

## Comparação entre a norma do INCRA e normas internacionais de Levantamentos com GPS

Daniel Carneiro da Silva, *UFPE Recife*

1. Introdução
2. Alguns Conceitos estatísticos de Qualidade
  - 2.1 Níveis de confiança
  - 2.2 Conceitos de Precisão e Exatidão
    - 2.2.1 Medidas de Precisão do Ajustamento
      - 2.2.1.1 Medidas de precisão locais
      - 2.2.1.2 Medidas de precisão globais
      - 2.2.1.3 Desvio padrão de um conjunto de observações
    - 2.2.2. Medidas de qualidade da exatidão
      - 2.2.2.1 Estimativa de exatidão a partir de pontos de checagem
      - 2.2.2.2 Estimativas a partir de ajustamento de rede
3. Comparações entre Normas
  - 3.1 Norma 1
  - 3.2 Norma 2
  - 3.3 Norma 3
4. Incompatibilidade futura entre Coordenadas
5. Uso de Receptores com L1/L2 versus L1
6. Conclusões
7. Referências Bibliográficas

► **Resumo**

### 1. Introdução

Os levantamentos com GPS para fins de atender ao georreferenciamento de imóveis rurais conforme determina a Lei 10267/2001, começaram recentemente a serem executados e ainda estão praticamente em fase de adaptação pelos profissionais que trabalham com topografia e cadastro. O INCRA para atender aos objetivos da Lei preparou um conjunto de normas e procedimentos que fazem parte do manual “Norma Técnica para Georreferenciamento de Imóveis Rurais” de Novembro de 2003, mas estas normas têm sido objeto de bastante discussão no meio acadêmico e profissional. Pelo lado acadêmico existe uma preocupação com o rigor matemático dos conceitos e da real confiabilidade das precisões a serem alcançadas na definição de vértices e limites. Pelo lado profissional as questões se referem formação curricular necessária para os técnicos que podem efetuar os levantamentos, dúvidas em interpretação e implementação de exigências das normas e até questionamentos sobre performance de equipamentos versus precisão requerida. As aplicações da metodologia de posicionamento com GPS, além do georreferenciamento exigido pela citada Lei, têm sido crescente, e veio facilitar muito, em serviços geodésicos para apoio e em projetos de engenharia em geral. Porém faltam tradição em normas e

especificações que detalhem o uso de GPS para cada uso específico. O manejo fácil dos receptores e programas de processamento, aliados à superestimativa de precisão que estes últimos tendem em apresentar, infelizmente levou à difusão do uso indiscriminado de métodos rápidos de rastreamento, sem os devidos cuidados, até para medições de imóveis rurais. O fato de que a tecnologia é relativamente recente, que são poucos os livros técnicos e manuais em português; e que os treinamentos dados pelos fabricantes limitam-se na maioria das vezes apenas a operação dos equipamentos, também contribuem para muitas dúvidas no emprego do GPS para o georreferenciamento.

Com o objetivo de contribuir com sugestões, como tem sido feito por Brun et al(2004), Mônico et al(2003), Silva et al (2003) e outros, de soluções para este problema do ponto de vista acadêmico, mas com desdobramentos práticos, este trabalho discute alguns conceitos presentes nas normas do INCRA e os compara com algumas normas internacionais existentes, como:

- Definição dos conceitos de precisão, exatidão e nível de confiança
- definição de procedimentos alternativos ao ajustamento pelos mínimos quadrados
- previsão de problemas futuros com a incompatibilização de coordenadas devido à propagação de erros
- possibilidade de aumento da distância entre estações para receptores com uma frequência.

## **2. Alguns Conceitos estatísticos de Qualidade**

A avaliação tanto teórica quanto prática de indicadores para precisão e exatidão sempre deixam dúvidas e são motivos de controvérsias. A Norma do INCRA cita muitos termos, dos quais a maioria serão discutidos aqui de forma introdutória, sendo que também serão dadas indicações para bibliografia complementar.

### **2.1 Níveis de confiança**

Em medições geodésicas são determinadas coordenadas de pontos a partir de uma, duas ou três dimensões e considera-se que os erros aleatórios são distribuídos de acordo com a curva Normal. Com a ajuda de programas de ajustamento, baseado no Método dos Mínimos Quadrados (MMQ), são obtidos relatórios com parâmetros estatísticos para aquelas coordenadas dentro de certos níveis de confiança.

O nível de confiança é indicado pela região de confiança, dentro da qual é estatisticamente provável que esteja o valor verdadeiro de um parâmetro. É expresso como uma porcentagem. No sentido de normas é a probabilidade de que erros estejam de um intervalo de dado valor. Estes conceitos estão bem definidos em normas como FGDC(1998) e ICSM(2000), mas não estão na do INCRA(2003).

A região de confiança mais conhecida refere-se ao “desvio padrão”, usado como avaliação para medidas unidimensionais, que estejam afastadas, para mais ou para menos, da média. Neste caso se espera que 68% das observações estejam dentro de um desvio padrão (o desvio padrão aparece na norma do INCRA indicado por "1s", ou, um sigma).

Em duas dimensões (2D) a região de confiança é limitada por uma elipse, e nesse caso o nível de confiança para a elipse padrão é de cerca de 39% (figura 1).

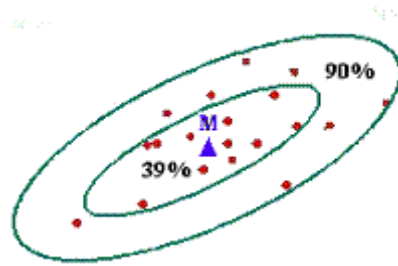


Figura 1 : Elipse padrão (39%) e elipse de 90% de confiança, da localização da posição verdadeira do vértice M.

Na figura 2 está um esquema que mostra as relações entre os desvios padrões em separado para coordenadas X e Y e a elipse de erro correspondente.

