala e duas translações. Por isso uma transformação desse tipo não introduz deformações no plano da imagem, sendo, portanto, indicada para a verificação do grau de similaridade entre dois sistemas de coordenadas.

Entretanto, como a imagem é formada por um conjunto de elementos de área (pixels) que foram definidos por filtragens e amostragens em duas direções ortogonais (Friedmann, 1981) e que passaram por um processo de reamostragem quando da aplicação da correção geométrica, é correto esperar que a utilização de dois fatores de escala – um ao longo das varreduras e outro na direção do traço da órbita – possa melhorar o registro entre coordenadas de imagem e coordenadas UTM. Enfatiza-se que a introdução deste quinto parâmetro pode resultar na absorção de erros residuais de "skew" (rotação da Terra) e de interpolações realizadas.

Assim sendo, a transformação afim-ortogonal tem o seguinte aspecto:

$$E = (J - J_0) \cdot \Delta p \cdot \cos \alpha + (I_0 - I) \cdot \Delta l \cdot \sin \alpha + E_0,$$
$$N = (J_0 - J) \cdot \Delta p \cdot \sin \alpha + (I_0 - I) \cdot \Delta l \cdot \cos \alpha + N_0.$$

Nas equações acima (E, N) são coordenadas UTM, (I, J) são coordenadas de imagem, I_0 e J_0 são constantes ($I_0 = 1600$, $J_0 = 1750$), α é o ângulo de orientação, Δp é o fator de escala ao longo das varreduras, Δl é o fator de escala na direção do traço da órbita e E_0 e N_0 são as translações.

2.3.2 Transformação de similaridade – 4 parâmetros

Esta transformação foi utilizada porque vem de encontro às operações que um número restrito de usuários pode, analógica ou analiticamente, realizar sobre as imagens: uma ampliação (ou redução), uma rotação e duas translações. O modelo matemático assemelha-se ao da transformação afim-ortogonal fazendo $\Delta p = \Delta l$, ou seja:

$$E = (J - J_0) \cdot \Delta p \cdot \cos \alpha + (I_0 - I) \cdot \Delta p \cdot \sin \alpha + E_0,$$
$$N = (J_0 - J) \cdot \Delta p \cdot \sin \alpha + (I_0 - I) \cdot \Delta p \cdot \cos \alpha + N_0.$$

2.3.3 Transformação ortogonal – 3 parâmetros

Visando abranger o maior número possível de usuários foi utilizada também uma transformação ortogonal, que fixa em 30m o fator de escala (tamanho do pixel imposto na reamostragem) e oferece somente três graus de liberdade: uma rotação e duas translações. O modelo matemático é o mesmo da transformação de similaridade fazendo $\Delta p = 30m$:

$$E = 30 \cdot (J - J_0) \cdot \cos \alpha + 30 \cdot (I_0 - I) \cdot \sin \alpha + E_0,$$
$$N = 30 \cdot (J_0 - J) \cdot \sin \alpha + 30 \cdot (I_0 - I) \cdot \cos \alpha + N_0.$$

2.3.4 Cálculo dos parâmetros das transformações

O método dos mínimos quadrados (MMQ) foi utilizado para a obtenção de valores consistentes para as grandezas envolvidas nas transformações geométricas.

As coordenadas de projeção (E, N) e de imagem (I, J) foram consideradas observações e α , Δp , Δl , E_0 e N_0 foram determinados a partir do modelo combinado $F[(\alpha, \Delta p, \Delta l, E_0, N_0), (E_i, J_i, I_i, J_i)] = 0$, com i variando de 1 a 28, sujeito a iterações devido a não linearidade dos modelos matemáticos.

