

**ESTUDO COMPARATIVO DE MÉTODOS POLINOMIAIS
DE RETIFICAÇÃO DE IMAGENS, ATRAVÉS DE
PONTOS E FEIÇÕES DE CONTROLE**

Hideo Araki
João Bosco Lugnani

Universidade Federal do Paraná - UFPR
Departamento de Geociências
Caixa Postal 19011
81504 - Curitiba, Pr

Paulo Cesar Rêgo Bezerra

Instituto de Pesquisas Espaciais - INPE
Departamento de Desenvolvimento de Sistemas e Instrumentação
Caixa Postal 01
12630 - Cachoeira Paulista, SP

RESUMO

As imagens TM-LANDSAT com correção geométrica de sistema ("bulk") produzidas pelo INPE mostram uma qualidade geométrica interna de aproximadamente 1,5 pixel, mas uma exatidão geodésica de apenas cerca de 50 pixels. Isto significa que ao menos o erro (sistemático) de posicionamento destas imagens deve ser reduzido a níveis apropriados, se se pretende utilizá-las para gerar produtos cartográficos. Isto normalmente é realizado através de pontos de controle obtidos de cartas topográficas de grande escala. O presente trabalho apresenta os resultados de testes comparativos entre dois diferentes métodos polinomiais de retificação de imagens, o primeiro usando pontos, e o segundo feições lineares retas como controle.

ABSTRACT

System corrected (bulk) TM-LANDSAT images produced by INPE show an internal geometric quality of about 1.5 pixel but a geodetic accuracy of only around 50 pixels. This means that at least the positioning (systematic) error of these images must be reduced to appropriate levels, if they are to be used to generate cartographic products. This is normally done through control points obtained from large scale topographic maps. The present work reports the results of comparative tests between two different image rectification polynomial methods, the first using points and the second straight linear features as control.

1. INTRODUÇÃO

O método de correção geométrica de imagens TM-LANDSAT empregado pelo INPE se baseia no chamado modelo fotogramétrico, que é constituído por modelos do corpo terrestre, do sensor TM e de órbita e atitude do satélite LANDSAT; os parâmetros de tais modelos são conhecidos a priori, estimados em calibrações anteriores ao lançamento ou estimados em voo e transmitidos por telemetria.

A acurácia da correção geométrica é afetada pela acurácia com que são conhecidos os parâmetros necessários à modelagem matemática do processo de imageamento; em geral, os

parâmetros estimados em voo e transmitidos junto com os dados de imagem, como é o caso dos valores de atitude e dos valores preditos de efemérides, não são conhecidos com suficiente acurácia.

D'ALGE (1987) avaliou a qualidade geométrica de uma imagem digital TM adquirida pelo LANDSAT 5, obtendo estimativa de erro interno (devido a componentes aleatórias) de aproximadamente 1,5 pixel, de erro de posicionamento (devido a componentes sistemáticas) e de exatidão geodésica (adição de componentes aleatórias e sistemáticas) de cerca de 50 pixels.

A retificação das imagens visa reduzir estes erros, e fundamenta-se na utilização de informação adicional, externa ao sistema de imageamento. Essencialmente, existem dois modos de retificação.

O primeiro visa modelar as circunstâncias reais que produzem tais erros. Uma vez refinados os valores dos parâmetros correspondentes, pode-se gerar a imagem retificada através da mesma modelagem usada no caso das correções geométricas de sistema (BEZERRA & D'ALGE, 1988).

O segundo modo visa modelar o efeito, sem que seja necessário conhecer as fontes e os tipos de erro, através do estabelecimento de uma relação matemática entre a posição do controle na imagem e as correspondentes coordenadas de terreno.

Nos dois modos, as coordenadas do controle são normalmente retiradas de cartas topográficas de grande escala.

Este trabalho relata um estudo comparativo acerca da utilização de pontos e feições lineares como controle na retificação de uma imagem digital TM-LANDSAT com nível 2 de correção geométrica, através da modelagem polinomial de efeito.