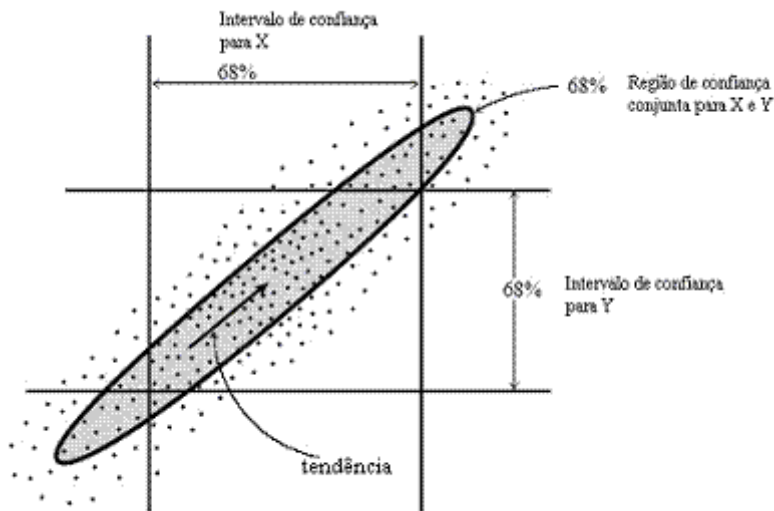
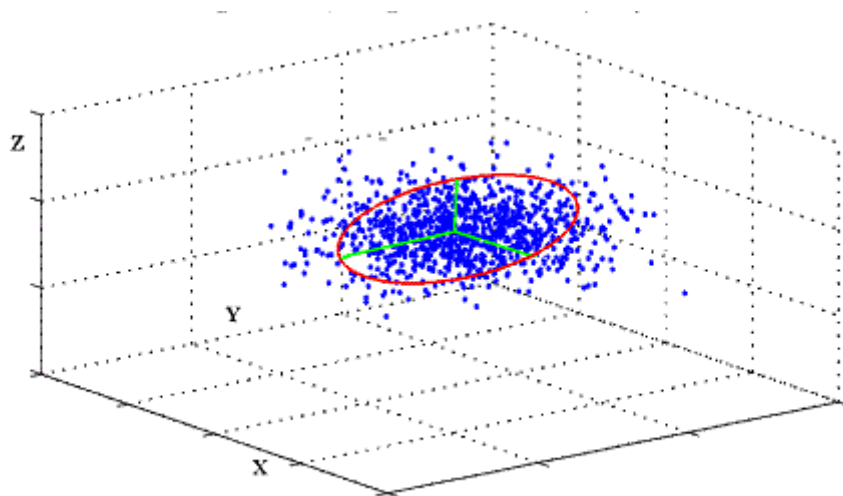


Figura 2 : Elipse de erro e os correspondentes desvios padrões em x e y. (Baseado em exemplo de Numerical Recipes in C: The art of scientific Computing. Copyright © 1988-1992 by Cambridge University Press.)

Em três dimensões (3D) a região de confiança é delimitada por uma elipsóide, que tem uma probabilidade de cerca de 20% (figura 3).



**Figura 3 : Elipsóide de erros**

Os níveis de confiança para os casos de medições 1D, 2D e 3D e suas relações com os desvios padrões estão na tabela 1. A tabela 1 mostra ainda fatores de multiplicação para vários níveis de confiança, em que o nível padrão tem fator 1.

Os níveis de confiança referentes ao nível padrão podem ser considerados baixos. Por isto, adotam-se freqüentemente os níveis correspondentes a 95% e 99%. Por exemplo, se para um linha de base se aceita uma variação de  $\pm 20\text{cm}$ , quando o nível de confiança passa de 68% para 95%, o desvio padrão dessa linha deve ser agora de  $10,2\text{cm}$  ( $20\text{cm}/1,96$ ). A interpretação para o fato que o valor absoluto da variação diminui quando o intervalo de confiança aumenta é simples: é estatisticamente esperado que 95% das medições da linha de base com um erro de até  $20\text{cm}$  resulta num desvio padrão de  $10,2\text{cm}$ . Se for mantida a probabilidade de 68%, de cada dez observações três podem ter mais de  $20\text{cm}$  e com 95% de cada 20 observações apenas uma pode ultrapassar o limite.

A norma do INCRA especifica o nível de confiança padrão. Isto na prática permite que alguns dos pontos tenham até  $1,4\text{m}$  de discrepância ( $0,50\text{m} \times 2,81$  da tabela para 99,5%). Esta discrepância, no entanto, não deve ser praticada nem aceita, porque conforme se discutirá na seção 4 a cumulação de erros pode gerar problemas de superposição de limites e de certificação de outros levantamentos no futuro.

Nível de Confiança desejado (%)	FATOR DE MULTIPLICAÇÃO		
	Caso 1D Desvio Padrão	Caso 2D Elipse Padrão	Caso 3D Elipsóide Padrão
1	0,01	0,14	0,33
5	0,06	0,32	0,59
10	0,14	0,46	0,76
20	0,25	0,66	1,00

39	0,52	1,00	1,36
50	0,68	1,18	1,54
68	1,00	1,52	1,88
90	1,64	2,15	2,50
95	1,96	2,45	2,79
99	2,58	3,04	3,37
99,5	2,81	3,26	3,58

## 2.2 Conceitos de Precisão e Exatidão

Entre os diversos termos usados para expressar a qualidade geométrica, as palavras precisão e exatidão (ou acurácia), são as mais comuns. Os termos imprecisão e inexatidão poderiam ser mais apropriados, mas não são comuns na linguagem tradicional da comunidade cartográfica e geodésica. No entanto em metrologia, em normas adotadas também no Brasil, já se usa o termo "incerteza da medição".

As interpretações dos termos precisão e exatidão, em conceitos estatisticamente bem definidos, são geralmente mais ou menos difíceis e têm uma grande variedade de respostas, entre elas: erro médio quadrático, desvio padrão, erro médio, erro provável, erro máximo, limite de confiança, etc.

Embora não seja fácil decidir em certos casos, mesmo entre especialistas, o que precisão e exatidão significam, para fins da Lei 10267 esses termos devem ficar bem entendidos. As definições da Norma do INCRA coincidem com conceitos bem difundidos de que precisão tem a ver com a proximidade entre as observações, e que exatidão ou acurácia tem a ver com a proximidade entre as observações e o seu valor verdadeiro:

*“Precisão de uma dada grandeza retrata o nível de aderência entre os valores observados, sua repetibilidade ou grau de dispersão”*

*“Acurácia de um levantamento é entendida como o grau de aproximação de uma grandeza de seu valor verdadeiro ...”*

A figura 4 mostra graficamente os conceitos de precisão e exatidão, em relação a uma posição verdadeira, que embora esteja marcada na figura com o triângulo, nunca é conhecida; e uma posição que é estimada a partir da média de um conjunto de observações (na figura marcada com X).