2.4 Cálculo da exatidão geodésica (erro global)

A CCT TM-LANDSAT com correção geométrica de sistema fornece, além dos dados de imagem, os valores de α , Δp , Δl , E_0 e N_0 estimados a partir dos dados de efemérides. A aplicação destes parâmetros às coordenadas (I, J) dos pontos de controle através das equações apresentadas permite o cálculo de coordenadas UTM (E' , N') que podem ser comparadas com as coordenadas UTM (E, N) retiradas das cartas topográficas. O valor médio das discrepâncias nas coordenadas E e N fornece uma estimativa para a exatidão geodésica ou erro global, que representa o erro resultante (em termos de posição e geometria interna) da utilização exclusiva dos dados da CCT.

2.5 Cálculo do erro interno

O ajustamento através do MMQ das transformações geométricas fornece resíduos em termos de coordenadas de imagem (I, J) para os 28 pontos de controle. O erro interno é então calculado através da expressão

$$\text{ERRO INTERNO} = 30. [\Sigma(\text{resíduos})^2/28]^{1/2},$$

com o resultado em metros. A informação de erro interno é complementada pelos dados de variações de escala. Para a transformação afim-ortogonal as variações de escala ao longo das linhas e das colunas são calculadas, respectivamente, por

$$\text{ESC-LINHA} = 100.(30 - \Delta p)/30,$$

$$\text{ESC-COLUNA} = 100.(30 - \Delta l)/30,$$

sendo Δp e Δl os valores estimados no ajustamento. Para a transformação de similaridade, por motivos óbvios, a variação de escala pode ser calculada por qualquer uma das equações acima.

2.6 Cálculo do erro de posicionamento

A avaliação do erro de posicionamento é feita através da comparação entre os parâmetros α , E_0 e N_0 fornecidos pela CCT e os mesmos parâmetros obtidos nos

ajustamentos via MMQ realizados. Assim sendo, para cada um dos modelos representados pelas transformações geométricas são calculadas as discrepâncias $\Delta\alpha$, ΔE_0 e ΔN_0 , através de:

$$\begin{aligned}\Delta\alpha &= \alpha \text{ (MMQ)} - \alpha \text{ (CCT)}, \\ \Delta E_0 &= E_0 \text{ (MMQ)} - E_0 \text{ (CCT)}, \\ \Delta N_0 &= N_0 \text{ (MMQ)} - N_0 \text{ (CCT)}.\end{aligned}$$

Convém lembrar que os cálculos conduzidos nos itens 2.5 e 2.6 acontecem após o ajustamento por mínimos quadrados, que procura, para cada transformação, minimizar as discrepâncias entre coordenadas de imagem e coordenadas de projeção. Já o cálculo realizado no item 2.4 utiliza diretamente as informações contidas na CCT. Não obstante, espera-se que os resultados obtidos para ΔE_0 e ΔN_0 sejam totalmente compatíveis com o cálculo da exatidão geodésica.

3. Resultados

As tabelas apresentadas a seguir mostram as coordenadas de imagem e de projeção dos pontos de controle, bem como os quatro conjuntos principais de resultados.

COORDENADAS DE IMAGEM E DE PROJEÇÃO DOS PONTOS DE CONTROLE

PCs	LINHA	COLUNA	E-UTM (m)	N-UTM (m)
1	384,50	859,00	553.563,00	7.680.839,00
2	1.268,50	1.381,00	564.968,00	7.652.219,00
3	1.737,50	1.798,25	575.148,00	7.636.435,00
4	1.809,50	2.655,25	600.233,00	7.630.332,00
5	2.162,00	987,50	549.224,00	7.627.537,00
6	3.040,50	623,00	534.422,00	7.603.175,00
7	1.469,50	1.072,00	554.904,00	7.647.796,00
8	1.392,50	1.317,75	562.494,00	7.648.807,00
9	2.178,75	1.748,00	571.672,00	7.623.552,00
10	1.313,25	1.868,00	579.224,00	7.648.671,00

