

ESTUDOS INICIAIS SOBRE A INCERTEZA POSICIONAL DOS VÉRTICES DE IMÓVEIS URBANOS A LUZ DO SINTER

Initial studies on the positional uncertainties of Brazilian urban properties landmarks in the light of SINTER

Ivandro Klein

Instituto Federal de Santa Catarina

Departamento Acadêmico de Construção Civil, Curso Técnico de Agrimensura
Avenida Mauro Ramos, 950, Centro, Florianópolis-SC
ivandro.klein@ifsc.edu.br

Arthur Peixoto Berbert Lima

Instituto Federal de Santa Catarina

Departamento Acadêmico de Construção Civil, Curso Técnico de Agrimensura
Avenida Mauro Ramos, 950, Centro, Florianópolis-SC
arthur.berbet@ifsc.edu.br

Resumo:

Este trabalho apresenta os estudos iniciais sobre a incerteza posicional dos vértices de imóveis urbanos a luz do SINTER. No estudo realizado, considerou-se a propagação de erros a partir de vértices da RRCM até os vértices do imóvel urbano, utilizando o transporte de coordenadas por meio de poligonação com estação total e seguindo as recomendações das novas versões das normas técnicas NBR13133 e NBR14166. Por meio dos diversos experimentos realizados, alterando a precisão nominal do equipamento, a distância de visada e o desvio-padrão dos vértices da RRCM, verificou-se que boa parte dos casos excederam os critérios de tolerância estabelecidos pelo documento CONFEA (2018). Isto pode ser explicado pelo fato dos critérios estarem relacionados ao desvio-padrão tridimensional ao invés do desvio-padrão horizontal; especialmente quando o valor de tolerância adotado é de 70 mm ao invés de 80 mm. As principais conclusões obtidas, com base nestes resultados, apontam para: 1) a adoção de critérios independentes para os desvios-padrões horizontal e vertical dos vértices de imóveis urbanos, e para: 2) o valor de tolerância para o desvio-padrão horizontal dos vértices de imóveis urbanos deve ser de pelo menos 80 mm.

Palavras-chave: incerteza posicional; propagação de erros; imóveis urbanos; georreferenciamento.

Abstract

This work presents the initial studies on the positional uncertainty of Brazilian urban properties landmarks in the light of SINTER. In the study, we considered the error propagation from geodetic marks of the reference network to the urban property landmarks, by means of traverse surveys with total station and following the recommendations of the new versions of technical standards NBR13133 and NBR14166. Considering the amount of experiments carried out, changing the nominal accuracy of the instrument, the sight distance and the standard deviation of the geodetic marks, it was verified that a large number of cases exceeded the established tolerance criteria given by the document CONFEA (2018). This can be explained by the fact that the tolerance criteria are related to the three-dimensional standard deviation instead of the horizontal standard deviation; especially when the threshold value is 70 mm instead of 80 mm. The main conclusions obtained, based on these results, point to: 1) the definition of independent threshold values for the horizontal and vertical standard deviations of the urban properties landmarks, and for: 2) the threshold value for the horizontal standard deviation of the urban properties landmarks must be at least 80 mm.

Keywords: positional uncertainty; error propagation; urban properties; georeferencing.

1. INTRODUÇÃO

Recentemente, o Decreto N° 8.764 de 10 de Maio de 2016 (BRASIL, 2016) instituiu o Sistema Nacional de Gestão de Informações Territoriais (SINTER). O Artigo 9 do Decreto estabelece que as informações cadastrais e geoespaciais serão integradas em níveis gráficos de mapeamento georreferenciado (camadas), embasadas no levantamento dos limites das parcelas cadastrais (como por exemplo, nos vértices de divisa dos imóveis urbanos). Além disso, o Projeto de Lei 3.876/2015, que atualmente tramita no Congresso Nacional, estabelece normas para a elaboração do cadastro territorial dos municípios, sendo que a identificação geométrica das parcelas territoriais, como os imóveis rurais e urbanos, deve ser vinculada ao Sistema Geodésico Brasileiro (SGB).

Neste sentido, foi disponibilizado o documento “Normas e procedimentos de Engenharia para cadastro urbano no Brasil” pelo Grupo de Trabalho Técnico para elaborar o Manual de Engenharia para o Cadastro Rural e Urbano do Brasil, instituído pelo CONFEA (Processo nº CF-2374/2017). Além disso, a norma técnica da ABNT, NBR14166, que estabelece os procedimentos para a Rede de Referência Cadastral Municipal (RRCM), passou por um processo de atualização, uma vez que a primeira versão é de 1998, anterior até mesmo ao SIRGAS2000, atual referencial do SGB. Por fim, a norma técnica da ABNT, NBR13133, que estabelece os procedimentos para levantamentos topográficos, também passou por um processo de atualização, sendo a nova versão preliminar disponibilizada para consulta pública no ano de 2015.

Nestes documentos normativos, constam diversas especificações técnicas sobre a execução das medições e sobre a incerteza posicional dos vértices, sejam estes os vértices de apoio da RRCM (NBR14166) ou os vértices de divisa do imóvel (CONFEA, 2018).

Dentro deste contexto, o objetivo deste trabalho é apresentar os primeiros estudos referentes à incerteza posicional dos vértices de imóveis urbanos, considerando: 1) as especificações técnicas que constam nos documentos supracitados; 2) as especificações técnicas de equipamentos atualmente disponíveis no mercado e 3) seguindo a metodologia de propagação de erros (incertezas) usualmente adotada na literatura. Com base nos diversos experimentos realizados e seus resultados, algumas considerações são apresentadas a respeito destas questões.

2. PROPAGAÇÃO DE ERROS NO TRANSPORTE DE COORDENADAS

Uma vez que o ambiente urbano em geral não é propício para o posicionamento por satélites de alta precisão, em função do erro de multicaminho e do bloqueio dos sinais pelas edificações (DEAMBROGIO; JULIEN, 2013), especialmente se for considerado o caso de vértices de divisa situados em muros e edificações, neste trabalho, será considerada a propagação de erros a partir dos vértices da RRCM até os vértices de divisa do imóvel urbano, por meio do transporte de coordenadas utilizando estação total (Figura 1).

Portanto, o posicionamento por satélites está fora do escopo deste trabalho, embora possa ser empregado na determinação dos vértices da RRCM em locais propícios para o rastreamento dos satélites, locais estes em geral restritos no caso de ambiente urbanos.

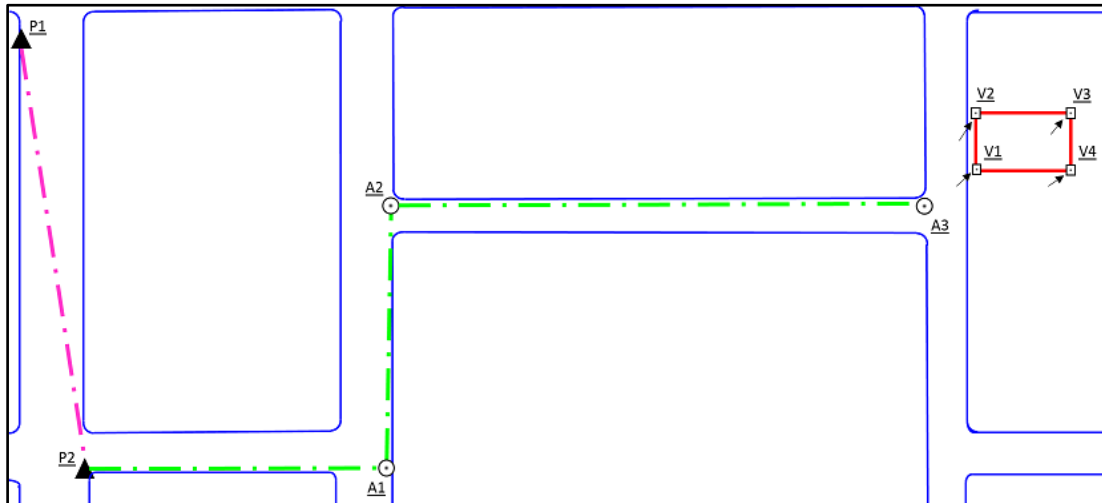


Figura 1 – Transporte de coordenadas por poligonização para o levantamento de vértices de um imóvel urbano.

O formulário para a obtenção das coordenadas planimétricas (X, Y) de um ponto visado (PV), a partir de um ponto de estação pré-determinado (X_0, Y_0) , é bastante conhecido na literatura:

$$X = X_0 + DH \sin Az, Y = Y_0 + DH \cos Az \quad (1)$$

onde DH é a distância horizontal entre os pontos e Az é o azimute do alinhamento do ponto de estação ao novo ponto a ser determinado (PV). Pela lei de propagação de variâncias e covariâncias (ver GEMAEL, 1994), os desvios-padrões das coordenadas X, Y do PV são dados pelas seguintes expressões:

$$\sigma_X = \pm \sqrt{\sigma_{X_0}^2 + \sin^2 Az \sigma_{DH}^2 + (DH \cos Az)^2 \left(\sigma_{Az} \cdot \frac{\pi}{648.000} \right)^2} \quad (2)$$

$$\sigma_Y = \pm \sqrt{\sigma_{Y_0}^2 + \cos^2 Az \sigma_{DH}^2 + (DH \sin Az)^2 \left(\sigma_{Az} \cdot \frac{\pi}{648.000} \right)^2} \quad (3)$$

onde nas Expressões (2) e (3) e nas demais que serão apresentadas, σ_i corresponde ao desvio-padrão da respectiva grandeza i . Note que o desvio-padrão do azimute (σ_{Az}) está expresso em segundos de arco, sendo que o termo $\pi / 648.000$ realiza a necessária conversão para radianos.