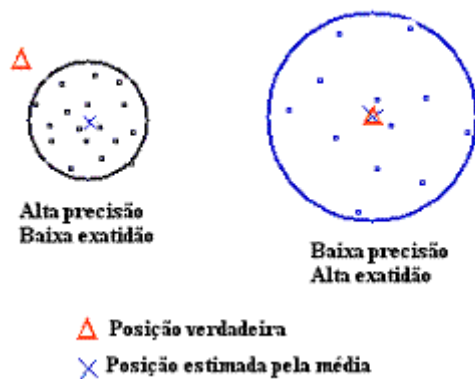


Figura 4 : Ilustração dos conceitos de Precisão e Exatidão

Existem importantes relações entre a precisão e exatidão explicadas pela teoria dos erros, que serão mostradas a seguir segundo (HOTTIER,1976).

Seja  $X$  o verdadeiro valor de alguma quantidade física, e  $x$  uma estimativa de  $X$  baseada em um sistema particular de medida  $S$ . Portanto existe uma diferença entre a esperança de  $x$ , denotado por  $E_s(x)$ , e o valor verdadeiro de  $X$  :

$$E_s(x) \neq X \quad (1)$$

Essa diferença define-se o erro de  $x$ , que pode ser escrito como sendo:

$$e = x - X = [x - E_s(x)] + [E_s(x) - X] = \varepsilon + \beta \quad (2)$$

em que  $e = x - E_s(x)$  é o erro aleatório residual;  $b = E_s(x) - X$  é a tendenciosidade.

Portanto o erro  $e$  é composto de dois parâmetros:

- $e$  é o erro aleatório residual do sistema de medida  $S$ . E como regra a distribuição do erro aleatório é considerada normal:  $\varepsilon \sim N(0, \sigma_x)$ .
- $b$  é a tendenciosa causada pelos efeitos sistemáticos, pela falta de definição da quantidade medida ou pelo poder de resolução do procedimento de medição.

precisão de  $x$ , no sistema de medida  $S$ , indica o quanto  $x$  está próximo de  $E_s(x)$  e é caracterizado pelo desvio padrão ( $\sigma_x$ ) de  $\varepsilon$ .

A exatidão da estimativa  $x$  indica qual é a sua proximidade do valor verdadeiro  $X$ , sendo caracterizada pelo desvio padrão do erro  $\sqrt{E_s(e)^2}$ , que conforme demonstrado a seguir, é função da precisão e da tendenciosidade:

$$E_s(e)^2 = E(\varepsilon + \beta)^2 = E(\varepsilon^2 + 2\varepsilon\beta + \beta^2) = E(\varepsilon^2) + 2\beta E(\varepsilon) + E(\beta^2) = \sigma_x^2 + E(\beta^2) \quad (3)$$

A quantidade  $\sqrt{E(\beta^2)}$  pode ser chamada de desvio padrão da tendenciosidade.

Da equação (3) se chega a uma conclusão de muito importante para uso prático: quando a tendenciosidade é desprezível (ou desconhecida) é possível usar o desvio padrão do erro aleatório (isto é, a precisão) como indicador da exatidão, como por exemplo, é previsto na norma FGDC(1998).

### 2.2.1 Medidas de Precisão do Ajustamento

Os indicadores de qualidade de precisão de pontos quando são fornecidos pelos programas de ajustamento de redes, para serem válidos, pressupõem o seguinte (Marshall, 1989):

1. A MVC (Matriz Variância-Covariância) dos parâmetros ( $\Sigma x$ ) não é invariável com relação ao datum selecionado, ou seja, em relação aos pontos usados como referência para o controle. Portanto a precisão das medidas é tendenciosa com relação ao datum e depende da configuração e do tipo de injunções empregadas. O fato de ( $\Sigma x$ ) ser dependente do datum causa problemas em assegurar a precisão da posição de um ponto ajustado quando se compara um resultado de um ajustamento com outro.
2. A MVC é  $\Sigma x = \sigma_0^2 \cdot Qx$ , onde  $Qx$  é a matriz cofatora dos parâmetros ajustados e  $\sigma_0^2$  o fator de variância da unidade de peso a priori. Analisando  $\Sigma x$  é importante verificar que  $\sigma_0^2$  é um fator de escala que tem influência direta sobre a precisão das medidas ou parâmetros. Qualquer erro na estimativa do  $\sigma_0^2$  influenciará diretamente a precisão.

A estimativa do  $\sigma_0^2$  pode ser feita com base na variância das observações ou medições, mas é comum ser tomado igual a unidade, enquanto que no ajustamento calcula-se o fator de variância da unidade de peso a posteriori ( $\underline{\sigma}_0^2$ ).

Deve-se compara  $\sigma_0^2$  com  $\underline{\sigma}_0^2$  usando o teste de hipótese qui-quadrado, previsto também na norma do INCRA:

$$H0: \sigma_0^2 = \underline{\sigma}_0^2 \quad (4)$$

$$H1: \sigma_0^2 \neq \underline{\sigma}_0^2$$

Nos casos em que a hipótese é rejeitada, ou seja  $\sigma_0^2$  não é estatisticamente igual a  $\underline{\sigma}_0^2$ , pode ter ocorrido uma das seguintes causas:

1. presença de erros grosseiros entre as observações;
2. ponderação das variâncias das medições e parâmetros inadequados;
3. modelo matemático não adequado ou incompleto.

Eliminado os erros grosseiros e usando um modelo matemático adequado, estima-se novo  $\sigma_0^2$  e novas variâncias, até que a hipótese  $H_0$  seja não rejeitada, dentro de um nível de significância escolhido convenientemente, geralmente de 5%.

Os indicadores de precisão derivados do ajustamento de medições podem ser classificados como medidas de precisão locais, quando resultam em informações sobre os pontos isoladamente, ou medidas de precisão globais, quando informam sobre todo o conjunto do levantamento, conforme será exposto nas seções seguintes.

