

# **AVALIAÇÃO DA DETERMINAÇÃO DE COORDENADAS TRIDIMENSIONAIS EXTRAÍDAS DE UM PAR ESTEREOSCÓPICO “EROS A”, UTILIZANDO-SE DA “DIRECT LINEAR TRANSFORMATION” (DLT)**

**Juilson José Jubanski <sup>1</sup>**  
**Edson A. Mitishita <sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Universidade Federal do Paraná – UFPR – Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas (Mestrado) – [juilson@ufpr.br](mailto:juilson@ufpr.br)

<sup>2</sup> Universidade Federal do Paraná – UFPR – Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas (Professor Orientador) – [mitishita@ufpr.br](mailto:mitishita@ufpr.br)

## **RESUMO**

O satélite EROS A gera imagens pancromáticas com resolução espacial no terreno de 1,8m. Este sensor tem a capacidade de gerar pares estereoscópicos na própria órbita. O presente trabalho consiste na avaliação da exatidão da determinação de coordenadas tridimensionais de pontos observados num par estereoscópico de imagens EROS da região de Florianópolis/SC. Empregou-se o procedimento de interseção fotogramétrica com a utilização do modelo matemático DLT “Direct Linear Transformation”. Os pontos de apoio, necessários a orientação das imagens foram determinados por um procedimento de aerotriangulação por ajustamento simultâneo de fotos (Bundle Block). Um conjunto de pontos de verificação foi empregado para a determinação da exatidão da metodologia proposta. As coordenadas geodésicas destes pontos foram determinadas por aerotriangulação e com a metodologia proposta. Estes pontos são detalhes naturais perfeitamente identificáveis nas imagens e nas aerofotos. A metodologia proposta utiliza um ajustamento MMQ, onde os parâmetros da transformação DLT e as coordenadas dos pontos observados são determinados simultaneamente num único ajustamento. O procedimento pode ser comparado como sendo uma orientação exterior de um modelo fotogramétrico. Nos pontos de apoio são aplicados injunções de posição, e os pontos fotogramétricos têm suas coordenadas geodésicas determinadas por interseção de retas no espaço. Os resultados obtidos são animadores e mostram precisões planimétricas e altimétricas dentro de 2 pixels.

**Palavras-Chave:** DLT, Imagens EROS A, Determinação de Coordenadas.

## **EVALUATION OF THE DETERMINATION OF THREE-DIMENSIONAL COORDINATES EXTRACTED FROM A STEREO PAIR “EROS A”, THROUGH THE LINEAR DIRECT TRANSFORMATION (DLT)**

### **ABSTRACT**

*The EROS A satellite generates panchromatic images with a ground sampling distance of 1,8m. This sensor has the capability of generate at same orbit. This paper consists on the evaluation of the determination of three-dimensional coordinates of photo-identifiable points, from a stereoscopic pair of EROS images of the Florianopolis/SC region. In this paper used the photogrammetric intersection method, using as mathematical model the “Direct Linear Transformation” (DLT). The control points have been determined through a bundle block adjustment. A set of verification point were used to determinate the proposed method’s accuracy. With these determined coordinates, two known DLT models had been used on the pair of EROS images. The geodetic coordinates were determinate through aerial triangulation and the proposed method. These points are identifiable natural details in the image and in the photos. The method uses a least squares adjustment, where the DLT parameters and the point’s coordinates are simultaneously determined. The procedure can be compared with an absolute orientation of a stereo model. At the ground control points are applied positional constraints, and the other points are determined through spatial straight-line intersection. The obtained results are good, and they show planimetric and altimetric precisions inside 2 pixels.*

**Keywords:** DLT, EROS A Imagery, Coordinates Determination.

## 1 - INTRODUÇÃO

O satélite EROS A, lançado pela ImageSat em dezembro de 2000, pode ser considerado como sendo um satélite leve e que possui um único sistema eletro-óptico usado como sensor, o qual permite a obtenção de imagens pancromáticas de alta-resolução. O satélite está numa órbita quase-polar síncrona com o sol, numa altitude de 480km, orbitando cerca de 15 vezes ao dia o planeta. No seu modo padrão de operação, o sensor gera imagens com 13,5km de comprimento (num total de 7490 pixels), com uma resolução espacial no terreno de aproximadamente 1,8m. Utilizando-se de pontos de controle as imagens EROS A podem ser corrigidas, e a exatidão obtida é função do número de pontos de controle utilizados. Teoricamente, com o uso de 11 pontos, pode ser alcançada a precisão de 5m para a extração de dados tridimensionais – ImageSat (2004).

