

REVISÃO DOS MÉTODOS DE ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA PRODUTOS ALTIMÉTRICOS NO BRASIL

JOÃO ALBERTO BATISTA DE CARVALHO

DANIEL CARNEIRO DA SILVA

Diretoria do Serviço Geográfico - DSG
Universidade Federal de Pernambuco - UFPE
Centro de Tecnologia e Geociências - CTG
Departamento de Engenharia Cartográfica, Recife, PE
jalbertobcarvalho@mail.com, danielcs@ufpe.br

RESUMO– Diversas técnicas para se medir o nível de qualidade posicional de um dado geoespacial podem ser encontradas na literatura. No Brasil a forma oficial e difundida de se aferir qualidade de produtos geoespaciais analógicos é a partir do uso do Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) e mais recentemente para produtos digitais passou a ser adotado o Padrão de Exatidão Cartográfica dos Produtos Cartográficos Digitais (PEC-PCD). Devido à falta de maior detalhamento das normas oficiais nacionais, além do PEC e PEC-PCD, tem sido proposto diversos testes estatísticos complementares em trabalhos acadêmicos, com o objetivo de verificar precisão e tendência dos dados amostrais. Este artigo apresenta um breve estudo sobre estes métodos, usuais e mais recentes da literatura para dados altimétricos, mostrando que há necessidade que estes sejam revistos e adequados às novas situações tecnológicas da atualidade, como por exemplo, os sistemas de *Light Detection and Ranging* (LIDAR) e Visão Computacional.

ABSTRACT– Several techniques for measuring the level of quality of a positional geospatial data can be found in the literature. In Brazil the official and widespread way to measure quality analog geospatial products is from the use of Cartographic Accuracy Standard (PEC) and more recently for digital products began to be adopted the Cartographic Accuracy Standards of Digital Cartographic Products (PEC PCD). Due to lack of more detailed national official standards, in addition to the PEC and PEC-PCD, it has been proposed several additional statistical tests in academic papers, in order to verify accuracy and tendency of sample data. This article presents a brief study of these methods, the usual and more recent literature for altimetry data showing the need that they be reviewed and tailored to the new technology of the present situations, such as the systems of *Light Detection and Ranging* (LIDAR) and Computer Vision.

1 INTRODUÇÃO

Estimar a qualidade de um produto cartográfico é de extrema importância dentro das Geociências e Engenharias, pois somente um produto com alto grau de confiabilidade deve ser aplicado em projetos e obras. Por conta disso, muitas normas e padrões foram criados com este objetivo. As normas ISO 19113 (2002) estabelece como componentes da qualidade a completude, acurácia posicional, consistência lógica, acurácia temática e acurácia temporal. Completude pode ser entendida como sendo o excesso ou escassez de informação em um produto, acurácia posicional como a qualidade do posicionamento de feições dentro de um produto, consistência lógica como conjunto de elementos conceituais, de domínio, modelos e formato que os produtos devem seguir e acurácia temporal é adequação temporal que os dados possuem. A ISO 19114 (2003) apresenta os procedimentos a serem realizados para a avaliação da qualidade. A *America Society of Photogrammetry and Remote Sensing* (ASPRS) desenvolveu duas normas referentes à acurácia de dados geoespaciais: a primeira *ASPRS Accuracy Standards for Large-Scale Maps* (1990) apresentava definições sobre a acurácia espacial para mapas topográficos em grandes escalas; e a segunda é a *ASPRS Guidelines Vertical Accuracy Reporting for Lidar Data* (2004) que apresentava normas referentes à acurácia de dados de elevação do LIDAR. O *Federal Geographic Data Committee* (FGDC) apresenta como norma para acurácia de dados a *Geospatial Positioning Accuracy Standards* (1998). No Brasil, o Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) é o indicador estatístico utilizado como valor padrão para classificar dados planialtimétrico. Este artigo tem como objetivo realizar uma revisão dos métodos de avaliação da qualidade de produtos altimétricos no Brasil, inicialmente realizando um estudo sobre o conceito do PEC, métodos estatísticos de análise da precisão e tendência e por último, utilizando um exemplo prático, onde são apresentadas considerações importantes a serem estudadas sobre a aplicação de testes estatísticos.