2. METODOLOGIA

Como pontos individuais de controle podem ser utilizados cruzamentos de estradas, cabeceiras de aeroportos e outros, desde que bem identificados nas imagens e nas cartas topográficas. A relação entre as coordenadas de imagem (x,y) e as coordenadas de projeção (X,Y) é estabelecida através de uma transformação T:

$$\begin{aligned} X &= T_1(x,y) \\ Y &= T_2(x,y) \end{aligned} \quad (1)$$

Já o termo feição se refere a qualquer objeto ou parte deste que possa ser representado por um único segmento de curva, tal como a linha central de uma rua, um trilho de estrada de ferro, uma aresta de um edifício, etc. Em regiões desenvolvidas, as obras construídas pelo homem fornecem um grande número de feições.

Segundo a metodologia desenvolvida por LUGNANI (1980) e MASRY (1981), uma feição de controle é obtida pela digitalização de um número discreto de pontos que a compõem, sendo adaptada a este conjunto discreto uma função que o represente de forma contínua.

No caso de feição reta de controle, a digitalização de dois pontos é suficiente para defini-la. As feições retas, como trechos de estradas de rodagem, são identificadas nas imagens de satélite com maior facilidade do que os cruzamentos de estradas.

Ao utilizar-se feições como controle, não há necessidade de se estabelecer a correspondência um a um entre pontos na imagem e na carta base. Para um ponto da feição (x,y) medido na imagem, obtêm-se suas coordenadas transformadas (X,Y) através das expressões (1).

A feição reta de controle é descrita através de equação paramétrica da reta:

$$\begin{aligned} X &= X_1 + t (X_2 - X_1) \\ Y &= Y_1 + t (Y_2 - Y_1) \end{aligned} \quad (2)$$

onde:

(X₁,Y₁) e (X₂,Y₂) são as coordenadas dos pontos digitalizados e que definem a feição de controle;
(t) é o parâmetro da reta;
(X,Y) são as coordenadas de um ponto genérico sobre a feição de controle.

Um ponto qualquer observado na imagem, após sua transformação, satisfaz a igualdade:

$$\begin{aligned} T_1(x,y) &= X_1 + t (X_2 - X_1) \\ T_2(x,y) &= Y_1 + t (Y_2 - Y_1) \end{aligned} \quad (3)$$

A solução das expressões (3) pelo método dos mínimos quadrados possibilita a determinação dos valores dos parâmetros da transformação T e do parâmetro t de cada reta.

3. TESTES E RESULTADOS

A posição de cada elemento de imagem (pixel) da cena TM digital com correção geométrica de sistema se relaciona linearmente com as coordenadas numa dada projeção cartográfica de um ponto da superfície terrestre. Esta relação linear é definida por uma transformação isogonal, que consiste de uma rotação, duas translações e um fator de escala. Utilizando-se os parâmetros de navegação (I₀, J₀, X₀, Y₀, ALFA e DP) fornecidos na fita compatível com o computador (CCT), obtêm-se para cada pixel (I,J) as suas coordenadas de projeção (X,Y):

$$\begin{aligned} X &= \cos(\text{ALFA}) (J - J_0) \text{ DP} + \\ &\quad \sin(\text{ALFA}) (I - I_0) \text{ DP} + X_0 \\ Y &= -\sin(\text{ALFA}) (J - J_0) \text{ DP} + \\ &\quad \cos(\text{ALFA}) (I - I_0) \text{ DP} + Y_0 \end{aligned} \quad (4)$$

onde:

(I₀,J₀) são as coordenadas de imagem do pixel central da cena;
(X₀,Y₀) são as coordenadas de projeção do ponto central da cena;
(ALFA) é o ângulo de orientação entre o sistema de coordenadas de imagem (I,J) e o sistema de coordenadas de projeção (X,Y);
(DP) é o tamanho do pixel no terreno (30m).