Uma vez que o ponto de estação (X_0, Y_0) é pré-determinado, os valores de σ_{X_0} e σ_{Y_0} são conhecidos. Os demais valores são obtidos em função da precisão nominal do equipamento utilizado e de diversas outras fontes de erros que serão apresentadas a seguir.

Para a distância horizontal (DH), obtida em função da distância inclinada (DI) e do ângulo zenital (Z) medidos do ponto de estação ao PV ($DH = DI \sin Z$), o desvio-padrão resultante é dado por:

$$\sigma_{DH} = \pm \sqrt{\text{sen}^2 Z \sigma_{DI}^2 + (DI \cos Z)^2 \left(\sigma_Z \cdot \frac{\pi}{648000} \right)^2} \quad (4)$$

sendo que o desvio-padrão da distância inclinada (DI), presente na Equação (4), é dado por:

$$\sigma_{DI} = \pm \sqrt{\varepsilon_i^2 + \varepsilon_r^2 + \frac{PN_{lin}^2}{n}} \quad (5)$$

onde na Expressão (5), ε_i e ε_r correspondem, respectivamente, ao erro de centragem do instrumento e do prisma refletor, PN_{lin} corresponde a precisão nominal linear do instrumento e n corresponde ao número total de leituras realizadas.

Atualmente, poucos equipamentos apresentam precisão nominal linear melhor do que $\pm (1 \text{ mm} + 1 \text{ ppm})$ ou pior do que $\pm (2 \text{ mm} + 2 \text{ ppm})$ no modo de medição com prisma. Quanto ao erro de centragem do instrumento, este é da ordem de $\varepsilon_i = 1,5 \text{ mm}$ para um instrumento com altura da ordem de 1,5 m sobre o vértice (LEICA, 2016), valor este bastante usual na prática.

O erro de centragem do prisma refletor é dado por $\varepsilon_r = A_s \text{ sen } (\alpha)$, onde A_s corresponde à altura do prisma refletor em relação ao ponto topográfico e α corresponde ao erro angular de nivelamento do prisma refletor. Este ângulo pode ser dado por: $\alpha = 0,2 \sigma_{sens}$ (FERREIRA; CHAVES, 2017), onde σ_{sens} corresponde à sensibilidade da bolha de nível. O valor de σ_{sens} varia entre 30' e 60' para bolhas circulares, sendo que usualmente $\sigma_{sens} = 40'$; e entre 20'' e 30'' para bolhas tubulares, no caso do emprego de base nivelante para a instalação do prisma refletor.

Note que para um valor usual de $A_s = 1,5 \text{ m}$, o erro de centragem do prisma refletor apoiado em um bastão resulta em $\varepsilon_r = 1500 \text{ sen } (0,2 \cdot 40') = 3,5 \text{ mm}$. Logo, sempre que possível, deve-se realizar o ajuste fino horizontal da leitura o mais próximo possível do ponto topográfico.

Quanto ao desvio-padrão do ângulo zenital (Z), também presente na Equação (4), este é dado por:

$$\sigma_Z = \pm \sqrt{\frac{2}{n} (2 \cdot PN_{ang}^2 + \sigma_{comp}^2)} \quad (6)$$

onde na Expressão (6), PN_{ang} corresponde a precisão nominal angular e σ_{comp} corresponde a precisão do compensador vertical do instrumento. Atualmente, poucos equipamentos apresentam precisão nominal angular melhor do que $\pm 1''$ ou pior do que $\pm 5''$; enquanto a precisão do compensador vertical, para o caso de instrumentos com duplo compensador, geralmente se situa entre $\pm 0,5''$ e $\pm 2''$.

O azimute do alinhamento corresponde ao azimute inicial do ponto de estação ao vértice de ré ("azimute da ré" - $A_{z_{ré}}$), somado ao ângulo irradiado (I) entre a direção horizontal da ré e a direção horizontal do PV ($A_z = A_{z_{ré}} + I$, ver a Figura 2). Desta forma, o desvio-padrão do azimute do ponto de estação ao PV é dado por:

$$\sigma_{AZ} = \pm \sqrt{\sigma_{AZ_{ré}}^2 + \sigma_I^2} \quad (7)$$

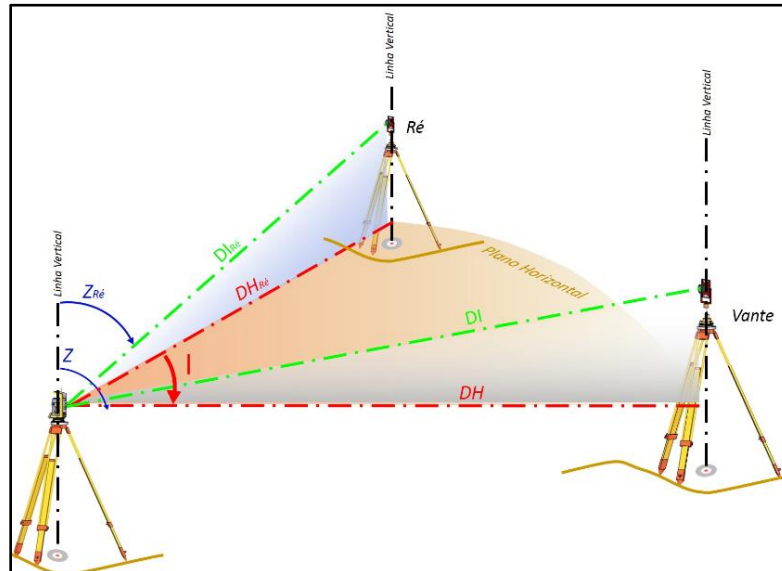


Figura 2 – Observações envolvidas no levantamento planimétrico (horizontal) com estação total.

Na Expressão (7), o desvio-padrão do azimute da ré, em segundos de arco, é obtido em função do desvio-padrão das coordenadas do ponto de estação (X_0 , Y_0) e do vértice de ré ($X_{RÉ}$, $Y_{RÉ}$), sendo dado por:

$$\sigma_{AZ_{RÉ}} = \pm \left[\sqrt{\left(\frac{Y_0 - Y_{RÉ}}{DH_{RÉ}^2}\right)^2 (\sigma_{X_0}^2 + \sigma_{X_{RÉ}}^2) + \left(\frac{X_0 - X_{RÉ}}{DH_{RÉ}^2}\right)^2 (\sigma_{Y_0}^2 + \sigma_{Y_{RÉ}}^2)} \right] \cdot \left(\frac{648.000}{\pi}\right) \quad (8)$$

onde $DH_{RÉ}$ é a distância horizontal do ponto de estação ao vértice de ré, dada por:

$$DH_{RÉ} = \sqrt{(X_0 - X_{RÉ})^2 + (Y_0 - Y_{RÉ})^2} \quad (9)$$

O ângulo irradiado na Expressão (7) é a diferença entre a direção horizontal lida no vértice de vante (PV) menos a direção horizontal lida no vértice de ré ($I = HZ_{PV} - HZ_{RÉ}$). Assumindo que as direções horizontais (HZ_{PV} e $HZ_{RÉ}$) possuem o mesmo desvio-padrão, em função da precisão nominal angular do instrumento (PN_{ang}), o desvio-padrão do ângulo irradiado se torna:

$$\sigma_I = \pm \sqrt{\left(\frac{8}{n}\right) \cdot PN_{ang}^2 + \frac{\sigma_n^2}{n} + \sigma_c^2} \quad (10)$$

onde σ_n corresponde ao erro na leitura do ângulo horizontal em função do erro de nivelamento do instrumento; e σ_c corresponde ao erro angular de centragem resultante na ocupação do ponto de estação, do vértice de ré e do PV (ver a Figura 3). O termo $(8/n)$ na Expressão (10) resulta do erro de pontaria/leitura em cada uma das direções horizontais (a ré e a vante) no valor do ângulo irradiado (mais detalhes em GHILANI, WOLF; 2006).

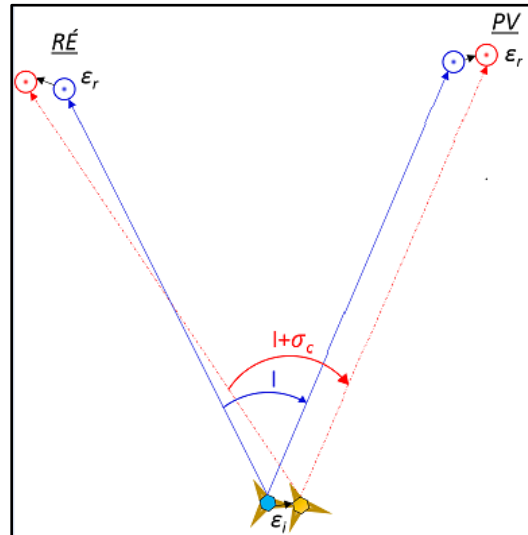


Figura 3 – Erros de centragem linear (ε_i , ε_r) e o erro resultante angular (σ_c) no levantamento com estação total.