2. PADRÃO DE EXATIDÃO CARTOGRÁFICA

O PEC é o indicador estatístico utilizado como valor padrão para classificar dados planialtimétrico em produtos analógicos. Estabelecido pelo decreto presidencial nº 89817, de 20 de junho de 1984, que estabelece as Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional, este tem como objetivo estabelecer classes (A, B ou C) nos quais os produtos cartográficos podem ser enquadrados, de forma assim classificá-los de acordo com a qualidade por eles oferecido. Para que um produto altimétrico, tem-se que este pode ser enquadrado em uma determinada classe se satisfeitas as seguintes condições:

- Noventa por cento dos pontos isolados de altitude, interpolados a partir de curvas de nível, quando testados com no terreno, não deverão apresentar erro superior ao PEC altimétrico estabelecido;
- O erro padrão isolado em um trabalho cartográfico não pode ultrapassar 60,8% do PEC estabelecido para aquela categoria.

Em termos de classes, o PEC distribui os produtos usando como referência o valor da equidistância entre as curvas de nível usadas para interpolar os pontos de avaliação. Logo, as classes podem ser divididas conforme a tabela 1. O termo erro padrão é apresentado, conforme o decreto, como sendo equivalente ao desvio padrão e o erro médio quadrático.

Tabela 1: Padrão de Exatidão Cartográfica para dados Altimétricos.

Classe	PEC	Erro Padrão
A	1/2. EC	1/3. EC
B	3/5. EC	2/5. EC
C	3/4. EC	1/2. EC

Em DSG (2015) é realizada uma atualização do conceito do PEC, denominando este agora de Padrão de Exatidão Cartográfica dos Produtos Cartográficos Digitais (PEC-PCD), devido há evolução dos produtos cartográficos, de analógicos para digitais. Logo esta passa a analisar não mais somente pontos cotados interpolados a partir de curvas de nível, mas também pontos cotados obtidos por tecnologias como *Global Navigation Satellite System* (GNSS) e Modelos Digitais de Elevação, por exemplo. Comparando-se com o PEC, percebe-se o aumento de mais uma classe (tabela 2).

Tabela 2: Padrão de Exatidão Cartográfica dos Produtos Cartográficos Digitais para Modelos Digitais de Elevação e Pontos Cotados Altimétricos.

Classe	PEC-PCD	Erro Padrão
A	0,27. EC	1/6. EC
B	1/2. EC	1/3. EC
C	3/5. EC	2/5. EC
D	3/4. EC	1/2. EC

Após a análise das normas e instruções sobre a cartografia nacional relativas ao PEC e o PEC-PCD, para altimetria, observam-se questões que precisam ser levados em conta e outros que necessitam de correção, como:

1. Indicadores estatísticos como média, desvio padrão e erro médio quadrático sofrem bastante influência de valores *outliers* (valores extremos) (HÖHLE; HÖHLE, 2009). Por conta disso, para análises que se utilizam destes indicadores tem se que inicialmente verificar a presença na amostra de *outliers*.
2. Não é apresentada de forma clara uma metodologia a ser utilizada para a definição do PEC ou PEC-PCD dos produtos cartográficos:
 - a. Não é definido como o usuário deve tratar a variável discrepância (diferença entre o valor medido e o valor de referência), visto que esta pode ter valor aritmético ou valor absoluto.

- b. Existe uma indefinição na questão dos limites do intervalo de análise. Os valores do PEC e PEC-PCD representam um intervalo de confiança de 90%, que corresponde à probabilidade de que os erros se encontrem neste intervalo. Sendo assim estes deveriam ser analisados através de um limite superior e inferior e não somente usando limite superior;
3. O decreto define que erro padrão, desvio padrão e erro médio quadrático são sinônimos, embora estatisticamente sejam diferentes. O desvio padrão (DP), erro padrão (EP) da média e erro médio quadrático (EMQ) de uma amostra de tamanho n são calculados, conforme visto em Montgomery e Runger (2003) e em ASPRS (2014), respectivamente pelas equações 1, 2 e 3. Pelas equações percebe-se que estes indicadores são diferentes;

$$DP = s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2}{n - 1}} \quad (1)$$

$$EP = s/\sqrt{n} \quad (2)$$

$$EMQ = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i^{\text{observado}} - X_i^{\text{medido}})^2}{n}} \quad (3)$$

Em que:

s : Desvio Padrão da amostra;

\bar{X} : Média amostral

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad (4)$$

X_i = i -ésima observação na amostra;

4. Ambos utilizam o conceito de equidistância de curvas de nível para determinar o valor do erro padrão e do PEC. Todavia para Modelos Digitais de Elevação este conceito não é adequado, visto que este não necessariamente será utilizado para gerar curvas de nível.