A imagem selecionada foi o quadrante B do ponto WRS 75 da órbita 17662 (base 222) do LANDSAT 5, e utilizou-se como área teste aquela correspondente a uma carta 1:100.000. As coordenadas de imagem (I,J) foram lidas com o auxílio de um visualizador Comtal, e transformadas em coordenadas UTM (E',N') através dos parâmetros de navegação.

TABELA 1

DIFERENÇA ENTRE AS COORDENADAS (E',N') E (E,N) DOS PONTOS DE CONTROLE

Ptos de Controle	Diferenças	
	E(m)	N(m)
11	-382	1513
12	-434	1499
13	-405	1536
14	-443	1495
15	-402	1510
16	-381	1488
17	-421	1499
18	-418	1523
19	-469	1489
20	-450	1515
21	-482	1509
31	-431	1507
32	-413	1534
33	-470	1526
34	-462	1549
35	-283	1677
36	-420	1575
37	-412	1556
38	-459	1502
39	-423	1519
40	-463	1517
41	-543	1438
42	-456	1530
43	-448	1521
44	-425	1499
45	-423	1558
46	-464	1474

As coordenadas UTM (E,N) dos pontos (definidos por cruzamentos de estradas) e das feições (trechos retos de estradas) de controle foram obtidas através de uma mesa digital plotadora DZI, utilizando-se as seguintes cartas topográficas do IGG-SP na escala 1:50.000:

- SF-22-J-II-1 - Araçatuba,
- SF-22-J-II-2 - Buritama,
- SF-22-J-II-3 - Birigui,
- SF-22-J-II-4 - Penápolis.

Foram utilizados 27 pontos de controle, para comparar coordenadas navegadas (E',N') com coordenadas (E,N), obtendo-se as diferenças apresentadas na Tabela 1.

O conjunto de pontos de controle foi dividido em dois subconjuntos distintos. O primeiro, contendo 15 pontos de controle, utilizado na determinação dos parâmetros das transformações T (expressões 1); e o segundo, contendo 10 pontos, utilizado para verificar a qualidade das transformações. Dois dos pontos

de controle (números 35 e 41) não foram incluídos em nenhum dos dois conjuntos, por apresentarem diferenças claramente dissonantes da tendência geral.

Através dos 10 pontos de verificação, calculou-se a exatidão geodésica da imagem, a partir do erro médio quadrático (EMQ) em E e N dos valores correspondentes da Tabela 1, resultando os valores mostrados na Tabela 2.

TABELA 2

EXATIDÃO GEODÉSICA

EMQ E(m)	433,68
EMQ N(m)	1520,90
Exatidão Geodésica(m)	1581,53

Foram selecionadas 15 feições de controle para determinar os parâmetros das transformações T (expressões 3). Segundo VIADANA (1989), o uso de feições na verificação da qualidade conduz a uma superestimação dos erros; por esta razão, optou-se neste estudo por estimar o erro de uma imagem retificada através de feições com o mesmo conjunto de 10 pontos de verificação mencionando anteriormente.

As Figuras 1 e 2 apresentam as distribuições dos conjuntos de pontos e feições de controle utilizados na determinação das respectivas transformações T, dentro da área teste.