Sobre o efeito do erro de nivelamento do instrumento na leitura do ângulo horizontal irradiado, este pode ser obtido por meio da seguinte expressão:

$$\sigma_n = \pm \sqrt{\sigma_{comp}^2 \cdot (\cot^2 Z_{R\acute{E}} + \cot^2 Z)} \quad (11)$$

Na Expressão (11), para o caso de estações totais sem compensador ou de compensador simples, σ_{comp} deve ser substituído por $0,2 \sigma_{sens}$, onde σ_{sens} corresponde à sensibilidade da bolha de nível, valor este que varia entre $20''$ e $30''$ para a bolha tubular da base nivelante do instrumento. Finalmente, o erro angular de centragem, em segundos de arco, é dado por:

$$\sigma_c = \pm \sqrt{\left[\left(\frac{\varepsilon_r}{DH_{R\acute{E}} \cdot DH} \right)^2 (DH_{R\acute{E}}^2 + DH^2) + \left(\frac{\varepsilon_i}{DH_{R\acute{E}} \cdot DH} \right)^2 \left(\frac{DH_{PV_{R\acute{E}}}^2}{2} \right) \right] \cdot \left(\frac{648.000}{\pi} \right)} \quad (12)$$

onde na Expressão (12), $DH_{PV_{R\acute{E}}}$ corresponde a distância horizontal entre o PV e o vértice de ré, que pode ser obtida, por exemplo, por meio da lei dos cossenos utilizando os valores de DH , $DH_{R\acute{E}}$ e I , resultando na seguinte expressão:

$$DH_{PV_{R\acute{E}}} = \sqrt{DH_{R\acute{E}}^2 + DH^2 - 2 \cdot DH_{R\acute{E}} \cdot DH \cdot \cos(360^\circ \pm I)} \quad (13)$$

onde na Expressão (13), utiliza-se $\cos(360^\circ + I) = \cos(I)$ se $I \leq 180^\circ$, ou $\cos(360^\circ - I)$ se $I > 180^\circ$. Note que os erros de centragem nas Expressões (5) e (10) não são reduzidos aumentando o número de leituras (n), a menos que os pontos fossem re-ocupados em cada medição, o que não é usual na prática.

Uma vez obtido o desvio-padrão das coordenadas X, Y do PV, o desvio-padrão horizontal resultante é dado por:

$$\sigma_{2D} = \pm \sqrt{\sigma_X^2 + \sigma_Y^2} = \pm \sqrt{\sigma_{X_0}^2 + \sigma_{Y_0}^2 + \sigma_{DH}^2 + DH^2 \left(\sigma_{Az} \cdot \frac{\pi}{648000} \right)^2} \quad (14)$$

Note que o desvio-padrão horizontal na Expressão (14) independe do valor do ângulo irradiado (I) ou do valor do azimute (Az), mas depende do valor da distância horizontal (DH).

Para o caso da coordenada altimétrica (h ou H), no nivelamento trigonométrico com estação total a partir de um ponto de estação com altitude conhecida (h_0 ou H_0), a altitude do PV, considerando a correção devido à refração e curvatura da Terra, é dada por (ver a Figura 4):

$$h = h_0 + DN + C_{DN}, \quad DN = A_i + DI \cos Z - A_s, \quad C_{DN} = 6,75 \times 10^{-8} (DI \sin Z)^2 \quad (15)$$

onde DN corresponde ao desnível do ponto de estação ao PV, A_i corresponde a altura do instrumento (estação total), A_s corresponde a altura do prisma refletor ou sinal refletido no PV e C_{DN} corresponde a correção no desnível em função da refração atmosférica e curvatura terrestre.

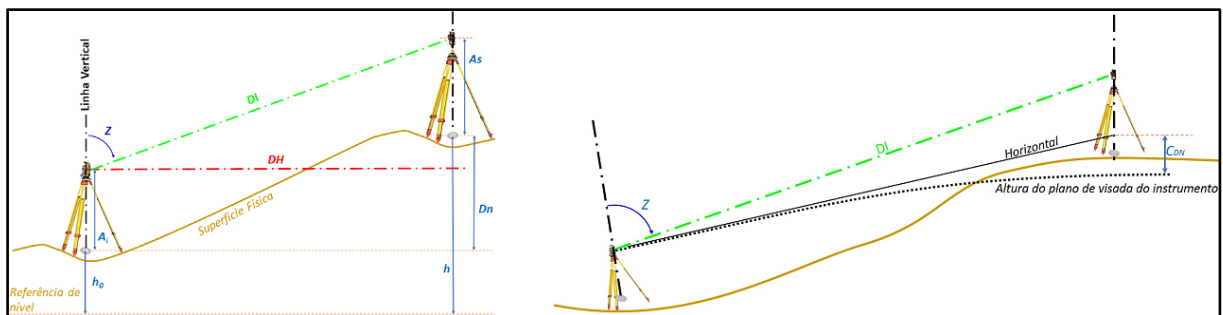


Figura 4 – Nivelamento trigonométrico com estação total e correção dos efeitos de refração e curvatura terrestre.

Pela propagação de erros, o desvio-padrão da coordenada altimétrica do PV é dado por:

$$\sigma_h = \pm \sqrt{\sigma_{h_0}^2 + \sigma_{DN}^2} \quad (16)$$

onde o desvio-padrão do desnível (DN) na Expressão (15) é dado por:

$$\sigma_{DN} = \pm \sqrt{\sigma_{A_i}^2 + \left(\cos Z + \frac{0,0675 \cdot DI \cdot \sin^2 Z}{500.000} \right)^2 \sigma_{DI}^2 + \left(\frac{0,0675 \cdot DI^2 \cdot \sin Z \cdot \cos Z}{500.000} - DI \sin Z \right)^2 \left(\sigma_Z \cdot \frac{\pi}{648.000} \right)^2 + \sigma_{A_s}^2} \quad (17)$$

Na expressão (17), pode-se assumir que os desvios-padrões na medição da altura do instrumento e do prisma refletor são dados por: $\sigma_{A_i} = \sigma_{A_s} = \pm 2 \text{ mm}$ (SCHOFIELD; BREACH, 2007). Uma vez obtido o desvio-padrão horizontal (ou planimétrico) e o desvio-padrão vertical (ou altimétrico), o desvio-padrão tridimensional (ou planialtimétrico) do novo ponto a ser determinado é dado por (ver a Figura 5):

$$\sigma_{3D} = \pm \sqrt{\sigma_X^2 + \sigma_Y^2 + \sigma_h^2} = \pm \sqrt{\sigma_{2D}^2 + \sigma_h^2} \quad (18)$$

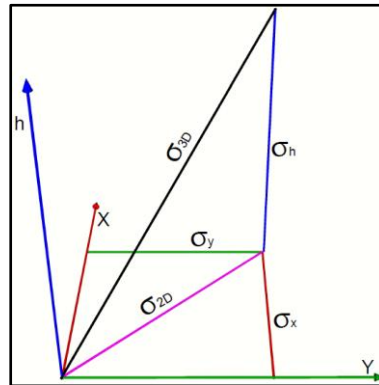


Figura 5 – Desvios-padrões das coordenadas (X, Y, h), e das resultantes horizontal (2D) e tridimensional (3D).

No transporte de coordenadas, após a determinação do PV (vante), este passa a ser o novo ponto de estação (X_0, Y_0, h_0); o ponto de estação anterior se torna o novo vértice de ré (X_{RE}, Y_{RE}); enquanto o próximo PV corresponde ao novo ponto a ser determinado (X, Y, h).

É importante mencionar que fontes de erros sistemáticos, como efeitos de temperatura, pressão atmosférica e constante do prisma refletor devem ser devidamente tratados, e que, no caso do transporte de coordenadas georreferenciadas com estação total, o profissional deve estar atento a questões como o fator de deformação das medições (ver FRANÇA et al., 2016).

3. REFERÊNCIAS NORMATIVAS

Referente aos vértices da RRCM, a NBR14166 estabelece que o desvio-padrão horizontal de cada vértice deve ser de $|\sigma_{2D}| \leq 50 \text{ mm}$ e o desvio-padrão da altitude geométrica ou elipsoidal de cada vértice deve ser de $|\sigma_h| \leq 50 \text{ mm}$. Além disso, nenhum imóvel deve apresentar distância superior a 500 m em relação a um vértice da RRCM ou marco do SGB. Os vértices da RRCM são classificados em 1) superiores: determinados em relação a marcos do SGB; 2) principais: determinados em relação a vértices superiores; ou 3) de apoio: determinados em relação a vértices principais ou de apoio pré-existent. Por fim, cada vértice principal ou de apoio da RRCM deve ser intervisível a outro vértice, distante entre 100 m e 200 m deste.

Se for adotado o método da poligonização no transporte de coordenadas, a NBR14166 afirma que se devem seguir as recomendações da NBR13133. Na referida norma, a distância entre os vértices da poligonal deve ser de pelo menos 100 m, e as medições devem ser realizadas por no mínimo uma série de leituras conjugadas na posição direta e inversa da luneta.

Para o desvio-padrão posicional dos vértices do imóvel, a proposta elaborada pelo Grupo de Trabalho Técnico para elaborar o Manual de Engenharia para o Cadastro Rural e Urbano do Brasil, instituído pelo CONFEA, é resumida na Tabela 1:

Tabela 1 – Desvio-padrão máximo para cada tipo de vértice de imóvel urbano (Adaptado de CONFEA, 2018).

Classe	Desvio-padrão tridimensional (em mm)
1 – Regiões com alto valor e alta densidade de parcelas	70
1a – Vértices virtuais na classe 1	103
2 – Regiões com alto valor e baixa densidade de parcelas	70
2a – Vértices virtuais na classe 2	103
3 – Regiões com baixo valor e baixa densidade de parcelas	80
3a – Vértices virtuais na classe 3	120
4 – Para regularização fundiária de comunidades	80
4a – Vértices virtuais na classe 4	120

Analisando a Tabela 1, nota-se que o desvio-padrão posicional é definido para a resultante tridimensional (σ_{3D}), isto é, considerando o desvio-padrão das coordenadas planimétricas (X, Y) e da coordenada altimétrica (no referido documento, considera-se a altitude geométrica ou elipsoidal – h). O caso dos vértices virtuais, que não são obtidos diretamente por medições de campo, foge do escopo deste trabalho.