3. TESTES ESTATÍSTICOS PARA DADOS ALTIMÉTRICOS

Devido a simplicidade e deficiência das análises propostas para o PEC e PEC-PCD, existe na literatura diversos testes que tem sido empregados para complementá-las, com o objetivo de verificar se existem tendências e avaliar mais objetivamente a precisão dos dados amostrais. Uma referência muito citada na literatura nacional, e mais antiga, é Merchant (1982), em que o conceito de viés é definido como sendo a tendência que pode apresentar as discrepâncias de uma variável (tanto pode ser planimétrica como altimétrica) para ter um determinado valor ou uma direção. Já a precisão é definida como sendo a tendência dos valores de discrepância em seguir uma distribuição normal. Esta análise de viés e precisão é observada também de modo análogo em Tomaselli, Monico e Camargo (1988). Galo e Camargo (1994) apresentam os conceitos de viés e precisão com algumas diferenças em relação a esses autores. Estes definem precisão como sendo a dispersão entre os valores observados e o valor médio, enquanto que a verificação de existência de tendências dos dados é feita usando análise de exatidão. Exatidão é definida aqui como sinônimo de acurácia e corresponde à proximidade entre os valores observados com os valores de referência.

Os artigos apresentados usam como análise de tendência a estatística t (t de Student), onde para um determinado nível de significância α é calculada a região crítica. A estatística t é adequada para se comparar a média amostral ($\Delta\bar{X}$) com a média populacional (μ). Entende-se como média amostral como sendo a média uma amostra selecionada dentro

de uma população. A média populacional seria a média de toda a população. Serão avaliadas durante o teste as hipóteses:

$$H_0: \Delta\bar{X} = \mu \text{ (Hipótese Nula)} \quad (5)$$

$$H_1: \Delta\bar{X} \neq \mu \text{ (Hipótese Alternativa)} \quad (6)$$

A variável X medida no teste de hipóteses corresponde à discrepância de uma coordenada planimétrica ou altimétrica. Para serem considerados livres de tendência, os autores consideram que a média populacional deve ser igual a zero. Cabe destacar que a média populacional é diferente de erro padrão, não cabendo nesta análise o uso do valor do PEC. O teste se baseia no cálculo do valor de t amostral dado pela equação 7. O intervalo de confiança para aceitação da hipótese nula ocorre se o valor de t amostral satisfaz a equação 8, ou seja, os dados não possuiriam tendências.

$$t_x = \frac{\Delta\bar{X}}{s_{\Delta X}} \cdot \sqrt{n} \quad (7)$$

$$|t_x| < t_{(n-1, \alpha/2)} \quad (8)$$

O segundo teste proposto diz respeito à precisão dos dados. O teste se baseia em comparar o Desvio Padrão da amostra com o Erro Padrão previsto no decreto do PEC. Para isto é utilizado o Teste Chi-Quadrado, que é adequado para comparar o desvio padrão amostral (s_x) com o desvio padrão populacional (σ_x), sendo calculada a estatística de teste pela equação 9. A hipótese nula compara se a variância amostral (s^2) pode ser considerada igual à variância populacional (σ^2) contra a hipótese alternativa que a variância amostral seja maior que a populacional. Todavia esta forma de expressar o teste de hipóteses não está totalmente correta. A melhor forma de se expressar o teste é se a variância populacional pode ser igual à variância prevista no PEC (hipótese nula) contra a hipótese que a variância populacional seja maior que a variância do PEC (equações 10 e 11). O valor de σ_x^2 é considerado como sendo igual ao erro padrão previsto pelo PEC. Será aceita a hipótese nula se a equação 12 for satisfeita.