FIGURA 1

DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS DE CONTROLE

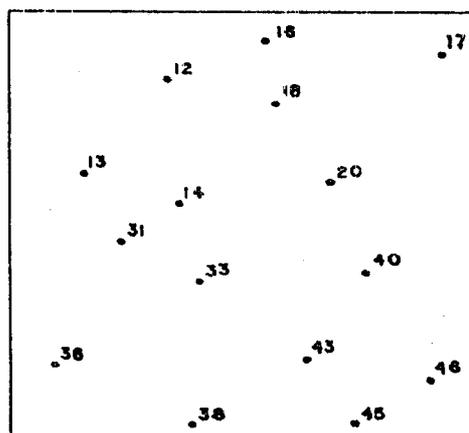
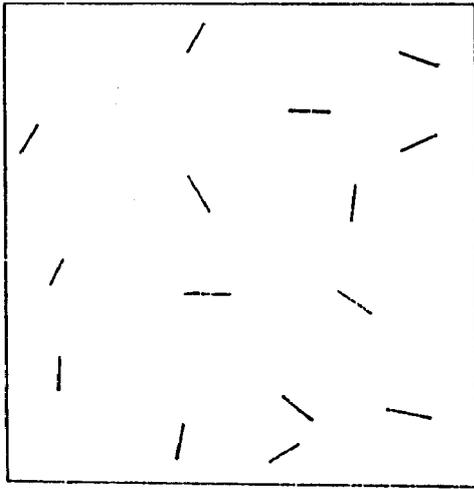
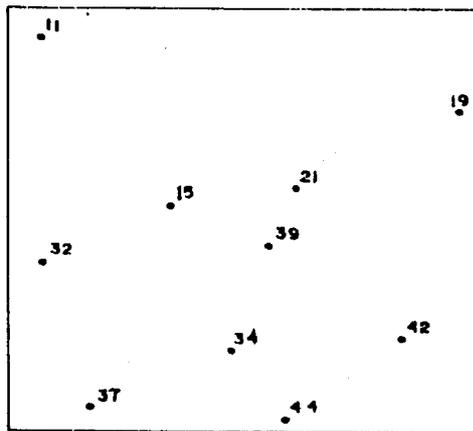


FIGURA 2
DISTRIBUIÇÃO DAS FEIÇÕES
DE CONTROLE



A distribuição dos pontos de verificação na área teste é mostrada na Figura 3.

FIGURA 3
DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS
DE VERIFICAÇÃO



Deve-se ressaltar que a utilização dos mesmos pontos de verificação, tanto para as transformações adaptadas ao uso de pontos como para aquelas adaptadas ao uso das feições como controle, torna mais consistente a comparação dos resultados.

Para esta investigação foram selecionadas as seguintes transformações T, de forma a 230

modelar as distorções presentes na imagem com correção geométrica de sistema:

a) Polinômio de primeiro grau completo (PIG) ou transformação afim (TA):

$$\begin{aligned} E &= a_1 + a_2 E' + a_3 N' \\ N &= b_1 + b_2 E' + b_3 N' \end{aligned} \quad (5)$$

Os parâmetros da transformação afim podem ser associados a uma rotação (alfa), a um fator de não ortogonalidade (e), dois fatores de escala (E_x, E_y) e dois fatores de translação (X_0, Y_0):

$$\begin{aligned} E &= X_0 + E_x \cos(\text{alfa}) E' \\ &\quad + E_y \sin(\text{alfa}+e) N' \\ N &= Y_0 - E_x \sin(\text{alfa}) E' \\ &\quad + E_y \cos(\text{alfa}+e) N' \end{aligned} \quad (6)$$

a1) Nas expressões (6) fazendo-se $e=0$, resulta a transformação afim particular (AP), que mantém a ortogonalidade entre os eixos.

a2) A transformação isogonal (TI) resulta da expressão (6), fazendo-se $e=0$, e $E_x=E_y$.

a3) A transformação de corpo rígido (CR) pode ser obtida da transformação isogonal, tornando a escala igual à unidade.

b) Transformação bilinear (BL), que corresponde ao polinômio de primeiro grau completo, acrescido de um termo $E'N'$:

$$\begin{aligned} E &= a_1 + a_2 E' + a_3 N' + a_4 E'N' \\ N &= b_1 + b_2 E' + b_3 N' + b_4 E'N' \end{aligned} \quad (7)$$

c) Polinômio de segundo grau completo (P2G);

$$\begin{aligned} E &= a_1 + a_2 E' + a_3 N' + a_4 E'^2 N' \\ &\quad + a_5 E' N'^2 + a_6 E' N' \cdot 2 \\ N &= b_1 + b_2 E' + b_3 N' + b_4 E'^2 N' \\ &\quad + b_5 E' N'^2 + b_6 E' N' \cdot 2 \end{aligned} \quad (8)$$