De forma resumida, o transporte de coordenadas, partindo de vértices da RRCM, vinculados ao SGB, até o vértice de divisa do imóvel urbano, não deve apresentar desvio-padrão tridimensional (σ_{3D}) superior aos valores constantes na Tabela 1. Sobre a precisão nominal (PN) dos equipamentos, a PN angular é o desvio-padrão relativo a um par de leituras da direção angular na posição direta e inversa da luneta (ISO17123-3, 2001); enquanto a PN linear é o desvio-padrão relativo a uma única medição de distância (ISO17123-4, 2012). É importante destacar que o formulário apresentado na seção anterior foi desenvolvido considerando estas questões, sendo necessário apenas informar o número total de leituras (n) nas equações correspondentes. Por exemplo, para uma série de leituras conjugadas, $n = 2$, enquanto que para uma visada única, $n = 1$ nas Expressões (5), (6) e (10).

Encerrando esta seção, cabe aqui citar os estudos de Luz (2013), que encontrou um valor limite para o desvio-padrão horizontal dos vértices de $|\sigma_{2D}| = 81$ mm, considerando alguns aspectos dos imóveis urbanos no Brasil. Supõe-se que este estudo serviu de base para a elaboração da Tabela 1, embora a inclusão do desvio-padrão da coordenada altimétrica, isto é, consideração de σ_{3D} ao invés de σ_{2D} , não tenha sido justificada no documento CONFEA (2018).

4. DESCRIÇÃO DOS EXPERIMENTOS REALIZADOS

Os experimentos realizados envolvem diversas simulações, visando abranger grande parte dos casos passíveis de ocorrerem na prática. Quanto ao desvio-padrão posicional dos vértices de partida da RRCM (ponto de estação inicial e vértice de ré), considerando que o posicionamento por satélites, em geral, fornece melhores resultados em planimetria do que em altimetria (SILVEIRA, 2008), se considerou três cenários: 1) $\sigma_h = 2 \sigma_{2D}$; 2) $\sigma_h = 1,5 \sigma_{2D}$; e 3) $\sigma_h = \sigma_{2D}$.

Considerando ainda a propagação de erros na determinação dos vértices da RRCM, que, em geral, serão vértices principais ou de apoio, cinco casos distintos de precisões para os vértices de partida da RRCM foram estabelecidos para cada cenário, conforme apresenta a Tabela 2.

Tabela 2 – Desvios-padrões vertical (σ_h) e horizontal (σ_{2D}) dos vértices de partida da RRCM em cada caso e cenário.

Caso	Cenários 1, 2, 3: σ_h (mm)	Cenário 1: σ_{2D} (mm)	Cenário 2: σ_{2D} (mm)	Cenário 3: σ_{2D} (mm)
1	10	5	8	10
2	20	10	15	20
3	30	15	23	30
4	40	20	30	40
5	50	25	38	50

Quanto à distância entre os pontos de estação no transporte de coordenadas até o imóvel, como esta depende da inclinação do terreno e das condições de intervisibilidade (dentre outros fatores), foram consideradas três tipos de situações:

- Visadas de 225 m em terreno plano (com dois pontos de estação auxiliares)
- Visadas de 150 m em inclinação de 10° (com três pontos de estação auxiliares)
- Visadas de 112,5 m em inclinação de 20° (com quatro pontos de estação auxiliares)

Em todas as três situações, foram assumidas distâncias de 150 m entre o ponto de estação inicial e o vértice de ré da RRCM (isto é, valor intermediário para a recomendação entre 100 m e 200 m constante na NBR14166); visadas de 50 m do último ponto de estação aos vértices do imóvel; e uma série de leituras conjugadas na posição direta e inversa da luneta para cada ponto de estação, isto é, $n = 2$ no cálculo das Expressões (5), (6) e (10).

Finalmente, quanto aos desvios-padrões do equipamento, considerando a maioria das estações totais atualmente disponíveis no mercado, foram considerados três casos:

- Equipamento 1: PN linear = $\pm (1 \text{ mm} + 1 \text{ ppm})$; PN angular = $\pm 1''$ e $\sigma_{comp} = \pm 0,5''$
- Equipamento 2: PN linear = $\pm (2 \text{ mm} + 2 \text{ ppm})$; PN angular = $\pm 2''$ e $\sigma_{comp} = \pm 1''$
- Equipamento 3: PN linear = $\pm (2 \text{ mm} + 2 \text{ ppm})$; PN angular = $\pm 5''$ e $\sigma_{comp} = \pm 1,5''$

Demais especificações foram assumidas constantes para todos os instrumentos: erros de centragem para o instrumento e para o prisma refletor de $\varepsilon_i = \varepsilon_r = 1,5 \text{ mm}$ e desvios-padrões da altura do instrumento e do prisma refletor de $\sigma_{A_i} = \sigma_{A_s} = \pm 2 \text{ mm}$.

5. RESULTADOS OBTIDOS

As Figuras 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13 e 14 apresentam os resultados obtidos para os diversos experimentos simulados, combinando os cenários: Cenário 1 (Figuras 6, 7, 8), Cenário 2 (Figuras 9, 10, 11), Cenário 3 (Figuras 12, 13, 14) com os equipamentos: Equipamento 1 (Figuras 6, 9, 12), Equipamento 2 (Figuras 7, 10, 13) e Equipamento 3 (Figuras 8, 13, 14).

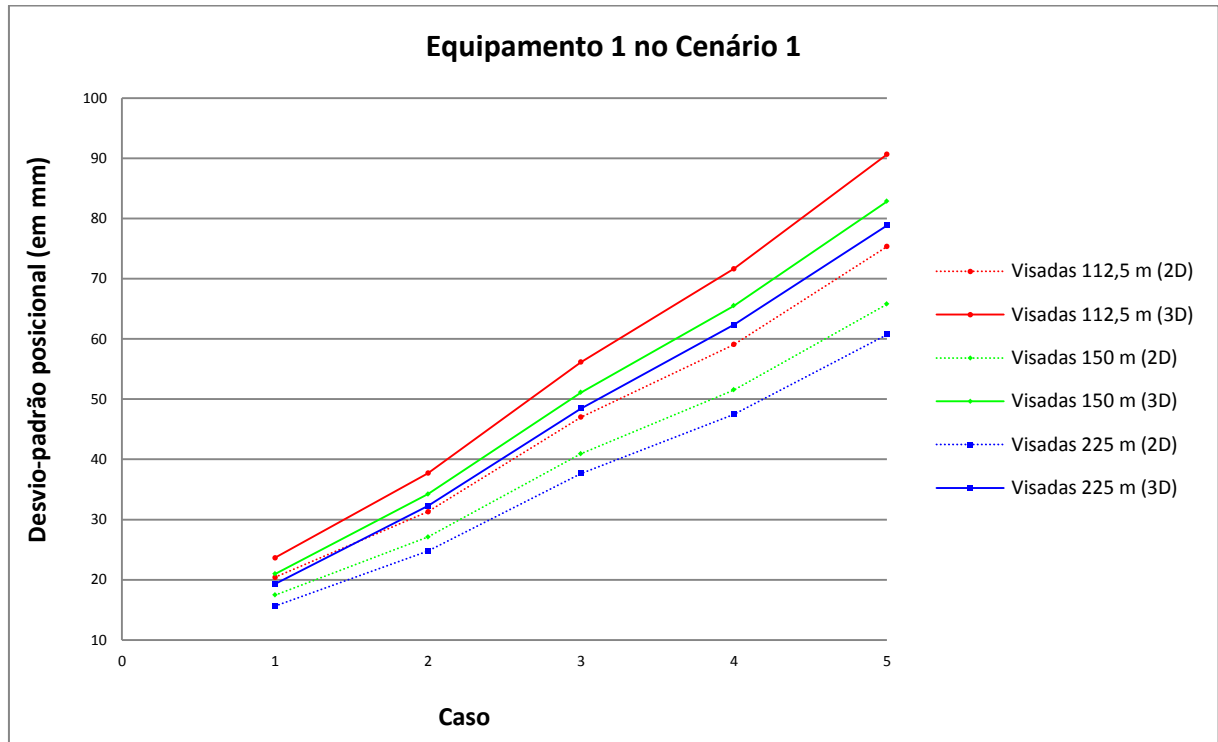


Figura 6 – Desvio-padrão em mm (2D e 3D) do vértice do imóvel nos Casos 1 – 5 (Equipamento 1 e Cenário 1).

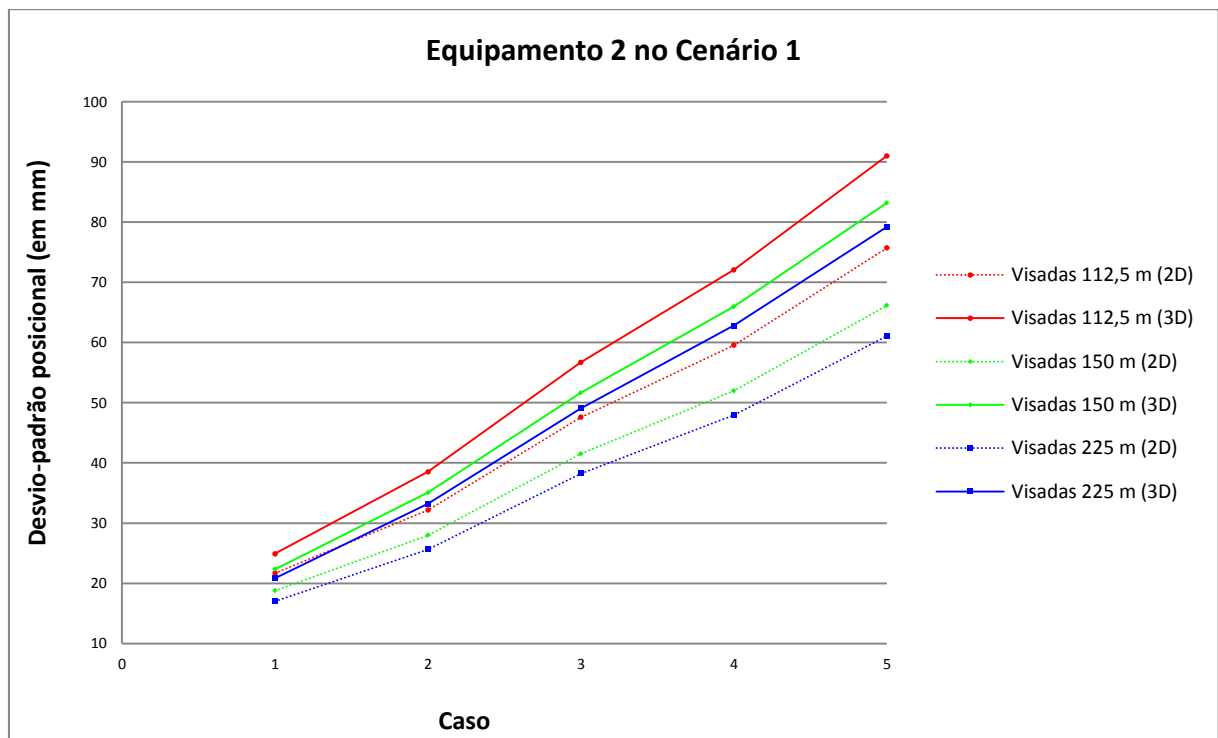


Figura 7 – Desvio-padrão em mm (2D e 3D) do vértice do imóvel nos Casos 1 – 5 (Equipamento 2 e Cenário 1).