11	635,50	2.695,50	606.746,00	7.664.951,00
12	885,50	3.319,25	624.115,00	7.654.742,00
13	1.108,25	2.846,25	609.104,00	7.650.294,00
14	2.363,50	1.172,00	553.801,00	7.620.708,00
15	2.694,25	1.991,00	576.515,00	7.607.138,00
16	1.502,00	441,00	536.037,00	7.649.633,00
17	2.335,50	628,75	537.788,00	7.624.035,00
18	825,00	366,50	536.907,00	7.670.017,00
19	848,00	492,00	540.563,00	7.668.780,00
20	1.205,75	314,75	533.700,00	7.658.981,00
21	2.982,25	436,75	529.180,00	7.605.776,00
22	196,75	522,00	544.443,00	7.687.871,00
23	342,75	2.444,75	600.685,00	7.674.819,00
24	728,75	1.786,75	579.464,00	7.666.377,00
25	959,50	2.053,00	586.280,00	7.658.302,00
26	230,75	1.353,75	568.906,00	7.683.128,00
27	149,25	1.681,00	578.928,00	7.684.058,00
28	1.995,00	2.709,75	601.013,00	7.624.581,00

DISCREPÂNCIAS ENTRE AS COORDENADAS DE PROJEÇÃO RETIRADAS DAS
CARTAS TOPOGRÁFICAS E AS CALCULADAS COM BASE NOS PARÂMETROS
FORNECIDOS PELA CCT

E – E' (m)	N – N' (m)	E – E' (m)	N – N' (m)
-625,477	1.089,147	-651,495	1.060,549
-738,795	1.087,315	-722,318	1.023,173
-672,962	1.078,785	-662,699	1.104,428
-654,953	1.089,120	-702,830	1.037,069
-698,749	1.056,817	-649,912	1.059,214
-753,902	1.014,513	-740,660	1.061,501
-711,100	1.062,484	-648,265	1.065,560
-711,463	1.035,876	-663,582	1.113,698
-680,592	1.086,173	-670,301	1.083,911

-630,758	1.100,931	-607,363	1.101,927
-647,570	1.129,286	-608,713	1.017,988
-714,090	1.059,051	-664,866	1.063,445
-691,876	1.044,149	-653,559	1.074,270
-706,563	1.079,263	-712,826	1.020,979

AValiação DA EXatidão GEODÉSICA

EXatidão GEODÉSICA (ERRO GLOBAL)
ERRO-E-UTM = -679,62m
ERRO-N-UTM = 1.068,28m

TRANSFORMação AFIM-ORTOGONAL – ERRO INTERNO

ERRO INTERNO (m)	ESC-LINHA (%)	ESC-COLUNA (%)
32,832	0,116	0,014

TRANSFORMação AFIM-ORTOGONAL – ERRO DE POSICIONAMENTO

INFORMação	α (grau)	E_0 (m)	N_0 (m)
MMQ	8,7697	574.375,20	7.640.712,97
CCT	8,7390	575.068,00	7.639.647,00
MMQ – CCT	0,0307	-692,80	1.065,97

TRANSFORMação DE SIMILARIDADE – ERRO INTERNO

ERRO INTERNO (m)	ESCALA (%)
37,453	0,067

TRANSFORMAÇÃO DE SIMILARIDADE – ERRO DE POSICIONAMENTO

INFORMAÇÃO	α (grau)	E_0 (m)	N_0 (m)
MMQ	8,7695	574.380,19	7.640.716,30
CCT	8,7390	575.068,00	7.639.647,00
MMQ – CCT	0,0305	-687,81	1.069,30

