



Potencialidades do GPS em levantamentos geofísicos terrestres

M.S.T. Santos & N.C. Sá

Universidade de São Paulo – USP, IAG/USP - Departamento de Geofísica Rua do Matão, 1226, Cidade Universitária, São Paulo-SP. CEP 05508 – 900 Fone: (0XX-11) 3091-4762 - Fax: (0XX-11) 3091-2801, teles@iag.usp.br, nelsi@iag.usp.br

Resumo A partir da análise do posicionamento por GPS de 38 referências de nível, num perfil localizado no estado de São Paulo, são sugeridos procedimentos de uso do GPS em levantamentos geofísicos terrestres. Como referência, foi realizado o posicionamento relativo estático, com receptores de dupla frequência, coletando dados durante sessões de 60 minutos. As coordenadas geodésicas foram determinadas por meio de diversas estratégias de processamento, variando o tipo de receptor utilizado (simples e dupla frequência), o número de bases (1 e 3), o comprimento das bases (2 a 250 km) e a duração da sessão (10 a 60 minutos). As altitudes ortométricas foram determinadas no modo relativo, usando as 5 estações da Rede GPS do estado de São Paulo (RGSP) mais próximas. A análise estatística dos resíduos das coordenadas e altitudes obtidas, em relação aos valores de referência, gerou informações sobre a acurácia dos posicionamentos horizontal e altimétrico por GPS em função dos parâmetros analisados. Com base nos resultados obtidos, foram definidos os métodos de posicionamento GPS para levantamentos geofísicos locais e regionais, conforme suas características. Assim, para se obter acurácia de 10 cm, com bases maiores de que 30 km devem-se usar receptores de dupla frequência e sessões de no mínimo 30 minutos. Com bases menores do que 30 km podem ser usados receptores de dupla ou simples frequência e sessões de 30 minutos.

Palavras-chave: posicionamento por GPS, altimetria por GPS, levantamentos geofísicos.

Abstract From analysis of the GPS positioning of 38 bench marks, in a profile located at São Paulo State, some procedures for GPS use in terrestrial geophysical surveys are suggested. The static relative positioning by dual frequencies receivers, from sessions of 60 minutes, was used as reference. The geodetic coordinates were obtained by using several processing strategies, varying the receiver type (single and dual frequencies), the number of baselines (1 and 3), the length of baseline (2 to 250 km) and the session time (10 to 60 minutes). The orthometric heights were obtained in a relative way, using the 5 nearest stations of RGSP. The statistical analysis of residuals of the obtained coordinates and heights with respect to the reference values, generated information about accuracy of geographic and altimetric positioning by GPS, as a function of analyzed parameters. From obtained results, the GPS positioning methods were specified to local and regional geophysical surveys, according to its characteristics. Therefore, to obtain an accuracy of 10 cm from baselines greater than 30 km, dual frequency receivers and sessions greater than 30 minutes must be used. For baselines lower than 30 km, may be used dual or single frequency receivers with 30 minutes sessions.

Keywords: GPS positioning, levelling by GPS, geophysical surveys

INTRODUÇÃO Os levantamentos geofísicos terrestres consistem em realizar medições de grandezas físicas na superfície da Terra, com o objetivo de estudar a estrutura e as propriedades físicas, e aplicá-los na exploração de recursos naturais. Há vários métodos de levantamentos geofísicos, cada um usando o princípio físico ao qual é sensível. Os principais métodos são: gravimétrico, magnético, sísmicos e geoelétricos (Kearey & Brooks 1984, Dobrin 1976).

Nesses levantamentos, são necessários os posicionamentos geográfico e altimétrico dos locais das medições para processamento, representação e análise dos dados. Para os posicionamentos, há vários procedimentos disponíveis, tais como mapas topográficos, fotografia aérea, medição de distância e ângulo e os nivelamentos geométrico, trigonométrico e barométrico. A escolha do procedimento deve ser compatível com a precisão desejada, levando-se em

conta aspectos econômicos, o tempo necessário e as informações disponíveis (Torge 1989).