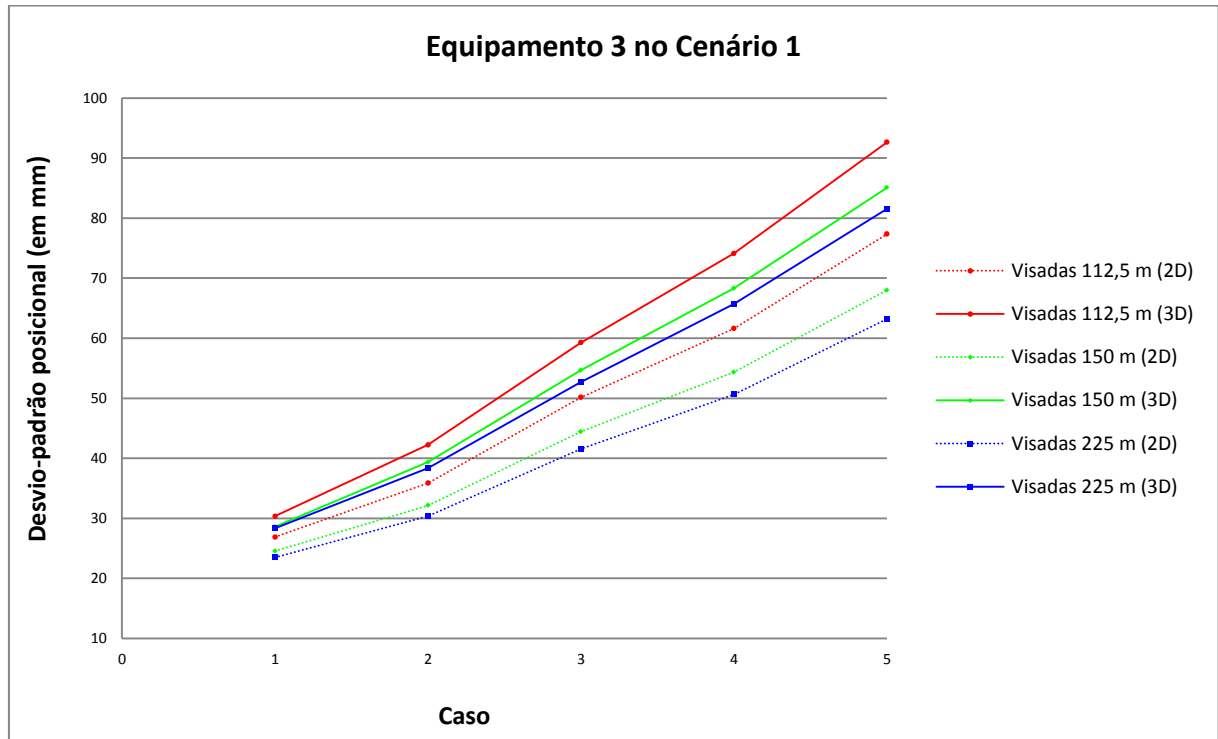


Figura 8 – Desvio-padrão em mm (2D e 3D) do vértice do imóvel nos Casos 1 – 5 (Equipamento 3 e Cenário 1).

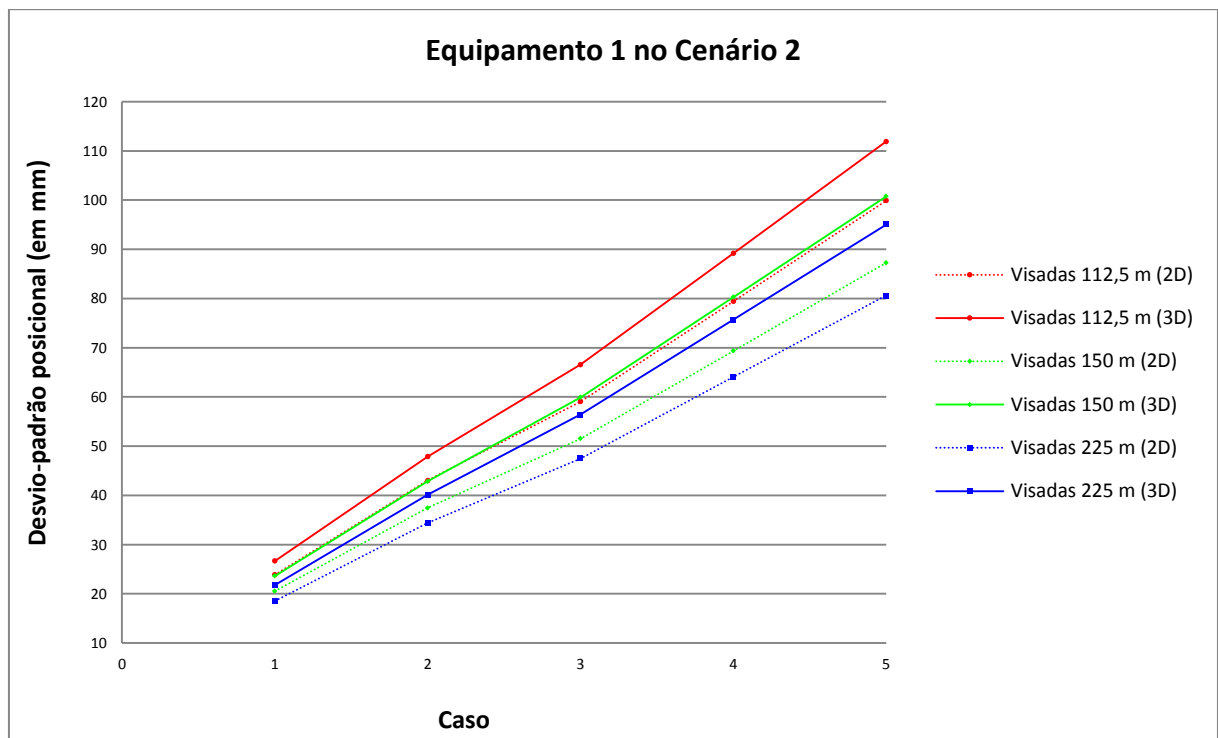


Figura 9 – Desvio-padrão em mm (2D e 3D) do vértice do imóvel nos Casos 1 – 5 (Equipamento 1 e Cenário 2).

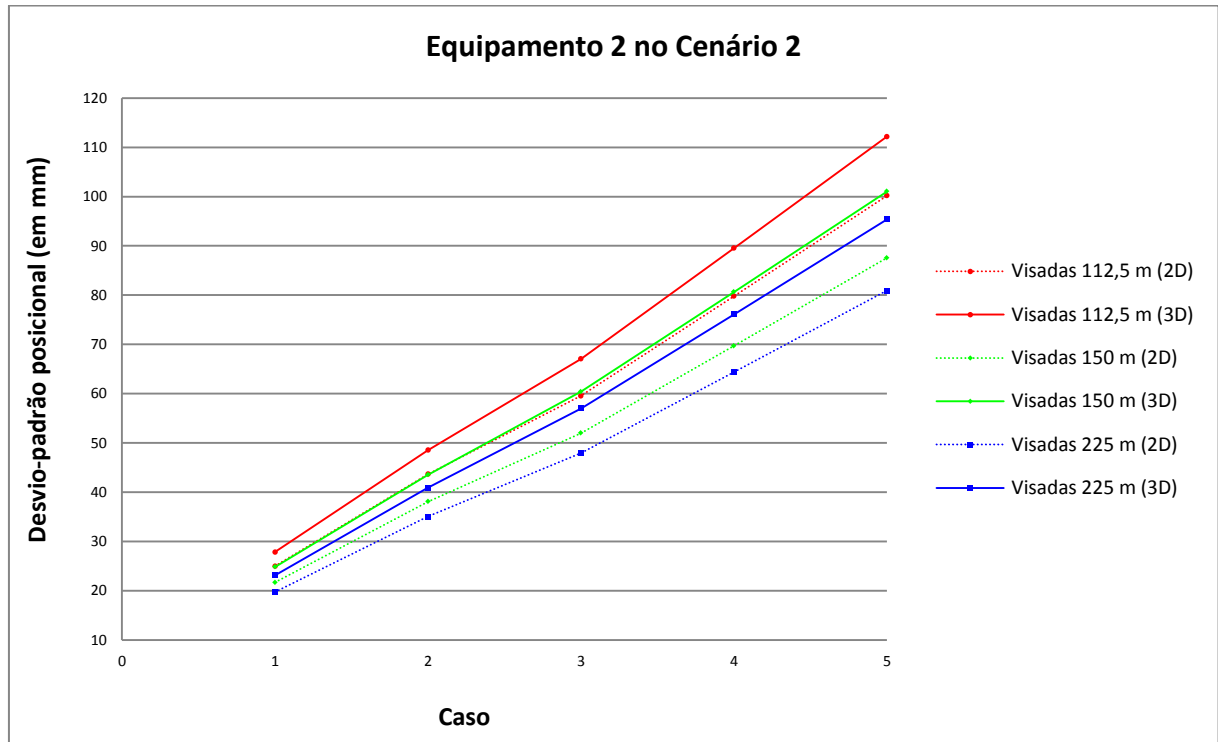


Figura 10 – Desvio-padrão em mm (2D e 3D) do vértice do imóvel nos Casos 1 – 5 (Equipamento 2 e Cenário 2).