$$\chi^2 = \frac{(n-1) \cdot s_{\Delta X}^2}{\sigma_x^2} \quad (9)$$

$$\sigma^2 = \sigma_x^2 \text{ (Hipótese Nula)} \quad (10)$$

$$\sigma^2 > \sigma_x^2 \text{ (Hipótese Alternativa)} \quad (11)$$

$$\chi_x^2 < \chi_{(n-1, \alpha)}^2 \quad (12)$$

A combinação dos resultados dos testes de precisão e exatidão leva a cinco possibilidades não previstas nas normas:

- A definição do que se seria um dado preciso e um dado acurado. Em Mônico et al (2009), o termo acurácia é definido como a combinação da precisão (σ) mais a tendência (viés do estimador), o que implica que para um dado ser considerado acurado, deve ser preciso e livre de tendência.
- Em Galo e Camargo (1994) sugere-se que se há existência de tendências nos dados, uma forma de minimizá-los seria subtrair esta dos dados originais lidos na carta. Uma dificuldade em utilizar este método é descobrir qual o valor da tendência dos dados. Outro problema é o caso de dados analógicos, pois não seria possível retirar a tendência em cartas impressas prontas para o uso;
- Existem outras questões que necessitam de melhor avaliação e revisão dos procedimentos usados com base nessas estatísticas, sendo uma delas é que nem a média amostral, nem o desvio padrão amostral são

indicadores resistentes a *outliers* (HÖHLE; HÖHLE, 2009). Uma sugestão a este problema seria buscar indicadores estatísticos robustos, como por exemplo, o uso o cálculo do valor do percentil, em substituição ao intervalo do PEC, conforme visto em ASPRS (2014).

- Ambos os testes, conforme apresentado em Walpole *et al.* (2009), possuem forte dependência que os dados amostrais sejam uma distribuição normal. Contudo não percebe-se a verificação de normalidade para os teste apresentados;
- Os testes de hipóteses, quanto à alternativa, podem ser unicaudal ou bicaudal. Contudo não há um consenso na literatura qual utilizar, no que diz respeito ao teste de tendência para produtos cartográficos. Em Dalmolin e Leal (2001) é proposto o teste unicaudal para verificar a existência de tendência enquanto que em Galo e Camargo (1994) propõe o teste bicaudal.

4. EXEMPLO PRÁTICO

Como exemplo de que os procedimentos correntes não são adequados quando existe a presença de *outliers* foi realizada uma avaliação de Modelo Digital de Superfície (MDS) do Estado da Bahia, cedido pela 3ª Divisão de Levantamento, unidade da Diretoria do Serviço Geográfica do Exército Brasileiro. A Figura mostra o MDS em níveis de cinza e os 39 pontos coletados usando GNSS. Durante o teste foi identificado à presença de um ponto *outlier*. No primeiro experimento foram então realizados os testes de tendência e precisão, usando inicialmente todos os pontos, conforme apresentado nas tabelas 3 e 5, na coluna experimento 1. Posteriormente, no segundo experimento, foi retirado o ponto *outlier*, e repetido os testes cujos resultados estão nas tabelas 3 e 5, na coluna experimento 2.

Figura 1: Modelo Digital de Superfície.

(Fonte: O autor)

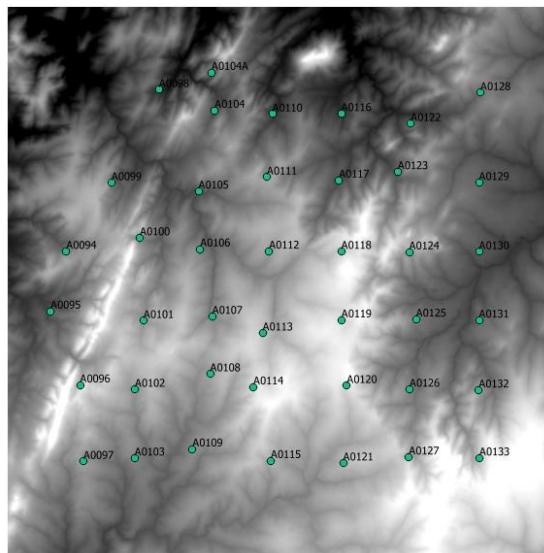


Tabela 3: Valores calculados para os testes de tendência e precisão.