O uso do *Global Positioning System* (GPS) gera vários benefícios em relação aos métodos tradicionais de posicionamento. Alguns desses benefícios são: alta precisão, simplicidade operacional, rapidez e baixo custo. Mas, para a adequada utilização do GPS, devem ser adotados critérios relacionados à aquisição e ao processamento de dados, como duração da sessão, tipo de receptores, comprimento e número de bases. Esses critérios são definidos em função das características de cada levantamento (precisão requerida, extensão da área e resolução espacial).

Este trabalho tem como objetivo indicar procedimentos para aplicações do GPS em levantamentos geofísicos terrestres. Para isso, foram posicionadas por GPS 38 Referências de Nível (RNs) localizadas no estado de São Paulo, numa linha de 300 km de comprimento. As coordenadas geodésicas das



RNs foram determinadas por diversas estratégias de processamento, variando o tipo de receptor usado (simples e de dupla frequência), o número de bases utilizadas (1 e 3), o comprimento das bases (2 a 250 km) e a duração da sessão (10 a 60 minutos). As altitudes ortométricas foram determinadas no modo relativo, usando as estações de referência da Rede GPS do estado de São Paulo (RGSP) mais próximas, e o modelo geoidal determinado recentemente para a América do Sul (Sá 2004).

A análise estatística dos resíduos das coordenadas e das altitudes obtidas, em relação às de referência, gerou informações sobre a acurácia dos posicionamentos horizontal e altimétrico por GPS. A partir dessas informações, dos equipamentos e dados disponíveis, e da precisão necessária em cada levantamento geofísico investigado, foram indicadas sistemáticas para adequação do GPS nessas aplicações.

O GPS tem sido usado em levantamentos geofísicos como gravimetria regional (Shiraiwa & Ussami 2001), gravimetria local e sísmica rasa (Silva & Pessoa 1995), sísmica profunda (Perosi 2000) e magnetometria (Ferraccioli *et al.* 2001). Entretanto, na maioria desses levantamentos, o GPS foi utilizado somente no posicionamento horizontal dos pontos de coleta, com baixa acurácia, exigindo outro método para o posicionamento altimétrico.

A metodologia e os dados utilizados neste trabalho possibilitaram aplicações do GPS nos posicionamentos horizontal e altimétrico de todos os levantamentos geofísicos analisados, usando apenas critérios e informações adequados para aquisição e processamento de dados GPS em função das características dos levantamentos.

DADOS UTILIZADOS Este trabalho foi realizado no estado de São Paulo, utilizando-se estações da Rede GPS do estado de São Paulo (RGSP), da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC), e o geóide gravimétrico da região. Esses dados serão descritos a seguir.

Redes GPS de referência A RBMC, implantada e mantida pelo IBGE com a colaboração de várias instituições, é a rede de referência ativa adotada oficialmente no Brasil e possui, atualmente, 20 estações operacionais. Além de fornecerem coordenadas precisas das estações, a RBMC coleta observações dos satélites GPS continuamente nas duas frequências (L1 e L2) e disponibiliza-os alguns dias após a coleta. Isso possibilita a qualquer usuário, com apenas um receptor, realizar o posicionamento relativo. Os arquivos das sessões de observações de cada estação da RBMC, com duração de 24 horas, são

disponibilizados no formato RINEX (*Receiver Independent data Exchange format*), via internet, na página do IBGE (<http://www.ibge.gov.br>). Os arquivos RINEX possuem formato padrão, podendo ser utilizados por qualquer programa de processamento GPS.

A RGSP, implantada pelo Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo (IAG/USP), é uma rede GPS passiva constituída de cerca de 200 estações localizadas no estado de São Paulo e regiões adjacentes. Essa rede é constituída de RNs, ou seja, cada estação possui coordenadas geodésicas (φ, λ, h) e altitude ortométrica (H) conhecidas, podendo servir de referência em levantamentos horizontal e altimétrico. Atualmente, a distância máxima entre as RNs que constituem essa rede é da ordem de 60 km, implicando em bases máximas de 30 km para o posicionamento relativo GPS em qualquer ponto do estado de São Paulo (Sá *et al.* 2001).

Geóide gravimétrico O modelo geoidal utilizado foi o Geóide gravimétrico do estado de São Paulo, desenvolvido pelo IAG/USP, o qual tem resolução espacial de 5' de arco. Na determinação desse geóide, foi utilizada a colocação por mínimos quadrados, usando dados do modelo geopotencial EGM96, dados gravimétricos terrestres e oceânicos e dados topográficos na forma digital (Sá 2004).