### 2.2.1.1 Medidas de precisão locais

As medidas de precisão locais mais usadas em levantamentos são o desvio padrão, elipse de erro, círculo de erro, elipsóide de erros e esfera de erros.

i) Desvio padrão das componentes da coordenada

A mais simples medida de precisão é o desvio padrão das componentes da coordenada. O desvio padrão é obtido diretamente da diagonal da matriz de cofatores  $Q$  multiplicado pelo  $\sigma$  a priori ou  $\sigma$  a posteriori, ou da Matriz Variância-Covariância (MVC) correspondente. Então, para cada componente se tem:

$$\sigma_{xi} = \sigma_0 \sqrt{q_{xi}}$$

$$\sigma_{yi} = \sigma_0 \sqrt{q_{xi}} \quad (5)$$

$$\sigma_{zi} = \sigma_0 \sqrt{q_{xi}}$$

em que  $q_{xi}$  é a submatriz de Q correspondente ao i-ésimo ponto.

Normalmente os programas de ajustamento informam diretamente os desvios padrões  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$  segundo os eixos X, Y e Z, ao lado das coordenadas ou distâncias, ou em forma de submatriz triangular. Deve-se observar ainda que os programas de processamento de dados GPS, sem ajustamento de rede, muitas vezes informam apenas os desvios das linhas de base e não das coordenadas.

## ii) Elipse e Elipsóide de erros

Elipse e elipsóide de erros são recursos mais completos de análises, que os simples desvios padrões, para avaliar a precisão de coordenadas em espaços bi e tri-dimensionais respectivamente, tanto para pontos individualmente como entre si (elipse ou elipsóide relativa). Enquanto os desvios padrões são dependentes das direções dos eixos do sistema de referência, os parâmetros das elipses e elipsóides informam precisamente quais são os desvios máximos, mínimos e as direções.

Em redes GPS a determinação de coordenadas é por natureza tri-dimensional, porém é comum que os programas de processamento façam análises separadas para cada componente ou planimetria e altimetria. Quando se tem interesse apenas nas coordenadas planimétricas, portanto em precisão bi-dimensional; fica excluída a coordenada GPS reconhecidamente pior, que é a altura, e ao invés de usar o elipsóide se usa então a elipse. (veja item 2.1 sobre a grande mudança da faixa de confiança padrão entre elipse e elipsóide de erros). Na figura 5 está um exemplo de visualização de elipses de ponto e relativa para análise de rede.

Os dados necessários para calcular a elipse de erros são os elementos da sub matriz  $Q_i$  (eq 6) da MVC, cujas variâncias são  $q_{xi}$  e  $q_{yi}$  e as covariâncias são  $q_{xyi}$  e  $q_{yxi}$ .

$$Q_i = \begin{pmatrix} q_{xi} & q_{xyi} \\ q_{yxi} & q_{yi} \end{pmatrix} \tag{6}$$

Mais detalhes sobre os cálculos de elipses são encontrados em Gemael(1994).

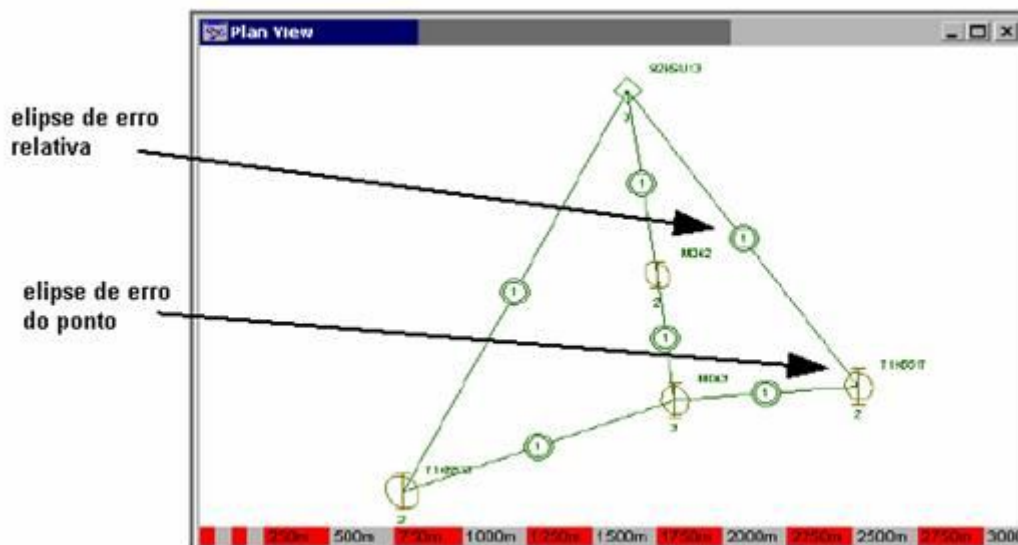




Figura 5 : Análise de rede com Elipses de Erros. (Adaptado do Manual do programa Ezsurv da Viasat Geo Technologies)

### iii) Círculo e esfera de erro

É uma medida de precisão aproximada da elipse de erros e empregada por sua simplicidade. Também tem o nome de desvio padrão circular, e pode ser calculada por:

$$r = \frac{(\sigma_{xi} + \sigma_{yi})}{2} \quad (7)$$

em que  $r$  é o raio obtido a partir da média dos semi-eixos da elipse. Quando são consideradas as três dimensões se tem a esfera de erros.

As normas americanas usam o círculo de erros e definem fórmulas mais detalhadas para seu cálculo, adequadas ao nível de confiança especificado, como o exemplo mostrado no item 2.2.2.1.

#### 2.2.1.2 Medidas de precisão globais

As medidas de precisão globais refletem a precisão do levantamento com um todo. As mais simples são o desvio padrão médio, a precisão proporcional e o intervalo do desvio padrão. Outras medidas de precisão podem ser encontradas com mais detalhes em Marshall (1989).

A medida básica e mais simples é o desvio padrão médio das coordenadas X, Y e Z de todos os  $n$  pontos.

$$\sigma_n = \sqrt{\sum \frac{\sigma_{xi}^2 + \sigma_{yi}^2 + \sigma_{zi}^2}{3n}} \quad (8)$$

em que  $n$  = número de pontos O desvio padrão médio também pode ser calculado para cada coordenada do espaço objeto X, Y e Z .

#### 2.2.1.3 Desvio padrão de um conjunto de observações

Os desvios padrões visto acima são resultados da raiz quadrada das variâncias, que são dadas pelas saídas dos programas de ajustamento. Mas também pode ser calculado o desvio padrão para um conjunto de observações da variável X segundo a fórmula bem conhecida:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum (X_i - \mu_x)^2}{n - 1}} \quad (9)$$

em que  $\sigma_x$  é o desvio padrão da variável;  $X_i$  é a observação de 1 a  $n$  e  $\mu_x$  é a média das observações.