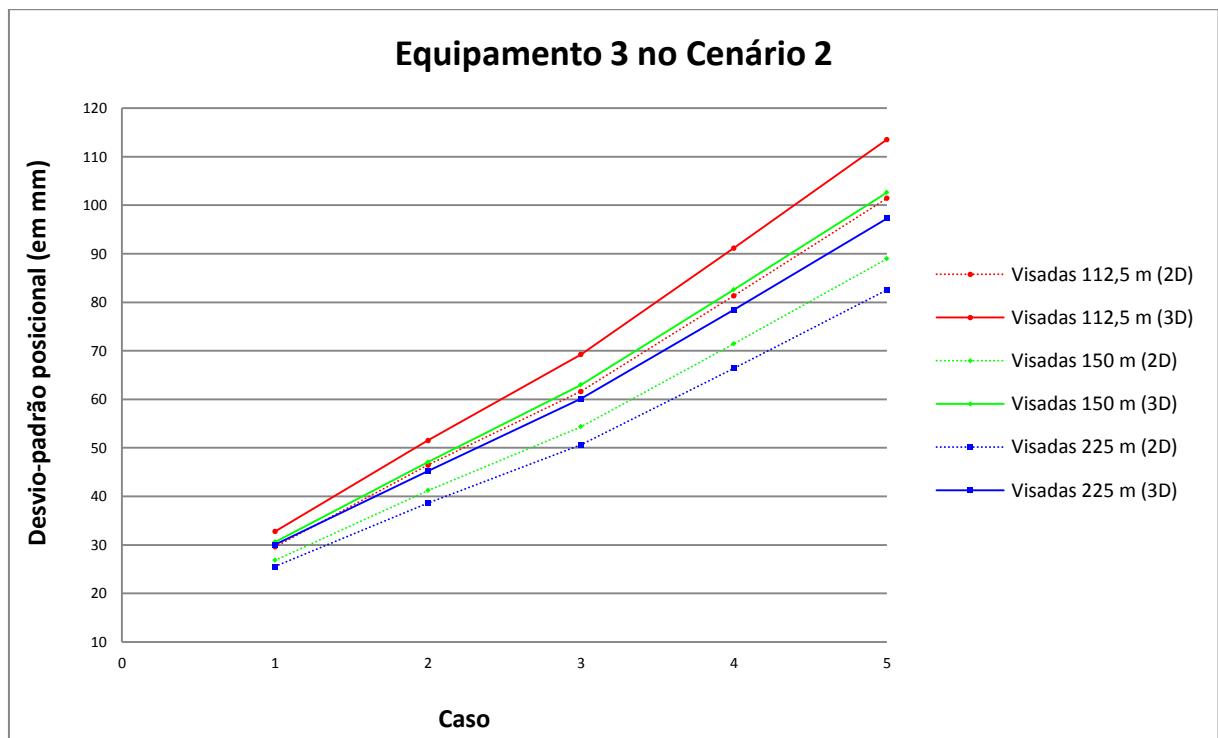


Figura 11 – Desvio-padrão em mm (2D e 3D) do vértice do imóvel nos Casos 1 – 5 (Equipamento 3 e Cenário 2).

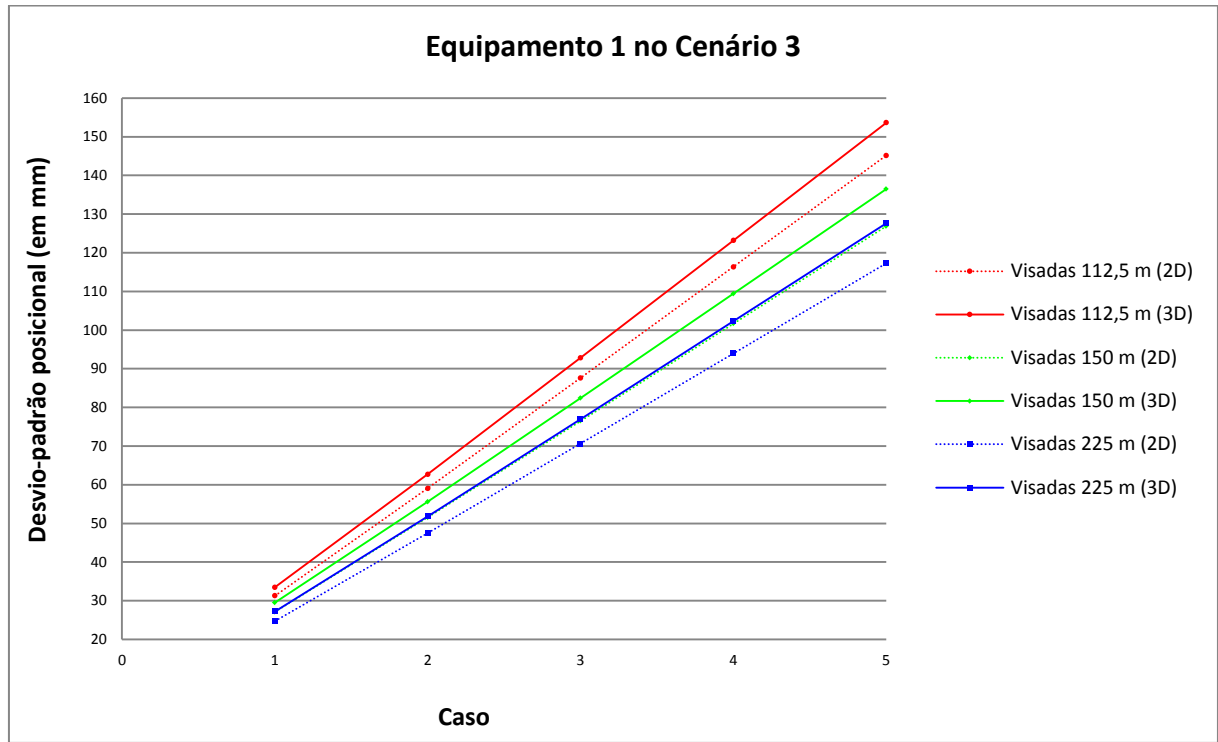


Figura 12 – Desvio-padrão em mm (2D e 3D) do vértice do imóvel nos Casos 1 – 5 (Equipamento 1 e Cenário 3).

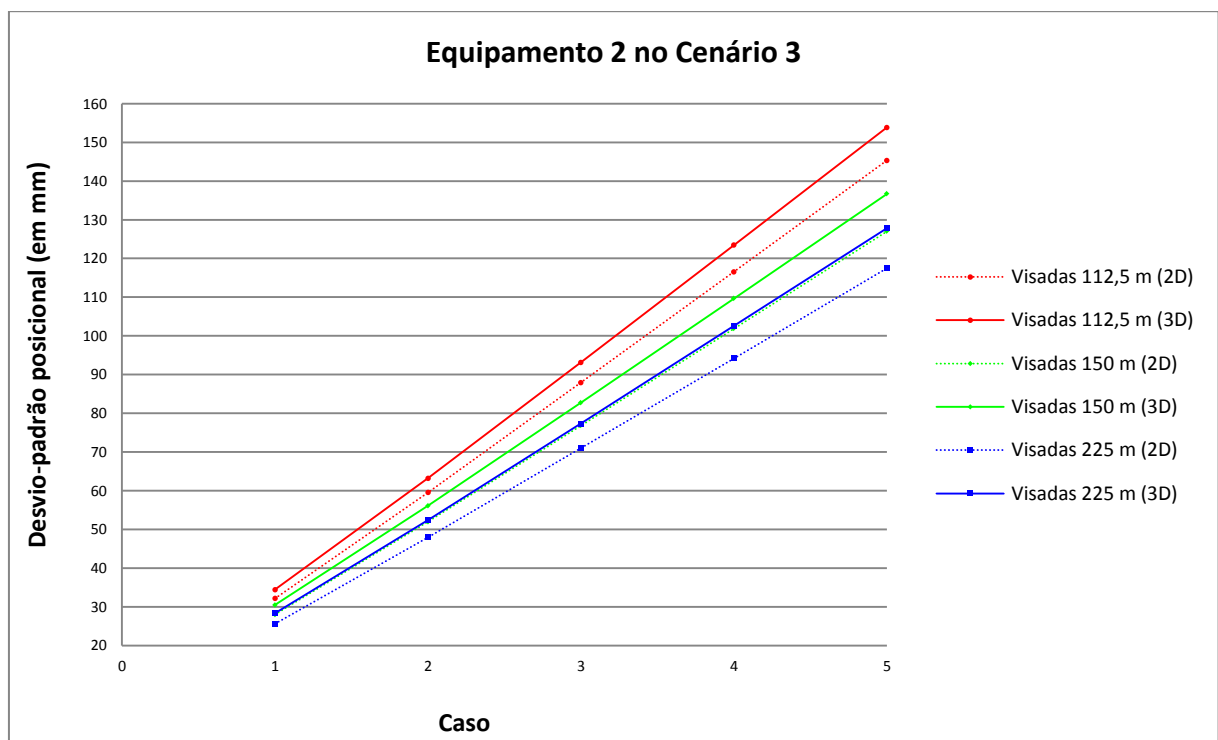


Figura 13 – Desvio-padrão em mm (2D e 3D) do vértice do imóvel nos Casos 1 – 5 (Equipamento 2 e Cenário 3).