Na Interpolação das alturas geoidais, utilizou-se o programa GEOCOM (Sá *et al.* 2001), desenvolvido para uso de modelos gravimétricos digitais, com as coordenadas referidas ao sistema SGR80, compatível ao WGS84. No GEOCOM, as alturas geoidais podem ser calculadas de maneira absoluta ou relativa. Na primeira, o valor de N é calculado diretamente no modelo, a partir das coordenadas geodésicas do ponto. Na segunda, o programa calcula a diferença de alturas geoidais entre dois pontos de coordenadas geodésicas conhecidas. Essa forma é mais precisa por eliminar eventuais erros sistemáticos contidos nas alturas geoidais dos pontos.

METODOLOGIA Seleção de RNs para referência

Para serem usadas como referência na avaliação do posicionamento horizontal e altimétrico com GPS, foram selecionadas 38 RNs pertencentes à Rede Altimétrica Fundamental do Brasil (RAFB), distribuídas ao longo de uma linha de 300 km de comprimento (Fig. 1). No extremo inicial da linha, localiza-se a estação Cesário Lange da RGSP, que está distante 380 e 280 km, respectivamente, das estações UEPP (Presidente Prudente – SP) e PARA (Curitiba – PR) da RBMC.

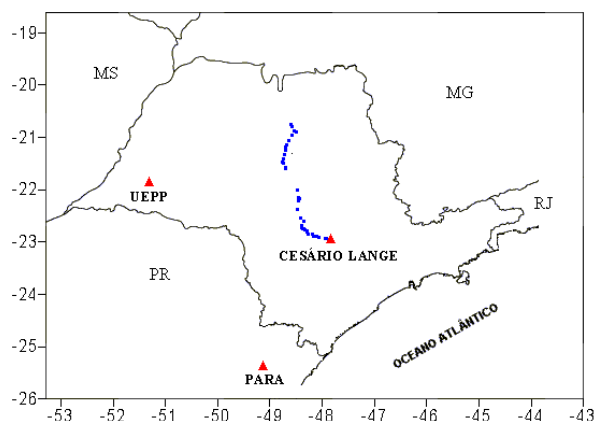


Figura 1. Localização da área de estudo. Quadrados azuis: RNs selecionadas; triângulos vermelhos: estações de referência da RBMC e da RGSP

Posicionamento GPS das RNs selecionadas Para posicionar as 38 RNs foi utilizado o posicionamento por GPS no modo relativo estático, no qual dois receptores coletaram dados, simultaneamente, durante um período de 60 minutos: um instalado nas RNs selecionadas e o outro na estação de Cesário Lange, adotada como referência no posicionamento (ver Fig. 1). A distância entre as RNs e a estação de referência variou de 2 a 250 km. Após o levantamento de campo foram obtidos os dados de duas estações pertencentes à RBMC, a PARA (Curitiba) e a UEPP (Presidente Prudente), para as mesmas datas e horários das observações (ver Fig. 1).

Todos os receptores GPS envolvidos neste experimento foram de dupla frequência e 12 canais, operando com intervalo de amostragem de 15 segundos e ângulo de elevação mínimo de 10°. Os dois receptores usados em campo foram os do IAG/USP, modelo *ASCHTECH Z12*, e os da RBMC foram do modelo *TRIMBLE 4000SSI*.

A seleção e posicionamento das RNs foram feitos entre os dias 7 e 17 de março de 2001, com objetivo de avaliar o nivelamento por GPS (Castro 2002). Essas RNs foram selecionadas estrategicamente de acordo com os seguintes critérios: a) espaçamento homogêneo entre as RNs, de 2 a 10 km; b) maior variação nas altitudes das RNs; c) variação gradual da distância entre as RNs e a estação de Cesário Lange (2 a 250 km).

Estratégias de processamento dos dados GPS As coordenadas geodésicas das RNs foram determinadas por três estratégias de processamento (Fig. 2):

- estratégia 1 – base simples, usando a estação Cesário Lange da RGSP como referência e a frequência L1;
- estratégia 2 – base simples, usando a estação Cesário Lange como referência e a frequência Lc (combinação de L1 e L2 para reduzir os efeitos da ionosfera), e
- estratégia 3 – multiestações, usando as estações Cesário Lange, PARA e UEPP como referências no processamento e ajustamento dos dados e a frequência Lc.