Na atualidade, discute-se o uso de polinômios racionais como modelo matemático para a determinação de coordenadas a partir de pares estereoscópicos gerados com sensores de alta resolução, como Ikonos, QuickBird e EROS. Uma alternativa é a DLT – *Direct Linear Transformation* a qual, na verdade, é uma forma simplificada da equação de colinearidade - SARAIVA (2003). Neste trabalho empregou a transformação DLT e uma variação desta, com a adição de um parâmetro para realização da orientação exterior das imagens.

Na realização da orientação exterior com o uso dos modelos DLT acima mencionados, utilizou-se de um procedimento matemático de solução simultânea, onde parâmetros da transformação DLT e as coordenadas tridimensionais de pontos são determinados num único ajustamento MMQ. Detalhes identificáveis nas imagens foram empregados como pontos de apoio e pontos de verificação. As coordenadas geodésicas destes pontos foram determinadas por um procedimento de aerotriangulação por ajustamento simultâneo de aerofotos (Bundle Block). A comparação realizada entre as coordenadas geodésicas de pontos determinados com a metodologia proposta, e as coordenadas obtidas por aerotriangulação, permitiu determinar a exatidão da metodologia proposta. Admitiu-se que as coordenadas geodésicas obtidas por aerotriangulação são corretas e isentas de erros. As exatidões obtidas encontram-se dentro da resolução espacial de 2 pixels.

## 3 – MATERIAIS E MÉTODOS

### 3.1 – MATERIAIS UTILIZADOS

As imagens EROS que formam um par estereoscópico, empregadas nesta pesquisa recobrem a região do estreito de Florianópolis SC.

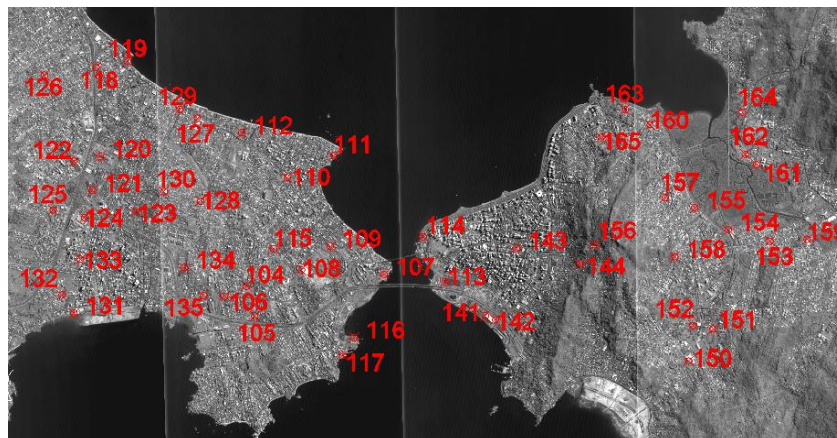


Figura 01 – Visão Geral da Área e Pontos de apoio e verificação

As coordenadas geodésicas dos pontos de apoio e verificação foram determinadas a partir de um recobrimento aerofotogramétrico, realizado com uma câmara Wild RC-5, de distância focal nominal 153.00 mm e na escala aproximada de 1:16.000. O recobrimento aéreo foi realizado pela Empresa Aeroconsult Aerolevantamentos e Consultoria LTDA, e gentilmente cedido para a realização desta pesquisa. Os detalhes naturais e artificiais foram identificados nas imagens aéreas e orbitais, conforme apresentado nas figuras 01 e 03. O bloco de aerofotos, composto de dez modelos fotogramétricos foram lidos no sistema fotogramétrico ZEISS PLANICOMP C-100 do Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da UFPR. Uma aerotriangulação por ajustamento simultâneo de aerofotos foi realizada para a determinação da coordenadas geodésicas dos pontos escolhidos nas imagens orbitais e aéreas. Um

conjunto de pontos fotogramétricos artificiais, marcados nos diapositivos (PUG), foi utilizado como apoio para a realização desta aerotriangulação.