Como o desvio padrão é dependente da redundância do sistema, quando  $n$  aumenta  $\sigma_x$  diminui. É por este motivo que os resultados obtidos dos programas de processamento por GPS superestimam a precisão, visto que em poucos minutos são obtidas dezenas de observações do mesmo ponto.

Entre as definições acima vale ressaltar que a definição para Erro Médio Quadrático (equação 10) obtido de diferenças quadradas entre duas observações, é bastante diversa do desvio padrão (equação 9) obtido de diferenças quadradas entre a média das observações e cada observação.

## 2.2.2. Medidas de qualidade da exatidão

A exatidão pode ser avaliada por meio de testes estatísticos, por ajustamento pelo MMQ, pela comparação com medidas conhecidas de maior exatidão ou ainda pela repetição.

Para fins da norma do INCRA a avaliação da exatidão desejada é do posicionamento horizontal, mas isto não é explicitamente definido. A definição poderia ser similar a dada pela Norma FGDC(1998):

*Acuracidade de posicionamento horizontal: define o padrão relacionado às coordenadas horizontais que é avaliado pelo raio do círculo de erro, de tal modo que o local verdadeiro do ponto esteja 95% das vezes dentro do círculo.*

Ou seja, a exatidão horizontal é a medida de deslocamento radial entre o ponto que está sendo avaliado e sua verdadeira ou mais acurada posição.

Um dos princípios práticos adotado é comparar os resultados obtidos de um procedimento particular de medição, com um outro procedimento “mais exato”. A seguir serão discutidos algumas formas de avaliação de exatidão.

### 2.2.2.1 Estimativa de exatidão a partir de pontos de checagem

Os pontos de checagem são pontos de coordenadas conhecidas, de preferência obtidos com uma exatidão maior. No caso da norma do INCRA (item 4.6.1) a verificação de exatidão sugerida é a comparação com as coordenadas obtidas num levantamento anterior e com os resultados de ajustamento.

A norma FGDC(1998) usa o EMQ (Erro Médio Quadrático) também conhecido como RMSE (Root Mean Square Error) para estimar a exatidão posicional. O EMQ é calculado entre as coordenadas obtidas de duas fontes independentes para os mesmos pontos conforme o nível de confiança especificado.

Se  $X_{checci}$ ,  $Y_{checci}$  e  $Z_{checci}$  são as coordenadas dos pontos de checagem com exatidão mais elevada; e  $X_i$ ,  $Y_i$  e  $Z_i$  são as outras coordenadas a comparar, então o EMQ é dado por:

$$EMQ = EMQ = [\sum((x_i - x_{checci})^2 + (y_i - y_{checci})^2 + \sum(z_i - z_{checci})^2)/n ]^{1/2} \quad (10)$$

A exatidão horizontal é avaliada pelo erro horizontal (EMQH) no ponto dado, pelo vetor formado pelo erro em X (EMQx) e erro em Y (EMQy) calculado por:

$$\begin{aligned} EMQ_H &= EMQ = [\sum((x_i - x_{checci})^2 + (y_i - y_{checci})^2) / n ]^{1/2} \\ &= [EMQ_x^2 + EMQ_y^2]^{1/2} \end{aligned} \quad (11)$$

A mesma norma prever ainda o cálculo de aproximação para o erro padrão circular quando o  $EMQ_y \neq EMQ_x$  e se a proporção entre o erro menor e maior estiver entre 0,6 e 1,0. Neste caso o erro padrão circular (que tem nível de confiança de apenas 39,35%) pode ser aproximado como:

$$EPC = (EMQ_x + EMQ_y) / 2 \quad (12)$$

Se o erro for distribuído, normal e independentemente, em cada componente x e y, o valor da exatidão pode ser aproximado de acordo com a seguinte fórmula para o nível de 95% de confiança:

$$E \cong 2,4477 \times EPC$$

(13)

Os padrões de exatidão para redes geodésicas, nesta norma, são especificados diretamente por unidades e sub-unidades do metro. Esta forma de classificação é simples e de compreensão imediata. Por exemplo uma rede é classificada com padrão de exatidão de 5,0cm se os erros dos seus vértices estão dentro de um círculo com raio de 5,0cm a 95% de nível de confiança, ou seja, se os erros têm  $EPC = 2,04\text{cm}$

### 2.2.2.2 Estimativas a partir de ajustamento de rede

A estimativa da exatidão a partir do ajustamento de rede não é trivial e depende de muitos fatores, como precisão dos pontos de apoio, tipo de injunções, geometria da rede, uso de ocupações independentes, múltiplas sessões de rastreamento, etc, e não será discutido aqui. As normas ICSM(2000) CGCC(1996) e FGCC(1989) trazem detalhes sobre o ajustamento de redes para os interessados em se aprofundar no assunto. Para introdução aos métodos de ajustamento pelo MMQ sugere-se Gemael(1994), Dalmolin(2002) ou Wolf e Ghilane (1997).

Uma sugestão de alternativa para o ajustamento de rede pelo MMQ, com vistas às aplicações para o georreferenciamento de imóveis pode ser o uso de outros métodos, como poligonais fechadas ou levantamentos radiais com GPS com repetição a partir de outra base, conforme discutido em Silva et al (2003b).

## 3. Comparações entre Normas

Algumas normas e especificações internacionais para levantamentos com GPS estão relacionadas na bibliografia, mas entre elas existem poucas que tratam especialmente do cadastro. Aqui serão discutidos e comparados alguns aspectos com a norma do INCRA, visto que o assunto é bastante extenso, e deve ser objeto de trabalho conjunto de toda comunidade acadêmica e profissional, para aprimorar as normas nacionais de levantamentos com GPS de forma geral.

### 3.1 Norma 1

As normas do FGDC- Federal Geographic Data Committee dos EUA (FGDC, 1998) são genéricas para padrões de precisão de posicionamento geo-espacial. Esta segue uma tendência de normas para dados espaciais que não devem detalhar equipamentos e métodos de levantamento, mas se preocupar com qualidade, precisão e exatidão de coordenadas de pontos, conforme as exigências ou aplicação do projeto. Esta norma é referenciada pelas demais normas americanas mais recentes.

Este tipo de enfoque poderia ser seguido no futuro para as normas do INCRA e da ABNT que hoje detalham extensivamente equipamentos e procedimentos.