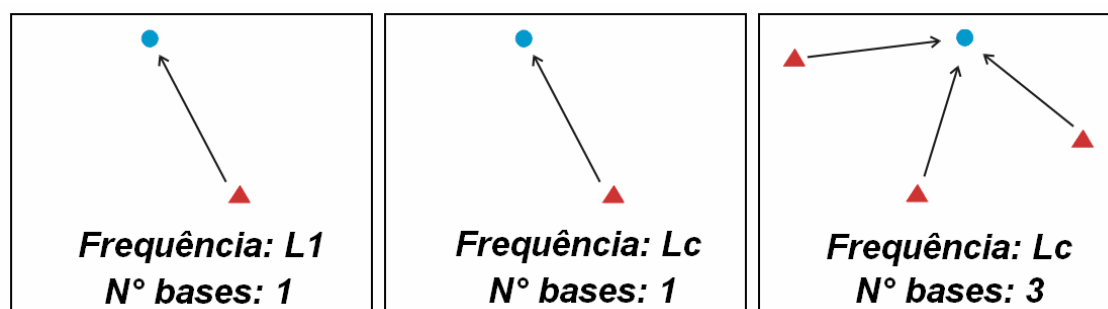


Figura 2. Estratégias de processamento de dados GPS. Triângulos vermelhos: estações de referência; círculos azuis: RNs posicionadas

Todas as sessões de observações das 38 RNs (60 minutos) foram reamostradas e processadas com duração de 10, 20, 30, 40, 50 e 60 minutos, sempre com intervalo de amostragem de 15 segundos e ângulo de elevação superior a 10°. Nos processamentos, foram usadas as observações da fase da portadora, as efemérides precisas e o modelo de troposfera de Hopfield, disponível no *software* de processamento.

As coordenadas obtidas com as estratégias de processamento foram avaliadas por meio da comparação com as de referência. Essas foram determinadas por meio do processamento e ajustamento de todas as sessões de observações em conjunto, formando uma rede GPS de referência. No processamento da rede, os seguintes parâmetros foram utilizados: estações Cesário Lange, UEPP e PARA como referências, frequência Lc, duração da sessão de 60 minutos, intervalo de amostragem de 15 segundos,

ângulo de elevação mínimo de 10°, efemérides precisas e o modelo de troposfera de Hopfield.

As efemérides precisas usadas nos processamentos foram obtidas via internet, na página do IGS (<http://www.igs.nasa.gov>).

Altimetria por GPS nas RNs selecionadas A altimetria por GPS (Fig.3) consiste em determinar a altitude ortométrica do ponto de interesse (*i*) em relação a, pelo menos, uma estação de referência (*A*),

de coordenadas geodésicas ($\varphi_A, \lambda_A, h_A$) e altitude ortométrica (H_A) conhecidas. Isso é realizado pela relação entre as diferenças de altitudes geométricas ($\Delta h_i = h_i - h_A$), essas determinadas pelo posicionamento relativo GPS, e de alturas geoidais ($\Delta N_i = N_i - N_A$), determinadas a partir de um modelo geoidal (Featherstone *et al.* 1998; Ollikainen 1998):