### 3.2 – MÉTODOS E RESULTADOS

Três etapas fundamentais de trabalho foram realizadas nesta pesquisa: a definição dos pontos de apoio e verificação; o cálculo das coordenadas geodésicas por aerotriangulação; e a orientação exterior das imagens EROS, em conjunto com a determinação das coordenadas espaciais de pontos com a utilização das equações DLT e ajustamento MMQ (Método dos mínimos quadrados).

#### 3.2.1 – Definição dos Pontos de Apoio e de Verificação

Detalhes identificáveis nas imagens e nas aerofotos, geralmente cantos de grandes edificações e bordas de canteiros foram tomados para serem pontos de apoio e verificação. No caso de o ponto ser adequado, foram realizados croquis de identificação na aerofoto e nas imagens, conforme é mostrado na figura 02.



Figura 02 – Marcação dos Pontos na Imagem EROS

Após a identificação do conjunto de pontos, distribuídos por toda a imagem, de acordo com a figura 01, os modelos fotogramétricos foram medidos no sistema fotogramétrico ZEISS PLANICOMP C-100 do Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da UFPR. Os pontos fotogramétricos artificiais existentes nas aerofotos também foram observados e utilizados como pontos de apoio para o processamento da aerotriangulação.

#### 3.2.2 – Determinação das Coordenadas Geodésicas dos Pontos de Apoio e Verificação

Tendo as observações fotogramétricas concluídas, foi possível realizar a aerotriangulação pelo método do ajustamento simultâneo (Bundle Block) de um bloco de quatro faixas que totalizam 14 aerofotos. Este procedimento tem por objetivo a determinação das coordenadas dos pontos de apoio e verificação a ser utilizados na orientação das imagens Eros, e na verificação de exatidões. Foram utilizados 36 pontos de apoio no ajustamento do bloco, os quais são pontos fotogramétricos artificiais, marcados nos diafilmes (PUG), onde suas coordenadas geodésicas foram determinadas por um procedimento de aerotriangulação realizada pela Empresa Aeroconsult. A aerotriangulação realizada nesta pesquisa permitiu a determinação de 52 pontos de apoio e verificação a serem utilizados. A distribuição destes pontos no bloco é apresentada na figura 03. O método de ajustamento é o paramétrico com injeções de posição, utilizando-se das equações de colinearidade como modelo matemático funcional (01), conforme apresentado em ANDRADE (2003) e LUGNANI (1987).

$$= - \frac{\begin{matrix} - & + & - & + & - \\ - & + & - & + & - \\ - & + & - & + & - \end{matrix}}{\begin{matrix} - & + & - & + & - \\ - & + & - & + & - \end{matrix}} \quad (1)$$

Onde:

(x,y) = Coordenadas do ponto no referencial fotogramétrico;

$(X, Y, Z)$  = Coordenadas do ponto no referencial geodésico local;  
 $(X_0, Y_0, Z_0)$  = Coordenadas do ponto no referencial geodésico local;  
 $m_{ij}$  = Elementos da matriz de rotação =  $\kappa \cdot \varphi \cdot \omega$