Na utilização de 15 pontos e feições de controle resulta a seguinte relação entre o número de parâmetros (NP) e de graus de liberdade (GL):

TABELA 3
NÚMERO DE PARÂMETROS E GRAUS
DE LIBERDADE PARA 15 PONTOS
E FEIÇÕES

Transf.	Pontos		Feições	
	NP	GL	NP	GL
CR	3	27	18	12
TI	4	26	19	11
AP	5	25	20	10
TA	6	24	21	9
PIG	6	24	21	9
BL	8	22	23	7
P2G	12	18	27	3

Para o ajustamento, tem-se como observações as coordenadas de imagem e as coordenadas de projeção, resultando das expressões (1) e (3) o modelo combinado sujeito à iterações.

Os parâmetros das transformações obtidos através do ajustamento, são apresentados na Tabela 4.

TABELA 4
PARÂMETROS RESULTANTES
DO AJUSTAMENTO

Parâm.	Controle Utilizado		
	Pontos	Feições	
CR	X ₀	-435,373	-435,964
	Y ₀	1515,846	1506,800
	alfa	-0,0014	0,0010
TI	X ₀	-434,593	-438,843
	Y ₀	1516,415	1508,351
	E	0,999	1,000
AP	alfa	0,0014	0,0008
	X ₀	-434,687	-438,843
	Y ₀	1516,453	1513,068
	E _x	1,000	0,999
	E _y	0,999	1,000
TA	alfa	0,0014	0,0012
	X ₀	-434,685	-443,721
	Y ₀	1516,456	1513,068
	E _x	1,000	0,999
	E _y	0,999	1,000
PIG	alfa	0,0015	0,0008
	e	-0,0001	0,0006
	a ₁	-435,424	-443,720
	b ₁	1517,546	1513,068
	a ₂	1,000	0,999
	b ₂	-0,001	0,000
	a ₃	0,001	0,001
BL	b ₃	0,999	1,000
	a ₁	-435,413	-442,879
	b ₁	1517,717	1511,321
	a ₂	1,000	0,999
	b ₂	-0,001	0,000
	a ₃	0,001	0,000
	b ₃	0,999	0,999
P2G	a ₄	0,000	0,000
	b ₄	0,000	0,000
	a ₁	-456,140	-430,390
	b ₁	1516,997	1519,272
	a ₂	0,999	1,000
	b ₂	-0,001	0,002
	a ₃	0,001	0,000
	b ₃	0,999	0,999
	a ₄	0,000	0,000
	b ₄	0,000	0,000
	a ₅	0,000	0,000
b ₅	0,000	0,000	
a ₆	0,000	0,000	
b ₆	0,000	0,000	

Tais parâmetros foram aplicados às coordenadas navegadas dos pontos de verificação, sendo as coordenadas daí resultantes comparadas às respectivas coordenadas UTM. Os valores de EMQ apresentados na Tabela 5 resultaram da aplicação das transformações T adaptadas à utilização de

pontos como controle; e os valores da Tabela 6 provêm da utilização de feições como controle.

TABELA 5

EMQ DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO

Transf.	E(m)	N(m)	EN(m)
CR	31,12	20,44	37,23
TI	25,26	17,60	30,78
AP	25,90	17,53	31,27
TA	25,89	17,52	31,26
PIG	26,76	14,61	30,49
BL	26,92	15,06	30,85
P2G	23,64	14,69	27,83

TABELA 6

EMQ DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO

Transf.	E(m)	N(m)	EN(m)
CR	31,19	24,27	39,52
TI	27,55	21,31	34,83
AP	21,56	21,02	30,18
TA	22,05	21,38	30,71
PIG	22,68	19,44	29,87
BL	26,42	21,31	33,94
P2G	67,26	70,19	97,22

Na análise das Tabelas 2 e 4 verifica-se que os fatores de translação se aproximam dos valores de EMQ nas direções E e N. Esta comparação é mais favorável para a utilização de pontos como controle, e parece indicar a existência de um grau de liberdade, segundo a direção da reta, quando se faz o relacionamento do ponto da imagem com a feição reta de controle.