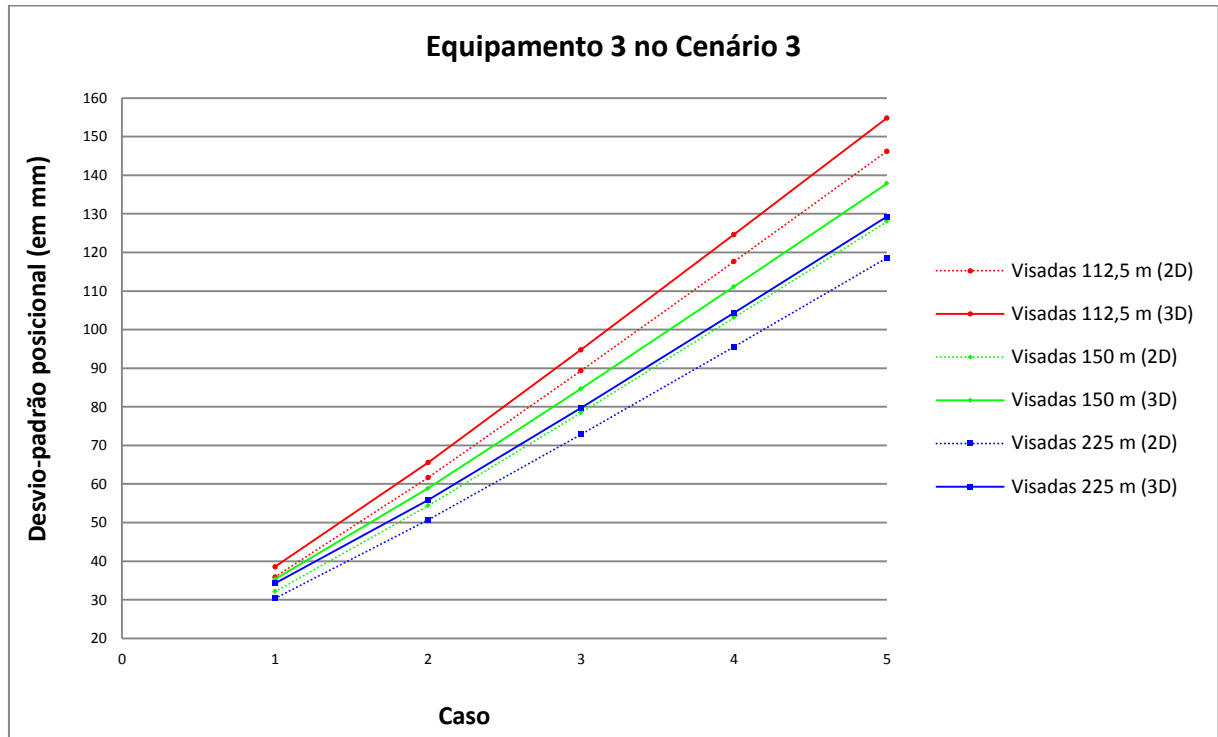


Figura 14 – Desvio-padrão em mm (2D e 3D) do vértice do imóvel nos Casos 1 – 5 (Equipamento 3 e Cenário 3).

Ao todo, são apresentados $(3 \times 3 \times 5 \times 3 \times 2) = 270$ resultados nas Figuras 6 – 14. Desta forma, um resumo de todos os resultados obtidos é apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 – Resumo dos resultados obtidos nos diversos experimentos realizados (valores em mm).

	Desvio-padrão posicional	Média – Equipamento 1	Média - Equipamento 2	Média - Equipamento 3	Média – Todos os equipamentos
Cenário 1	σ_{2D}	41	42	46	43
	σ_{3D}	52	52	56	53
Cenário 2	σ_{2D}	54	55	58	56
	σ_{3D}	63	63	66	64
Cenário 3	σ_{2D}	78	79	81	79
	σ_{3D}	84	85	87	85
Média de todos os resultados – σ_{2D}					59
Média de todos os resultados – σ_{3D}					68

Em relação aos critérios de tolerância para o desvio-padrão posicional dos vértices dos imóveis presentes na Tabela 2, a Tabela 4 apresenta a porcentagem de casos que excedem estes critérios de tolerância nos diversos experimentos realizados.

Tabela 4 – Porcentagem de resultados que excedem as tolerâncias de 70 e 80 mm para o desvio-padrão posicional.

	Desvio-padrão posicional	Valores acima de 70 mm (em %)	Valores acima de 80 mm (em %)
Cenário 1	σ_{2D}	6,7	0,0
	σ_{3D}	26,7	15,6
Cenário 2	σ_{2D}	28,9	22,1
	σ_{3D}	40,0	31,1
Cenário 3	σ_{2D}	60,0	46,7
	σ_{3D}	60,0	53,3
Média de todos os resultados – σ_{2D}		31,9	23,0
Média de todos os resultados – σ_{3D}		42,2	33,3

6. DISCUSSÕES

Analisando os resultados das Figuras 6 – 14 e da Tabela 3, se conclui que a precisão do equipamento, em geral, tem pouca influência nos resultados finais. Por exemplo, embora o Equipamento 1 tenha precisão nominal linear duas vezes melhor do que o Equipamento 3, precisão nominal angular cinco vezes melhor do que o Equipamento 3 e precisão do duplo compensador três vezes melhor do que o Equipamento 3, as diferenças nos resultados obtidos entre estes equipamentos é da ordem de mm para valores da ordem de dm na Tabela 3.

Esta situação decorre do fato do transporte de coordenadas relativamente curto (algumas centenas de metros), com medições em geral de precisão milimétrica. Logo, a incerteza posicional dos vértices de partida da RRCM, em geral da ordem de cm, é o fator dominante na propagação de erros por meio de poligonização com estação total, especialmente no valor do desvio-padrão do azimute da ré, obtido por meio da Expressão (8).

Além disso, analisando ainda as Figuras 6 – 14, quanto menor a distância de visada, isto é, quanto maior o número de pontos de estação auxiliares no transporte de coordenadas, maior é a propagação de erros (incertezas) sobre o vértice do imóvel, conforme esperado.

Analisando os resultados da Tabela 4, nota-se 23% dos casos (cerca de 1/4) excedem a tolerância posicional de 80 mm, considerando o desvio-padrão horizontal. Entretanto, se for considerado o desvio-padrão tridimensional, este número salta para 33,3% (cerca de 1/3 do total). Se for considerado o critério de tolerância posicional de 70 mm, como em algumas classes de vértices da Tabela 2, estes números aumentam para 31,9% e 42,2%, respectivamente.

Nota-se ainda nas Tabelas 3 e 4 a grande heterogeneidade dos resultados obtidos, o que reflete as diversas situações possíveis de se obter na prática, conforme desejado. Por exemplo, se o critério for de 80 mm para o desvio-padrão horizontal, conforme os estudos de Luz (2013), cerca de 23% dos casos excedem a tolerância posicional. Entretanto, se o critério for de 70 mm para o desvio-padrão tridimensional, conforme algumas classes de vértices em CONFEA (2018), o número de casos que excedem a tolerância posicional salta para 42,2%, isto é, quase o dobro.

Em outras palavras, como os resultados em pouco se alteram melhorando a precisão do equipamento, as conclusões mais claras fornecidas por estas centenas de resultados são: 1) evitar a adoção de um critério de tolerância para o desvio-padrão posicional inferior a 80 mm; e 2) evitar a adoção de um critério de tolerância tridimensional, sem justificativas claras para isto.

Ressalta-se que o INCRA adota um critério de tolerância posicional considerando apenas o desvio-padrão horizontal (σ_{2D}) para o caso do georreferenciamento de imóveis rurais, embora a coordenada altimétrica (h) e sua precisão (σ_h) também devem ser determinadas (INCRA, 2013).

É importante destacar ainda que os resultados obtidos nestes experimentos são conservadores por uma série de motivos, como por exemplo:

- 1) Foi assumido que a distância do imóvel a um vértice da RRCM é de apenas 500 m, o que não corresponde à realidade atual da grande maioria dos municípios do país;
- 2) Foram assumidas visadas superiores a 100 m, mas em diversas situações, como áreas urbanas centrais, estradas sinuosas em periferias e regiões de relevo acidentado, não há possibilidade de visadas acima de 100 m sem obstruções de visibilidade, o que resulta em um maior número de pontos de estação, isto é, maior propagação de erros;
- 3) Em alguns casos os vértices de partida da RRCM apresentam desvio-padrão horizontal milimétrico, o que não será a realidade de diversos municípios em função da distribuição dos marcos do SGB, além da própria propagação de erros no processo de densificação da RRCM para atender ao raio de 500 m em relação a cada imóvel;
- 4) Foi assumido que todos os vértices do imóvel podem ser levantados a partir de um único ponto de estação, situação que dificilmente ocorre na prática. Ao se considerar mais um ponto de estação para levantar os vértices de fundo do imóvel, por exemplo, os resultados obtidos seriam ainda piores dos que foram aqui apresentados.