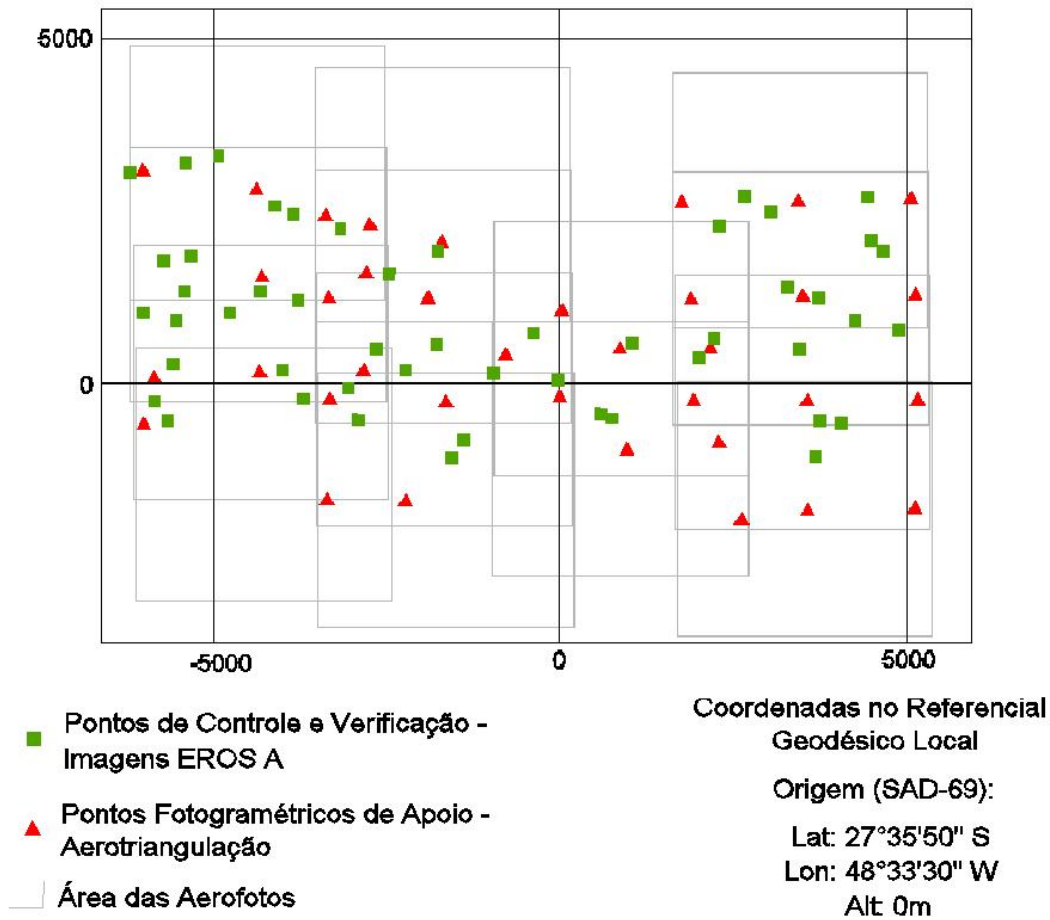


Figura 03 – Representação Esquemática da Aerotriangulação

### 3.2.3 – Orientação Exterior das Imagens com o Modelo DLT

A DLT foi introduzida por ABDEL-AZIZ (1971), com a finalidade de permitir a calibração de câmeras amadoras a partir de observações fotogramétricas realizadas em monocomparadores e a sua utilização no próprio referencial de observação. A DLT tem como base a equação de colinearidade e, portanto, os seus princípios de projeção perspectiva e colinearidade são considerados – ver SARAIVA (2003). Na verdade, tanto as equações de colinearidade quanto a DLT são casos específicos de polinômios racionais. No presente trabalho foram empregados dois modelos lineares baseados na DLT: O primeiro deduzido por ABDEL-AZIZ (1971), como visto em SARAIVA (2003) e MITISHITA (2002), e o outro, mais elaborado, foi extraído de FRASER (2001).

O modelo mais simples possui a seguinte configuração:

$$\begin{aligned}
 &= \frac{\begin{matrix} + & + & + \\ + & + & + \end{matrix}}{\begin{matrix} + & + & + \\ + & + & + \end{matrix}} \quad (2)
 \end{aligned}$$

Onde:

$(x, y)$  = Coordenadas do ponto no referencial de imagem;  
 $(X, Y, Z)$  = Coordenadas do ponto no referencial geodésico local;  
 $L_i$  = Parâmetros da DLT.

O segundo modelo DLT utilizado neste trabalho, é o modelo DLT estendido apresentado por WANG (1999), no qual aparece um parâmetro adicional de correção de imagem  $L_{12}$ :

$$= \frac{+ \quad + \quad +}{+ \quad + \quad +} +$$

$$= \frac{+ \quad + \quad +}{+ \quad + \quad +}$$
(3)

A metodologia proposta para a determinação das coordenadas geodésicas (X,Y,Z) utiliza um ajustamento MMQ, onde os parâmetros da transformação DLT e as coordenadas dos pontos observados são determinados simultaneamente num único ajustamento. O procedimento pode ser comparado como sendo uma orientação exterior de um modelo fotogramétrico. Nos pontos de apoio são aplicadas injunções de posição e nos pontos fotogramétricos são determinadas as coordenadas geodésicas por interseção de retas no espaço.