Os demais parâmetros constantes da Tabela 4 modelam os outros erros presentes na imagem com correção geométrica de sistema. Os resultados apresentados na Tabela 5 mostram que o polinômio de segundo grau é o modelo mais adequado quando da utilização de pontos como controle, apresentando, em relação às demais transformações, uma pequena redução no EMQ do conjunto formado pelos pontos de verificação.

As Tabelas 5 e 6 mostram que no caso de transformações lineares, a utilização de pontos ou de feições como controle não produz diferença significativa no valor de EMQ.

A utilização de feições não foi satisfatória para o polinômio de segundo grau, ocorrendo um possível efeito relacionado ao pequeno número de graus de liberdade em relação ao número de parâmetros envolvidos na transformação (ver Tabela 3).

Deve-se observar que, uma vez determinados os erros de posicionamento, de escala e de rotação através da transformação isogonal (TI), pode-se corrigir os parâmetros de navegação fornecidos na CCT, sem que seja necessário alterar (reamostrar) os dados de imagem.

Já a utilização de transformações mais complexas (AP, TA, P1G, BL ou P2G) implica necessariamente na realização de reamostragem para que se obtenha a imagem retificada, devendo-se calcular concomitantemente nova função de navegação (expressão 4).

4. CONCLUSÕES

A utilização de feições como controle permite melhor aproveitamento das informações disponíveis na imagem, apresentando como vantagens a fácil identificação e a não obrigatoriedade de se estabelecer a correspondência um a um entre pontos medidos na imagem e nas cartas base. As feições retas constituem um caso particular dentre todos os possíveis tipos de feição, apresentando a vantagem de resultarem em um modelo de ajustamento bastante mais simples que os correspondentes às feições curvas.

Pode-se citar como desvantagem na sua utilização, o fato de serem as feições afetadas pela sua distribuição geométrica relativa, fazendo com que seja necessário dispor de feições ortogonais entre si para eliminar efeitos espúrios de translação, como os presentes na Tabela 4; entre as dificuldades alinham-se ainda o pequeno número de graus de liberdade, quando em comparação com a utilização de igual número de pontos de controle, e a necessidade de dispor de pontos para verificar a qualidade das transformações estimadas.

Os resultados mostram que, observadas as ressalvas anteriores, as feições podem ser usadas para suplementar ou mesmo substituir os pontos de controle na retificação de imagens digitais TM-LANDSAT com correção geométrica de sistema, através da modelagem de efeito. Outra possível utilização de feições está relacionada ao seu emprego na modelagem de causa, adaptando-as aos modelos de refinamento de órbita e atitude do satélite.

Estão sendo realizados outros testes comparativos acerca da utilização de pontos e de feições retas como controle na retificação de imagens TM-LANDSAT, no âmbito da dissertação de mestrado de um dos autores deste trabalho.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BEZERRA, P.C.R. & D'ALGE, J.C.L., Retificação de Imagens TM-LANDSAT Através do Refinamento de Elementos Orbitais. In: Anais do 5º Encontro Nacional dos Engenheiros Cartógrafos, Presidente Prudente, Julho de 1988.

D'ALGE, J.C.L. Qualidade geométrica de imagens TM do LANDSAT-5. In: Anais do XIII Congresso Brasileiro de Cartografia, Brasília, Julho de 1988.

LUGNANI, J.B. Using Digital Entities as Control. PHD Thesis, Department of Surveying Engineering, UNB, 1980.

MASRY, L.E., Digital Mapping Using Entities: a New Concept. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 48 (11):1561-1599, 1981.

VIADANA, M.I.C.F. Modelos Matemáticos para Refinamento de Imagens de Satélite TM Utilizando Feições Retas como Controle. Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1989.