### 3.2 Norma 2

A norma *Standards and Guidelines for Cadastral Surveys using Global Positioning System Methods* é adotada pelo Departamento de Agricultura e Serviço Florestal e Departamento de Interior- Escritório de Gerenciamento Territorial dos EUA, (USDA e USDI, 2001).

Esta norma trata de levantamentos com GPS para o cadastro e rede de apoio, com padrões de exatidão mais rigorosos (tabela 2) que os definidos pela norma do INCRA. Os padrões exigido para as medições cadastrais são de 0,10m para exatidão local e de 0,20m com relação à rede

geodésica de referência nacional, a nível de 95 de confiança, contra os 0,50m da norma do INCRA a nível de 68%. Os padrões de exatidão local referem-se às medidas de exatidão relativa de um ponto em relação ao adjacente. Padrões de exatidão de Redes referem-se a exatidão de todos o levantamento cadastral em relação à de referência nacional.

Círculo de Confiança de 95%	Aplicação
<b>Padrões de exatidão local</b>	
Menor que 0.050 m	CPC Controle de Projeto Cadastral
Menor que 0.100 m	Medições Cadastrais
<b>Padrões de exatidão de rede</b>	
Menor que 0.100 m	CPC Controle de Projeto Cadastral
Menor que 0.200 m	Medições Cadastrais

Segundo essa norma a rede de controle do projeto cadastral e as medições cadastrais devem satisfazer rigorosamente ao seguinte:

1. Estar referenciadas a duas ou mais estações de controle horizontal oficiais, ou à rede de controle do projeto, localizadas em dois ou mais quadrantes, relativos à área do projeto cadastral.
2. Os pontos são estabelecidos por duas ou mais linhas de base independentes.
3. Conter laços de no mínimo três linhas de base. Que as linhas de base tenham uma solução de dupla diferença inteira fixada ou concorde com as especificações do fabricante para comprimentos de linha de base que excede o critério de solução fixada.
4. Todas as estações dentro da rede CPC deveriam ter duas ou mais ocupações independentes.
5. A rede de controle de projeto cadastral deve ser uma figura geometricamente fechada.
6. Linhas radiais simples ou lances para um ponto não são aceitáveis.

As exigências acima, com destaque para laços, linhas de bases independentes e ocupações independentes, são constantes em todas as normas pesquisadas. Quanto a estas exigências a norma do INCRA cita apenas que cada ponto de controle deve ser determinado com “*dois vetores independentes*” e da lista acima apenas a letra a e letra e são claramente relacionadas (item 4.3.2.3.1).

Esta norma, assim como as demais, recomenda que duas ou mais ocupações independentes para as estações de uma rede ajudam a detectar erros instrumentais e do operador, além de fornecer dados redundantes. A repetição é importante para redes de alta precisão e também é uma forma prática de detectar erros nos levantamentos rápidos.

Os conceitos de Linhas de Base Independentes serão detalhados no item a seguir.

### 3.3 Norma 3

A Norma adotada na Austrália, ICSM(2001), é muito completa e de fácil entendimento. É dividida em duas partes: Parte A para padrões de precisão; e a Parte B para os Processos recomendados de cálculo e levantamento.

A parte A define classes e ordens para levantamentos de controle horizontais e verticais, incluindo posicionamento com GPS, e as regiões de confiança.

A parte B, que trata dos procedimentos de levantamentos, apresenta tabelas com especificações para determinações astronômicas de azimutes, medições eletrônicas de distâncias, medições de ângulos horizontais, nivelamento, e posicionamento com GPS, sistemas inerciais, controle horizontal por fotogrametria. Ainda inclui otimização do projeto de rede, avaliação do ajustamento, transformações detalhadas entre datum e instruções sobre informações e documentação do projeto.

A parte de GPS especifica as técnicas de rasteio estático, rápido estático, pseudo-cinemático, cinemático e cinemático em tempo real (RTK). Também apresenta tabelas com as exigências entre classe do levantamento e os procedimentos mínimos de espaçamento entre estações, número de ocupações e de linhas de base independentes para cada ponto; e o tipo de solução (fixa, flutuante, etc) em função de distância e classe.

A norma inclui capítulo para a análise de ajustamento por mínimos quadrados e análise de comparação usando erro de fechamento de poligonal. Este último tipo de análise destina-se aos levantamentos GPS em que as novas estações são obtidas a partir de irradiação de duas estações de base (figura 6). O levantamento da poligonal de A até E é efetuado por irradiação a partir das Bases 1 e 2. Os vetores de erro, entre as duas observações, são comparados com tolerâncias calculadas a partir dos indicadores nominais de precisão, fornecidos pelo fabricante dos receptores. Este tipo de análise não é encontrado em outras especificações, mas poderia ser incluído na norma do INCRA, por ser muito mais simples que o ajustamento de rede.

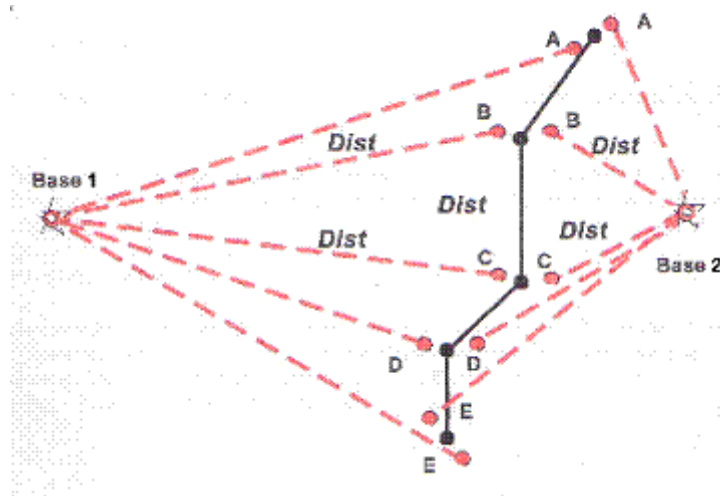


Figura 6 : Levantamento de poligonal por irradiação a partir de duas estações de base GPS ( Baseado em ICSM, 2001)

As exigências para uso de linhas de bases independentes entre as estações, são para evitar que as correlações entre os vetores levantados simultaneamente superestimem a precisão final do ajustamento. Esta norma traz as seguintes recomendações:

- Se consegue uma medida independente de linha de base, em uma sessão de observação, quando os dados usados não são simples combinações diferentes dos mesmos dados usados no cálculo dos outros vetores observados nessa sessão.
- O número total das linhas de base que podem ser calculadas numa sessão observada com  $n$  receptores, é  $n(n-1)/2$ . Entretanto, somente  $n-1$  daquelas linhas de base são independentes. O restante -linhas de base triviais- é formado pelas combinações dos dados usados para calcular as linhas de base independentes. Os resultados das observações da mesma linha de base mas feitas em duas sessões diferentes são independentes.