No primeiro modelo de DLT (equação 2), o número de incógnitas (i) existentes no sistema de equações será:

$$= + \cdot$$
(4)

Onde:

n = Número de pontos observados no par estereoscópico.

O número de equações (e) existentes no sistema será:

$$= \cdot + \cdot$$
(5)

Onde:

f = Número de equações de injunção.

Desta forma, seis pontos de apoio bem distribuídos no modelo estereoscópico são suficientes para a solução do sistema proposto. A forma de ajustamento empregado, neste caso é o paramétrico com injunção de posição - GEMAEL (1994). Nos pontos de apoio são aplicadas injunções de peso e nos pontos de verificação, as coordenadas tridimensionais da interseção são tratadas como incógnitas.

No modelo de DLT estendido (equação 3), a diferença está no número de incógnitas (i) existente no sistema de equações:

$$= + \cdot$$
(6)

Também existe diferença na forma de ajustamento utilizada, pois devido ao elemento de correção de imagem,  $L_{12}$ , que depende das coordenadas de imagem (x,y), surge a impossibilidade da obtenção de funções explícitas, onde as observações fotogramétricas realizadas seriam dadas em função de parâmetros. Desta forma, o procedimento de ajustamento empregado será o combinado com injunções de posição - GEMAEL (1994), o qual permite a utilização de uma função implícita que reúna parâmetros e observações.

Empregou-se o programa ENVI 4.0 para a realização das observações monoculares dos pontos de apoio e de verificação existentes no modelo estereoscópico de imagens EROS.

Nos ajustamentos adotou-se como precisão das observações realizadas o valor de 1,0 "pixel". Foram empregados 16 pontos de apoio sendo as suas coordenadas espaciais fixadas com injunções de posição absolutas. A tabela 01 mostra os valores de variância de unidade de peso a posteriori ( $\sigma$ ) obtidos nos ajustamentos realizados.

Tabela 01 – Variância da Observação de Peso unitário a Posteriori ( $\sigma$ )

Método	$\sigma$	$\sigma$
DLT simples	0.637	0.798
DLT estendido	0.581	0.762

Os resultados acima mostram que as leituras foram realizadas com uma precisão inferior a 1 pixel, pois o  $\sigma$  é inferior a 1. Isso nos prova a possibilidade de serem realizadas leituras de pontos fotoidentificáveis diretamente do referencial de imagem, com uma precisão inferior ao pixel. Isso nos dá, também, uma garantia a respeito das observações realizadas, pois se a qualidade destas estivesse ruim, todo o trabalho estaria comprometido.

Na tabela 02, são mostradas as diferenças de coordenadas espaciais, entre as calculadas com o procedimento proposto e as determinadas por aerotriangulação. São mostrados também os valores das médias e dos desvios padrões obtidos. De um conjunto de 36 pontos de verificação utilizados, 12 foram eliminados, pois apresentaram erros grosseiros de fotoidentificação. Como já foi mencionado, para fins de verificações das exatidões obtidas, considerou-se que as coordenadas obtidas na aerotriangulação sem exatas e isentas de erros.

Tabela 02 – Resultados obtidos na comparação de coordenadas (em metros)