		Experimento 1	Experimento 2
	Nº de Pontos	39	38
	Média Amostral	0,16	0,33
	Desvio Padrão Amostral	1,46	1,03
	t calculado	0,70	1,97
	t	1,69	1,69
1:1.000	χ^2 (Classe A)	2819,34	1371,03
	χ^2 (Classe B)	748,20	363,84
	χ^2 (Classe C)	509,24	247,64
	χ^2 (Classe D)	325,92	158,49
1:2.000	χ^2 (Classe A)	2819,34	1371,03
	χ^2 (Classe B)	748,20	363,84
	χ^2 (Classe C)	509,24	247,64
	χ^2 (Classe D)	325,92	158,49
1:5.000	χ^2 (Classe A)	704,84	342,76
	χ^2 (Classe B)	187,05	90,96
	χ^2 (Classe C)	127,31	61,91
	χ^2 (Classe D)	81,48	39,62
1:10.000	χ^2 (Classe A)	115,47	56,15
	χ^2 (Classe B)	29,22	14,21
	χ^2 (Classe C)	20,37	9,91
	χ^2 (Classe D)	13,04	6,34
1:25.000	χ^2 (Classe A)	29,22	14,21
	χ^2 (Classe B)	7,35	3,57
	χ^2 (Classe C)	5,09	2,48
	χ^2 (Classe D)	3,26	1,58
1:50.000	χ^2 (Classe A)	7,35	3,57
	χ^2 (Classe B)	1,84	0,89
	χ^2 (Classe C)	1,27	0,62
	χ^2 (Classe D)	0,81	0,40
1:100.000	χ^2 (Classe A)	1,17	0,57
	χ^2 (Classe B)	0,29	0,14
	χ^2 (Classe C)	0,20	0,10
	χ^2 (Classe D)	0,13	0,06
1:250.000	χ^2 (Classe A)	0,29	0,14
	χ^2 (Classe B)	0,07	0,04
	χ^2 (Classe C)	0,05	0,02
	χ^2 (Classe D)	0,03	0,02
	$\chi^2_{0,05}$	49,51	48,36

Tabela 4: Análise de Tendências.

Experimentos	Existência de Tendências
Experimento 1	Não
Experimento 2	Sim

Tabela 5: Análise de Precisão.

Escala	Classe	Experimento 1	Experimento 2
1:1.000	A	Não	Não
	B	Não	Não
	C	Não	Não
	D	Não	Não
1:2.000	A	Não	Não
	B	Não	Não
	C	Não	Não
	D	Não	Não
1:5.000	A	Não	Não
	B	Não	Não
	C	Não	Não
	D	Não	Não
1:10.000	A	Não	Não
	B	Sim	Sim
	C	Sim	Sim
	D	Sim	Sim
1:25.000	A	Sim	Sim
	B	Sim	Sim
	C	Sim	Sim
	D	Sim	Sim
1:50.000	A	Sim	Sim
	B	Sim	Sim
	C	Sim	Sim
	D	Sim	Sim
1:100.000	A	Sim	Sim
	B	Sim	Sim
	C	Sim	Sim
	D	Sim	Sim
1:250.000	A	Sim	Sim
	B	Sim	Sim
	C	Sim	Sim
	D	Sim	Sim

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Pelos resultados apresentados é possível se chegar às seguintes análises:

- A retirada do valor *outlier* influenciou diretamente nos valores de Média e Desvio Padrão Amostral;
- O teste de tendência apresentou diferenças nos experimentos. No primeiro experimento o teste indicava resultado negativo para a presença de tendência, conforme visto na tabela 4. O valor do $t_{calculado}$ foi inferior ao valor do t previsto. Contudo no segundo experimento o teste passou a apresentar resultado positivo para tendência, pois o valor do $t_{calculado}$ foi superior ao valor do t previsto. Isto ocorre possivelmente devido o valor *outlier* presente no primeiro experimento compensava a tendência e por isso o resultado do teste deu negativo. Com a retirada do valor *outlier* a tendência, que antes estava encoberta, passou a existir;
- O teste de precisão mostrou que os dados não podem ser considerados precisos para escalas superiores a 1:10.000, sendo que para esta escala, a classe A tem resultado negativo para precisão. Para o restante das escalas os dados podem ser considerados precisos.