- Geralmente os processadores de linhas de base independentes supõem que não há nenhuma correlação entre vetores independentes. As linhas de base triviais podem ser incluídas no ajuste para compensar um modelo estatístico deficiente. Se a correlação matemática, entre dois ou mais vetores observados simultaneamente em uma sessão, não estiver incluída na matriz variância-covariância, as linhas de base triviais exercem uma função de amarração que simula o próprio efeito das estatísticas de correlação, mas ao mesmo tempo introduz uma falsa redundância no número de graus de liberdade. Nestes casos o número de linhas de base triviais no ajustamento deve ser subtraído do número de graus de liberdade, antes que o fator de variância unitário a posteriori seja calculado. Se esta recomendação não for seguida as linhas de base triviais devem ser excluídas completamente da rede.

#### **4. Incompatibilidade futura entre Coordenadas**

No item 4.6.2 da norma do INCRA, são tratados tópicos sobre o procedimento a ser cumprido para análise e verificação da exatidão do georreferenciamento do imóvel rural. Após levantar todos os vértices, “ajustar” e verificar o valor “*mais provável*” das coordenadas, deve ainda compará-lo com as coordenadas de marcos já certificados pelo INCRA, se houver.

A verificação da exatidão das coordenadas se baseia no relatório técnico, que deve ser acompanhado do ajustamento e dos indicadores que deve ser melhor que os 0,50m previstos na norma. Como a tabela 1 refere-se a nível de confiança de 67,8%; então de cada dez vértices três podem ter uma discrepância ou precisão além dos 0,50m.

A verificação de exatidão prever a comparação com vértices já certificados. Aqui podem acontecer três situações:

1. a discrepância entre as coordenadas é menor que 0,50m e prevalece então as coordenadas anteriores;
2. A discrepância é maior que o permitido, por algum tipo de erro ocorrido durante no levantamento, e o mesmo deve ser corrigido e submetido novamente;
3. A discrepância é maior, mas o levantamento atual está tecnicamente adequado. Neste caso o profissional deve comprovar eventual erro das coordenadas certificadas anteriormente.

O último caso deve ocorrer inevitavelmente, por dois motivos: rede geodésica de referência pouco densa e propagação de erros. A rede geodésica de referência (SGB) não tem a densidade necessária para que as linhas de base sejam mais curtas e portanto permitam mais exatidão nos levantamentos locais. Também em relação a SGB podem ocorrer problemas com as transformações de coordenadas de imóveis levantados com base no SAD-69 e o novo sistema SIRGAS- Sistema de Referência Geocêntrico para América do Sul.

A propagação de erros deteriora a precisão devido às injunções e geometria dos pontos de apoio e aos próprios erros da rede local. Desta forma os limites de uma propriedade podem ter uma precisão interna obtida de um levantamento recente muito boa, mas as coordenadas dos vértices podem ter discrepâncias inaceitáveis, quando comparadas com coordenadas anteriores dos vizinhos. Isto deve ser mais crítico quando forem confrontadas coordenadas de levantamentos que usaram diferentes vértices ou estações GPS do SGB. A figura 6 ilustra o caso. Para levantar o imóvel 1 foram usados os vértices 1 e 2 ao Norte e para o imóvel 3 os vértices V3 e V4 ao Sul. Devido à propagação de erros e outros problemas no ajustamento os limites o imóvel 1 ficaram deslocado 0,49 cm para o Norte e os limites do imóvel 3 ficaram 0,49m para o Sul. Ambos imóveis estão erros aceitáveis pelas normas do INCRA, mas quando for levantado o imóvel 2 e forem confrontadas as coordenadas, os vértices A, B, C e D podem ter um erro acumulado é de 0,98cm!

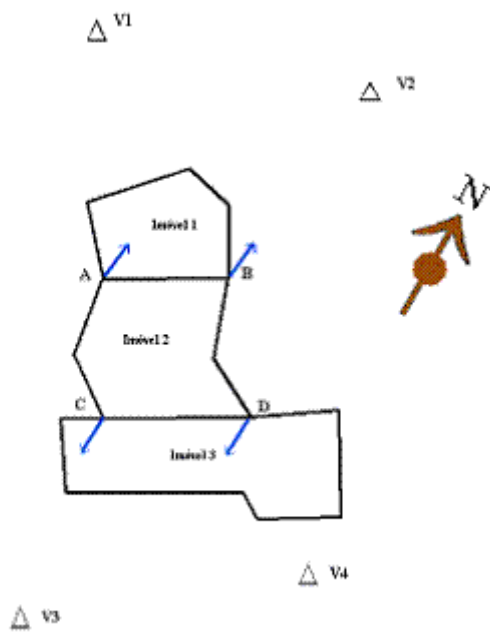


Figura 7 : Vetores de erros de coordenadas com direções opostas

## 5. Uso de Receptores com L1/L2 versus L1

A maioria das normas consultadas para este trabalho prevê o uso de receptores com dupla frequência para os levantamentos das redes de precisão, que no caso da norma do INCRA são chamadas de controle Básico (para ligação à rede nacional) e Controle imediato (para apoio a demarcação). Algumas não especificam equipamentos mas exigem rigorosamente procedimentos de campo, processamento, ajustamento e relatórios detalhados. As exigências mais importantes são para geometria e redundância de observações, conforme visto no item 3.1. Todas as medições cadastrais devem atender aquelas recomendações, chamando a atenção que não são permitidos linhas radiais simples.

O uso de rastreadores de uma frequência é permitido somente até distâncias de 20km (tabela 9 da norma) e acima disto apenas com equipamentos L1/L2. Mas a possibilidade de uso de L1 para distâncias maiores têm duas justificativas: uma de ordem técnica e outra econômica.