Ponto	DLT SIMPLES				DLT ESTENDIDA			
	$\Delta X$	$\Delta Y$	$\Delta Z$	<i>RMS XYZ</i>	$\Delta X$	$\Delta Y$	$\Delta Z$	<i>RMS XYZ</i>
134	-2,960	-2,308	-0,109	3,755	-2,703	-2,098	1,941	3,934
135	-0,843	-1,007	6,056	6,197	-0,761	-1,035	5,699	5,842
122	1,159	0,985	4,829	5,063	0,988	0,884	3,537	3,777
124	0,183	-1,328	-4,423	4,622	0,531	-1,002	-0,653	1,309
121	-2,846	-0,344	0,930	3,014	-2,716	-0,186	2,345	3,593
123	-0,334	-1,517	-4,300	4,572	0,018	-1,264	-1,066	1,654
130	-2,019	-0,769	-3,518	4,128	-1,834	-0,697	-2,591	3,250
128	-3,274	-0,195	-3,460	4,767	-3,025	-0,084	-2,076	3,670
117	1,303	2,777	3,017	4,303	0,573	1,931	-5,367	5,733
105	-0,930	-0,383	-3,042	3,204	-0,948	-0,660	-4,793	4,930
106	-0,877	0,057	-1,544	1,777	-0,806	0,058	-1,454	1,663
115	-1,430	0,375	-8,406	8,535	-1,110	0,682	-5,094	5,258
108	-2,849	-1,361	-4,614	5,591	-2,561	-1,200	-2,436	3,733
107	-0,016	0,487	-1,736	1,803	0,155	0,769	0,875	1,175
113	1,270	0,525	-2,844	3,159	1,405	0,746	-0,732	1,751
111	-1,873	2,071	1,362	3,107	-2,092	1,980	-0,023	2,881
141	0,414	2,560	1,518	3,005	0,234	2,407	-0,039	2,419
143	1,271	-0,192	-0,526	1,389	1,570	0,232	3,506	3,848
144	-0,178	-1,445	-1,861	2,363	-0,093	-1,487	-2,030	2,518
151	-0,709	2,334	-0,986	2,631	-1,013	2,117	-3,384	4,118
157	-1,629	-2,280	2,192	3,558	-1,236	-1,844	6,675	7,034
154	-0,296	-2,960	-2,138	3,663	0,209	-2,402	3,663	4,385
159	-3,366	0,447	-4,864	5,932	-2,729	1,092	2,025	3,569
161	0,779	-1,295	-2,645	3,046	1,048	-1,114	-0,677	1,673
<b>Média</b>	<b>-0,835</b>	<b>-0,199</b>	<b>-1,296</b>	<b>3,883</b>	<b>-0,704</b>	<b>-0,091</b>	<b>-0,090</b>	<b>3,488</b>
<b>Desvio Padrão</b>	<b>1,514</b>	<b>1,558</b>	<b>3,334</b>	<b>1,620</b>	<b>1,427</b>	<b>1,391</b>	<b>3,258</b>	<b>1,556</b>

Verifica-se, pelos resultados apresentados na tabela 02, que a DLT estendida apresentou um melhor desempenho para a determinação das coordenadas espaciais de pontos observados no modelo estereoscópico de imagens EROS. A figura 04 mostra a distribuição espacial das discrepâncias planimétricas obtidas com a DLT estendida. Verifica-se que 100% dos pontos testados apresentaram exatidão planimétrica dentro de dois pixels (3,6 metros). As discrepâncias encontram-se bem distribuídas em torno do ponto (0;0), o que nos conclui a inexistência de erros sistemáticos na modelagem matemática realizada. A exatidão altimétrica obtida no procedimento realizado apresentou resultado quase duas vezes menor, onde 100% dos pontos encontram-se abaixo de 6,6 metros.

Os resultados nos mostram que, considerando-se a resolução espacial do "pixel" no terreno o valor de 1,8m, verifica-se que as discrepâncias planimétricas médias estão dentro deste limite da precisão. No eixo Z, as discrepâncias encontradas estão, em média, bem abaixo do limite de 5m. Desta forma, os

valores obtidos de exatidão estão abaixo dos valores apontados pela empresa ImageSat, que gera e distribui as imagens EROS.

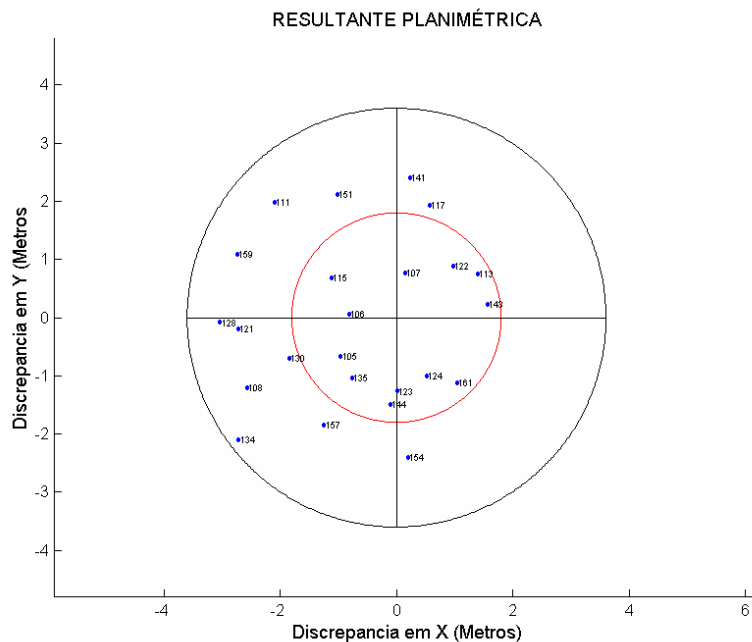


Figura 04 – Representação espacial das discrepâncias planimétricas obtidas com a DLT estendida