5. CONCLUSÃO

O processo de avaliação da qualidade pode ser considerado como uma das etapas mais importantes em uma linha de produção cartográfica, visto que um dos principais objetivos dos produtores de dados geoespaciais é fornecer estes com alto grau de confiabilidade. Pelo que foi apresentado no artigo, muito precisa ser estudado sobre o assunto. Com a evolução dos métodos de aquisição de dados, novos problemas surgem, aumentando a quantidade de variáveis a serem acrescentadas aos métodos de avaliação, como por exemplo, a presença de valores *outliers*. Percebe-se que padrões e técnicas que usam indicadores como Média e Desvio Padrão não são capazes de garantir resultados confiáveis. Sugere-se então o estudo de indicadores robustos, capazes de não serem influenciados pela presença de *outliers* na amostra, bem como rever a metodologia para aplicação do PEC-PCD.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY OF PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING. ASPRS: Accuracy Standards for Large-Scale Maps. [s. l.]: ASPRS, 1990.

AMERICAN SOCIETY OF PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING. ASPRS: Guidelines Vertical Accuracy Reporting for LIDAR Data. [s. l.]: ASPRS, 2004.

AMERICAN SOCIETY OF PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING. ASPRS: Accuracy Standards for Digital Geospatial Data. [s. l.]: ASPRS, 2014.

Brasil. Decreto nº 89.817, de 29 de julho de 1984. Dispõe sobre as instruções reguladoras das normas técnicas da cartografia nacional. Diário oficial da república federativa do brasil. Brasília, 22 jul. 1984.

DALMOLIN, Quintino; LEAL, Evilázio da Mota. Análise da Qualidade Posicional em Bases Cartográficas Geradas em CAD. Boletim de Ciências Geodésicas, Curitiba, v. 7, n. 1, p.21-40, 2001.

DIRETORIA DO SERVIÇO GEOGRÁFICO. EB80-N-72.003: Especificação técnica para a aquisição de dados geoespaciais vetoriais. Brasília: DSG, 2015.

FEDERAL GEOGRAPHIC DATA COMMITTEE. FGDC-STD-007.3: Geospatial Positioning Accuracy Standards. [s. l.]: FGDC, 1998.

GALO, M; CAMARGO, P de Oliveira. Utilização do GPS no controle de qualidade de cartas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CADASTRO TÉCNICO MULTIFINALITÁRIO, 1., 1994, Florianópolis. Anais... . SC: Cobrac, 1994. p. 41 - 48.

HÖHLE, J.; HÖHLE, M. Accuracy Assessment Of Digital Elevation Models By Mean Of Robust Statistical Methods. ISPRS Journal of Photogrammetry And Remote Sensing, 2009.

ISO/TC 211. ISO 19113: Geographic information — Quality principles. Oslo, 2002.

ISO/TC 211. ISO 19114: Geographic information — Quality evaluation procedures. Oslo, 2003.

MERCHANT, D. C. Spatial Accuracy Standards For Large Scale Line Maps. In: American Congress on Surveying and Mapping, v.1, 1982. Technical Papers of the American Congress on Surveying and Mapping, 1982.

MONTGOMERY, Douglas C.; RUNGER, George C.. Statics And Probability For Engineers. 3. Ed. Nova Iorque: John Wiley e Sons, 2003.

MONICO, J. F. G. et al. Acurácia e Precisão: Revendo os Conceitos de Forma Acurada. Boletim de Ciências Geodésicas, 2009.

TOMASELLI, A. M. G.; MONICO, J. F. G.; CAMARGO, P. O.. Análise da Exatidão Cartográfica da Carta Imagem "São Paulo". In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 5., 1988, Natal. Anais... . [s. L.]: SBSR, 1988. p. 253 - 257.

WALPOLE, R. E. et al. Probabilidade e Estatística para Engenheiros e Ciências. Tradução de Luciane F. Pauleti Viana. 8ª Edição. ed. São Paulo: Pearson, 2009.