A primeira é que a precisão e exatidão exigidos de 0,10m para os pontos de controle básico a nível de confiança de 68%, pela norma do INCRA, podem ser considerados muito folgados e facilmente obtidos pelos equipamentos GPS, mesmo aqueles com apenas uma frequência. O uso de L1/L2 é justificado por permitir correções aos erros devido à ionosfera. Mas se sabe que, com tempo de rastreio adequado, os sinais de L1 podem fornecer o comprimento das linhas de base muito acima de 20km com precisão centimétrica. Portanto usando ajustamento de poligonais ou ajustamento de rede por trilateração; e coletando os dados de figuras fechadas é provável que se possa usar equipamentos por mais de 20km e as precisões e exatidões sejam aceitáveis para os pontos de controle básico. Alguns trabalhos (Camargo et al, 2003; Luna, 2004) dão indícios que isto é possível, desde que tomados os devidos cuidados.

A segunda é que o custo do equipamento apenas com L1 é muito menor (cerca de 50% do valor) que de equipamentos com L1/L2. O custo do equipamento com L1/L2 é muito elevado para a maior parte dos profissionais de levantamentos, que conseqüentemente têm de cobrar



mais caro pelos serviços, mesmo de propriedades rurais pequenas e pobres. Devido às dimensões continentais do Brasil, o investimento para o georreferenciamento completo do país, caso seja pago pelo Governo Federal, também é um encargo muito mais alto para sociedade, se usar apenas equipamentos com L1/L2.

## 6. Conclusões

Este trabalho discutiu questões de precisão e exatidão de levantamentos com GPS para georreferenciamento de imóveis rurais, para fins de atender às exigências da Lei 10267/2001, por meio da comparação de normas e especificações adotadas por entidades internacionais com as normas que constam do manual do INCRA.

Foi mostrado que alguns conceitos devem ser mais bem definidos na norma do INCRA para que não haja a menor dúvida durante a execução dos levantamentos em campo e depois no processamento e análise dos resultados; de modo que no futuro os erros acumulados não tragam prejuízos nem para os proprietários nem para os responsáveis pelos levantamentos, que podem ser cobrados judicialmente por erros cometidos.

O trabalho faz sugestões de alterações da norma e ainda de pesquisa para verificar até que distância se poderia usar equipamento GPS de uma frequência e ainda assim atender aos níveis de exatidão estabelecidos.

## 7. Referências Bibliográficas

- Brum, C.R.; Farret, J.C.; Moraes, C.V.; Farret, I.S.: *Análise de Aspectos Matemáticos para Levantamentos com GPS*. In: I Simpósio de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, UFPE, Anais em CD, 15p, Recife 2004.
- Camargo, P.O.; Redivo, I.A.C.; Florentino, C.: *Posicionamento com Receptores GPS de Navegação*. In: III Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas, Anais em CD, 7p., UFPR Curitiba 2003.
- CGCC: *Specifications for geodetic Control Networks using High-production GPS Surveying Techniques Version 2.0*. California Geodetic Control Committee. 1996.
- Dalmolin, Q.: *Ajustamento por Mínimos Quadrados*. Curitiba: Editora UFPR, 2002.
- FGCC: *Geometric Geodetic Accuracy Standards and Specifications for using GPS Relative Positioning Techniques Version 5.0*. Federal Geodetic Control Committee. Rockville (EUA): National Geodetic Survey. Reimpressão 1989.
- FGDC: *Geospatial Position Accuracy Standards. Virginia (EUA)*: Secretariat Federal Geographic Data Committee c/o U. S. Geological Survey. 1998.
- Gemael, C.: *Introdução ao Ajustamento de Observações: Aplicações Geodésicas*. Curitiba: Editora UFPR, 1994.
- Hottier, P.H.: *Accuracy of close range analytical restitutions: practical experiments and prediction*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. Falls Church, EUA: v.42, n. 11, p.1167-1187, nov. 1971.
- IBGE: *Especificações e Normas Gerais para Levantamentos GPS (Preliminares)*. Rio de Janeiro: Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 1992.
- IBGE: *Proposta Preliminar para Adoção de um Referencial Geocêntrico no Brasil*. Rio de Janeiro: Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2000.
- ICSM: *Standards and Practices for Control Surveys - (SP1)*, ICSM Publication n.1.. Belconnen, Austrália: Inter-governmental Advisory Committee on Surveying and Mapping. 2000.



- **INCRA: Normas Técnicas para Levantamentos Topográficos.** Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária, Superintendência Nacional de Desenvolvimento Agrário, Coordenação Geral Técnica, Divisão de Obtenção e Destinação. 2001.
- **LINZ: GPS Guidelines for Geodetic Control Surveys, OSG Standard 3.** Wellington, Nova Zelândia: Land Information New Zeland, Office of Surveyor-General. 1998.
- **Marshal,A.R.: Network Design and Optimization in Close Range Photogrammetry.** Kensington, Austrália: University of New south Wales. 1989.
- **Mônico,J.F.G; Silva,E.F.: Controle de Qualidade em Levantamentos no contexto da Lei 10267.** In: III Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas. Curitiba: UFPR. Anais em CD. 15p. 2003.
- **Mônico,J.F.G.: Posicionamento pelo NAVSTAR – GPS: Descrição, Fundamentos e Aplicações.** São Paulo: Editora UNESP, 2002.
- **Luna,R.M.R.: Georreferenciamento e determinação de limites de imóveis em atendimento à lei 10267/01.** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. 2004.
- **Silva,D.C; Quirino,R.N; Júnior,C.B.S.: Comparação de Especificações e Normas de Levantamentos com GPS.** In: XXI Congresso Brasileiro de Cartografia. Rio de Janeiro: SBC. Anais em CD. 10p. 2003 (a).
- **Silva,D.C; Botelho,F.J; Carvalho,P.R.C.: Ajustamento de poligonais levantadas com GPS.** In: XXI Congresso Brasileiro de Cartografia. Rio de Janeiro: SBC. Anais em CD. 7p. 2003 (b).
- **USDA e USDI(2001): Standards and Guideliness for Cadastral Surveys using Global Positioning System Methods Version 1.0.** Washington: United States Department of Agriculture- Forest Service, United States of the Interior - Bureau of Land Management. 2001
- **Wolf,P.R; Ghilani,C.D.: Adjustment Computations Statistic and Least Squares in Surveyins and GIS.** New York: John Wiley & Sons. 564 p. 1997.