#### 4 – CONCLUSÕES

A metodologia empregada para a determinação de coordenadas espaciais de um modelo estereoscópico de imagens EROS é animador e pode-se afirmar que o mesmo teve êxito, pois foi possível determinar coordenadas de pontos fotointerpretáveis, com exatidão melhor que a indicada pela empresa produtora das imagens. Os resultados acima indicam, também, que o uso do parâmetro  $L_{12}$  no ajustamento das coordenadas melhora de maneira mais significativa a determinação das coordenadas. Isso nos prova a possibilidade de se utilizar as equações DLT estendida, como modelo matemático funcional na geração de modelos digitais de terreno e extração de informações cartográficas planimétricas a partir de um par estereoscópico de imagens EROS ou pares estereoscópicos obtidos de imagens de maior resolução espacial como as dos satélites IKONOS e QUICKBIRD. Podemos concluir, também, que as coordenadas altimétricas obtidas estão de acordo com o relevo da área de estudo (na qual ocorrem desníveis de até 150m), pois em pontos mais altos não ocorreu nenhum tipo de deformação perceptível. É importante ressaltar que as discrepâncias são sempre menores em regiões próximas aos pontos de apoio, e isso pode ser explicado pela característica polinomial do modelo. Pode-se afirmar, tendo em vista que a média final das diferenças entre as coordenadas calculadas e as reais, que grande parte dos erros obtidos ocorreram por erros de leitura, e não por erros sistemáticos do modelo matemático. Esses erros aconteceram por causa da dificuldade de se identificar um determinado ponto numa imagem cuja distância amostral no terreno é de 1,8m.

Deve ser levado em consideração que o apoio foi gerado a partir de uma aerotriangulação prévia, portanto o apoio pode estar transportando erros para as coordenadas finais. Uma dificuldade encontrada foi a defasagem temporal entre as imagens EROS e as aerofotos utilizadas para a orientação, pois as aerofotos continham elementos que ainda não existiam na época da geração das imagens.

#### 5 – REFERÊNCIAS

- ABDEL-AZIZ, Y.; Karara, H.M. **Direct Linear Transform from Comparator Coordinates into Object Space Coordinates in Close-Range Photogrammetry**. Proc of the AUI/UI Symposium on Close Range Photogrammetry, Urbana, 1971.
- ANDRADE, J. Bittencourt de Andrade; **Fotogrametria**. Curitiba; SBEE, 2003; 2ª Edição, 274p.
- FRASER, C.S.; Hanley, H.B.; Yamakawa T. **Sub-Metre Geopositioning with Ikonos Geo Imagery**. ISPRS Joint Workshop "High Resolution Mapping from Space 2001. Hannover, 2001.

GEMAEL, Camil; **Introdução ao Ajustamento de Observações: Aplicações Geodésicas**, Editora UFPR, Curitiba, 1994, 319p.

ImageSat, 2004. Web site <http://www.imagesatintl.com>. Data do acesso: 15/05/2004.

LUGNANI, J. B. **Introdução à Fototriangulação**. Imprensa Universitária da UFPR. Curitiba, 1987, 147p.

MITISHITA, Edson A.; Saraiva, Cláudia C. S. **Modelos Matemáticos para Fins de Monorestituição de Imagens de Alta Resolução Ikonos 2 – GEO**. In.: Série em Ciências Geodésicas Vol. 2 – Pesquisas em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, Departamento de Geomática, Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Curitiba, 2002, 395p.

SARAIVA, Claudia C. S.; **Integração de Imagens de Alta Resolução Ikonos e Fotografia Aérea por Meio da MonoRestituição Digital para a Atualização Cartográfica de Mapas Municipais na Escala 1:25.000**. TESE de Doutorado. Curitiba, UFPR, 2003.

WANG, Y. **Automated triangulation of Linear Scanner Imagery**. Proc. Joint ISPRS Workshop on Sensors and Mapping from Space. Hannover, 1999.