É importante destacar que os autores deste trabalho não são contrários ao levantamento planialtimétrico dos vértices do imóvel. O ponto central aqui é: considerando todos os resultados e discussões apresentados, não se recomenda a tolerância posicional em função do desvio-padrão tridimensional ao invés do desvio-padrão horizontal. Ressalta-se ainda que os estudos de Luz (2013) são relativos ao desvio-padrão horizontal, enquanto a substituição deste pelo desvio-padrão tridimensional em CONFEA (2018) não foi devidamente justificada ou ao menos referenciada por outros estudos no referido documento.

Quanto ao desvio-padrão vertical (altimétrico) dos vértices do imóvel, propõe-se que este deve ser considerado separadamente, como inclusive é adotado na NBR14166 para o caso dos vértices da RRCM. Ressalta-se que os autores deste trabalho desconhecem alguma norma ou legislação no cenário internacional que define valores de tolerância para o desvio-padrão tridimensional dos vértices de divisa de imóveis urbanos. Em outras palavras, a proposta apresentada em CONFEA (2018) parece possuir um caráter arbitrário, pois carece de uma justificativa formal e/ou de estudos prévios na literatura, o que pode resultar em algo inviável de ser atingido na prática, conforme os indícios sugeridos pelos diversos resultados aqui obtidos.

Esta discussão se torna ainda mais crítica se for considerado o Decreto Nº 9.310 de 15 de Março de 2018 (BRASIL, 2018), que institui as normas gerais e os procedimentos aplicáveis à Regularização Fundiária Urbana e estabelece os procedimentos para a avaliação e a alienação dos imóveis da União. No referido documento, consta que “o erro posicional esférico do vértice definidor de limite deverá ser igual ou menor a oito centímetros de raio”. Não se tem conhecimento na literatura nacional anterior ao Decreto sobre o conceito do termo “erro posicional esférico”, que também não está claramente especificado no mesmo.

Aqui, assume-se que o erro posicional esférico em questão corresponde ao desvio-padrão

tridimensional (σ_{3D}), de acordo com a Expressão 7.131 apresentada em Seeber (2003, pg 304) para o termo “*mean radial spherical error*”, que é equivalente a Expressão (18) deste trabalho.

Portanto, considerando os resultados aqui apresentados e a realidade da grande maioria dos municípios do Brasil, constata-se a gravidade do problema que milhares de profissionais poderão enfrentar para atender a este tipo de exigência sem dispor de RRCM altamente densificadas e de alta qualidade posicional.

7. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou os estudos iniciais sobre a incerteza posicional dos vértices de imóveis urbanos a luz do SINTER. No estudo realizado, se considerou a propagação de erros (incertezas) a partir de vértices da RRCM até os vértices de divisa do imóvel urbano, utilizando o transporte de coordenadas por meio de poligonação com estação total e seguindo as recomendações das novas versões das normas técnicas NBR13133 e NBR14166.

Por meio dos diversos experimentos realizados, alterando a precisão nominal do equipamento, a distância de visada e o desvio-padrão dos vértices de partida da RRCM, se verificou que boa parte dos resultados excederam os critérios de desvio-padrão posicional estabelecidos pelo documento CONFEA (2018), devido ao fato do critério estar relacionado ao desvio-padrão tridimensional ao invés do desvio-padrão horizontal; especialmente quando o valor de tolerância adotado é de 70 mm ao invés de 80 mm. Ressalta-se que o valor de 80 mm foi obtido pelos estudos de Luz (2013) somente para o caso do desvio-padrão horizontal.

Portanto, dada a aparente arbitrariedade e falta de justificativas e/ou referências pela adoção de um critério de desvio-padrão tridimensional (σ_{3D}) no documento CONFEA (2018), a primeira conclusão aqui obtida, amparada pelos diversos experimentos realizados, pelos estudos de Luz (2013) e para o caso já previsto de imóveis rurais (INCRA, 2013), é pela adoção de critérios de desvio-padrão horizontal (σ_{2D}) e vertical (σ_h) independentes para os vértices de divisa de imóveis urbanos.

A segunda conclusão obtida é que, caso sejam adotados diferentes valores de tolerância para o desvio-padrão horizontal dos vértices de imóveis urbanos, que estes valores não sejam inferiores a 80 mm, novamente, baseando-se nos diversos experimentos realizados e nos estudos de Luz (2013). Uma sugestão, por exemplo, é adotar valores de tolerância de 80 mm, 100 mm e/ou 120 mm, dependendo da realidade física encontrada. Para o desvio-padrão vertical dos vértices, mais estudos são necessários, considerando, principalmente, qual é a necessidade de se definir uma coordenada altimétrica para os vértices de divisa dos imóveis urbanos.

Por fim, cabe ainda salientar que a maioria dos municípios do país não dispõe de RRCM, especialmente de acordo com a nova versão da NBR14166, recém-finalizada. Desta forma, os resultados obtidos são conservadores, pois se parte do pressuposto que já existe uma RRCM implantada de acordo com a nova versão da NBR14166, o que não corresponde a realidade atual dos municípios do país. Uma proposta de implantação de RRCM de baixo custo e grande abrangência, para se adequar a esta necessidade, pode ser obtida em Klein et al. (2017).

Neste contexto, a conclusão geral deste trabalho é que, atualmente, não é possível atender as exigências do documento CONFEA (2018) e do Decreto Nº 9.310/2018 em grande parte das situações. Este fato é crítico se for considerado que a precisão nominal do equipamento exerce

pouca influência nos resultados finais, isto é, mesmo dispondo dos melhores equipamentos, ainda assim não é possível atender as exigências técnicas que constam nestes documentos.

Como sugestões para trabalhos futuros, sugerem-se investigações mais profundas a respeito destas questões, considerando a grande heterogeneidade das regiões, estados e municípios do país, por exemplo, em termos de marcos das redes ativa e passiva do SGB; dimensões das áreas urbanas e rurais; padrões de urbanização e o transporte de coordenadas em diversas situações, dentre vários outros fatores.

Referências Bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13.133: Execução de levantamento topográfico.** (versão para consulta pública). Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 14.166: Rede de referência cadastral municipal – Procedimento.** (versão para consulta pública). Rio de Janeiro, 2018. 23p.

BRASIL. **Decreto nº 9.310, de 15 de março de 2018.** Institui as normas gerais e os procedimentos aplicáveis à Regularização Fundiária Urbana e estabelece os procedimentos para a avaliação e a alienação dos imóveis da União. Diário Oficial da União, Brasília, 16 mar. 2018.

BRASIL. **Decreto nº 8.764, de 10 de maio de 2016.** Institui o Sistema Nacional de Gestão de Informações Territoriais e regulamenta o disposto no art. 41 da Lei nº 11.977, de 7 de julho de 2009. Diário Oficial da União, Brasília, 11 mai. 2016.

BRASIL. Congresso Nacional. **Projeto de Lei Complementar PL 3.876/2015.** Estabelece normas para elaboração do cadastro territorial dos municípios e dá outras providências. Disponível em: <<http://www.camara.gov.br/sileg/integras/1475564.pdf>>. Acesso em: 13 jun. 2018.

CONFEA. **Normas e Procedimentos de Engenharia para Cadastro Urbano no Brasil.** Versão 1.0. 2018. 98p.

DEAMBROGIO, L.; JULIEN, O. Characterization of carrier phase measurement quality in urban environments. In: **EWGNSS 2013, 6th European Workshop on GNSS Signals and Signal Processing**, Munich, Germany, 2013.

GEMAEL, C. **Introdução ao ajustamento de observações: aplicações geodésicas.** Curitiba: Editora UFPR, 1994. 319p.

GHILANI, C. D.; WOLF, P. R. **Adjustment Computations: Spatial Data Analysis.** 4. ed. New York: John Wiley & Sons, 2006. 611p.

FERREIRA, N. R. A.; CHAVES, J. C. Análise da acurácia de observações com uma estação

total robótica em ensaio controlado de deslocamento. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 69, n. 7, p. 1277–1286, 2017.

FRANÇA, R. M.; CABRAL, C. R.; HASENACK, M. Implantação de obras em sistemas TMs com estação total. In: **Anais do XII COBRAC**. Florianópolis, p. 1-11, 2016.

INSTITUTO NACIONAL DE COLONIZAÇÃO E REFORMA AGRÁRIA (INCRA). **Norma técnica para georreferenciamento de imóveis rurais**. 3º Edição. Brasília. 2013. 4p.

ISO17123-3. **Field procedures for testing geodetic and surveying instruments - Part 3 Theodolites**. ISO copyright office, Genève, Switzerland. 2001. 26 p.

ISO17123-4. **Field procedures for testing geodetic and surveying instruments - Part 4 Electrooptical distance meters**. ISO copyright office, Genève, Switzerland. 2012. 30 p.

KLEIN, I.; GUZATTO, M. P.; HASENACK, M.; CABRAL, C. R.; LIMA, A. P. B.; FRITSCHÉ, S.; REGINA JUNIOR, L. A. M.; MOMO, G. F. Rede de referência municipal para estações livres: uma proposta de baixo custo e grande abrangência. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 69, n. 3, p. 519–532, 2017.

LEICA. **Leica FlexLine TS09plus Brochure**. 2016. 6p. Disponível em: <<https://leica-geosystems.com/products/total-stations/manual-total-stations/leica-flexline-ts09plus>>. Acesso em: 13 jun. 2018.

LUZ, L. A. S. **Uma proposta para a precisão posicional no cadastro urbano brasileiro**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC. Florianópolis, SC. 2013. 82p.

SCHOFIELD, W.; BREACH, M. **Engineering surveying**. 6th Edition. Elsevier, 2007. 622p.

SEEBER, G. **Satellite geodesy: foundations, methods, and applications**. 2nd Edition. Walter de Gruyter, 2003. 589p.

SILVEIRA, G. C. **Influência da geometria dos satélites na precisão das coordenadas geodésicas obtidas com o sistema GPS**. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes. Universidade de São Paulo, USP. São Carlos, SP. 2008. 170p.