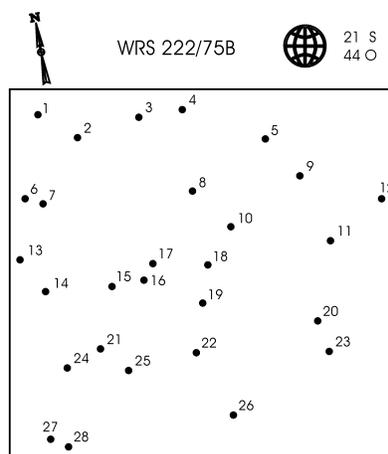
TRANSFORMAÇÃO ORTOGONAL – ERRO INTERNO

ERRO INTERNO (m)
44,389

TRANSFORMAÇÃO ORTOGONAL – ERRO DE POSICIONAMENTO

INFORMAÇÃO	α (grau)	E_0 (m)	N_0 (m)
MMQ	8,7695	574.384,78	7.640.711,21
CCT	8,7390	575.068,00	7.639.647,00
MMQ – CCT	0,0305	-683,22	1.064,21

A figura apresentada a seguir mostra a boa distribuição dos pontos de controle sobre a área de estudo, cena WRS 222/75B, quadrante B.



4. Conclusão

Os resultados de 37m e 44m obtidos para erro interno, respectivamente, através das transformações de similaridade e ortogonal mostram que a geometria interna da imagem TM-LANDSAT utilizada é compatível com a planimetria de cartas topográficas em escalas iguais ou menores que 1:100.000. É importante observar que o uso da transformação afim-ortogonal conduziu a um valor menor de erro interno (33m) porque a presença de um quinto parâmetro modela determinados efeitos que introduzem pequenas distorções geométricas. A constatação importante decorrente dos resultados mostrados nas tabelas é que o erro interno não ultrapassa 1,5 pixel e que as variações de escala restringem-se a valores perfeitamente toleráveis.

Os resultados mostram também que a discrepância entre o ângulo de orientação obtido no ajustamento e o fornecido pela CCT não introduz erro superior a 1 pixel para uma extensão de 50km (equivalente à metade do quadrante TM-LANDSAT). Observa-se ainda que o erro de posicionamento, representado pelas discrepâncias ΔE_0 e ΔN_0 , praticamente não se altera em função da transformação geométrica utilizada, atingindo cerca de -700m na direção leste-oeste (UTM) e 1.000m na direção norte-sul (UTM). Isto indica que a utilização dos dados da CCT para produzir uma base planimétrica requer, no mínimo, a introdução de um ponto de controle bem definido para a eliminação dessas translações. Os valores obtidos para erro de posicionamento correspondem, no sistema de coordenadas de imagem, a cerca de 950m na direção do traço da órbita e 800m ao longo das varreduras.

Como era esperado num produto de boa geometria interna, os valores de erro de posicionamento são totalmente compatíveis com a exatidão geodésica calculada e com as discrepâncias entre as coordenadas de projeção retiradas das cartas topográficas e aquelas calculadas com base nos parâmetros fornecidos pela CCT.

5. Referências bibliográficas

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

D'Alge, J. C. L.; Machado e Silva, A. J. F. "Estudo comparativo entre a projeção UTM e a projeção SOM". Simpósio Latino-Americano de Sensoriamento Remoto, Gramado. Anais, p.72. INPE-8112-PRE/112.

Friedmann, D. E. "Two dimensional resampling of line scan imagery by one-dimensional processing". *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 47(10):1459-1467, 1981.

Kratky, V. "Cartographic accuracy of ERTS". *Photogrammetric Engineering*, 40(2):203-212, 1974.

Machado e Silva, A. J. F. "Estudo da qualidade geométrica das imagens MSS-LANDSAT". São José dos Campos, INPE, 1983.

Machado e Silva, A. J. F.; d'Alge, J. C. L. "Avaliação da qualidade geométrica das imagens TM-LANDSAT". Simpósio Latino-Americano de Sensoriamento Remoto, Gramado. Anais, p.73. INPE-8113-PRE/113.

Serra, P. R. M. "Geração de imagens TM-LANDSAT em fitas compatíveis com computador geometricamente corrigidas". XIII Congresso Brasileiro de Cartografia, Brasília, 1987.

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.