$$H_i = H_A + \Delta H_i = H_A + (\Delta h_i - \Delta N_i) \quad (1)$$

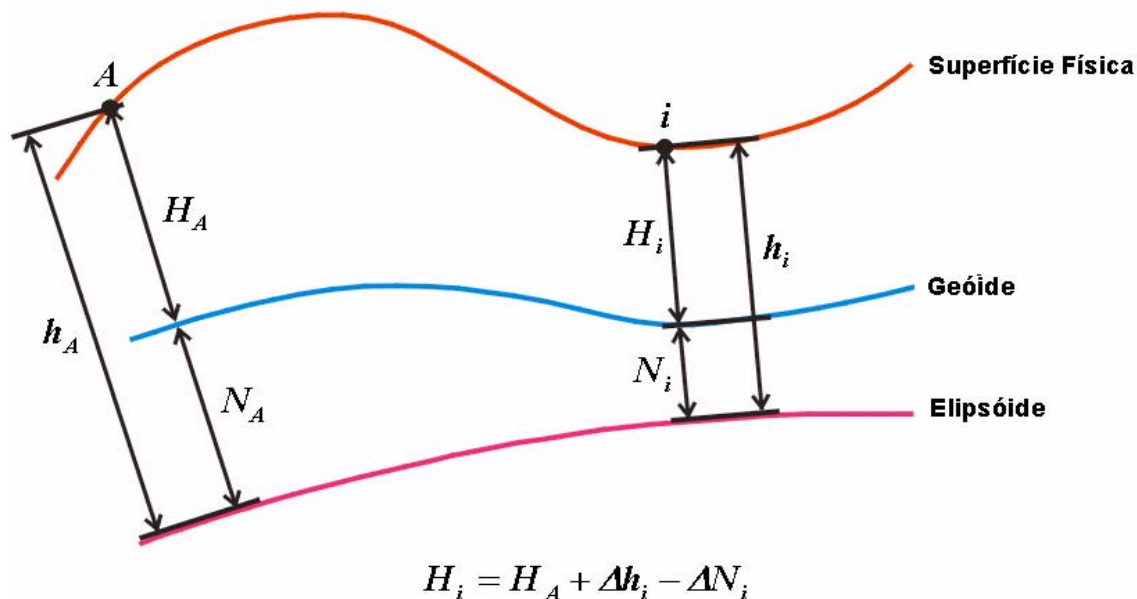


Figura 3. Altimetria por GPS no modo relativo

A propagação das variâncias observacionais fornece diretamente o erro padrão de H_i :

$$\sigma_{H_i} = \pm \sqrt{\sigma_{H_A}^2 + \sigma_{\Delta h_i}^2 + \sigma_{\Delta N_i}^2} \quad (2)$$

onde, $\sigma_{H_A}^2$ é a variância da altitude ortométrica de *A*; $\sigma_{\Delta h_i}^2$ é a variância da diferença de altitude geométrica entre o ponto *i* e o ponto *A*, obtida com GPS; e $\sigma_{\Delta N_i}^2$ é a variância da diferença de altura geoidal entre os pontos, obtida com o modelo geoidal.

A metodologia usada neste trabalho consiste em determinar inicialmente as coordenadas geodésicas de cada RN posicionada ($\varphi_i, \lambda_i, h_i$) e os respectivos erros padrões ($\sigma_{\varphi_i}, \sigma_{\lambda_i}, \sigma_{h_i}$), por meio das estratégias de processamento propostas. A partir das coordenadas geodésicas, a altitude ortométrica das RNs são determinadas no modo relativo, usando a equação (1), com a integração dos dados da RGSP e do geóide gravimétrico. A RGSP proporciona estações de referência com coordenadas geodésicas e altitude

ortométrica conhecidas; e o geóide fornece as diferenças de alturas geoidais entre as estações de referência e as RNs. O erro padrão da altitude determinada é estimado pela equação (2).

Com o objetivo de reduzir o efeito de eventuais erros grosseiros na altimetria por GPS, as altitude ortométrica das RNs posicionadas $i = 1, 2, 3, \dots, n$ foram obtidas a partir das estações de referência $j = 1, 2, 3, \dots, m$ mais próximas. Assim, para cada RN posicionada com GPS, resultou um conjunto de altitudes $\{H_1, H_2, H_3, \dots, H_m\}$ e os respectivos erros padrões $\{\sigma_{H_1}, \sigma_{H_2}, \sigma_{H_3}, \dots, \sigma_{H_m}\}$. As altitudes das RNs foram determinadas por meio da ponderação daquelas obtidas a partir das estações de referência:

$$H_i = \frac{\sum_{j=1}^m P_j H_j}{\sum_{j=1}^m P_j} \quad (3)$$

onde P_j é o peso que corresponde ao inverso da variância:



$$P_j = \frac{1}{\sigma_{H_j}^2} \quad (4)$$

Na determinação da altitude ortométrica de cada ponto, foram usadas as 5 estações de referência mais próximas. Esse número foi determinado empiricamente a partir de uma análise prévia dos dados observados (Santos 2005).

Adequação do GPS aos levantamentos geofísicos terrestres O resultado da avaliação das coordenadas geodésicas e das altitudes ortométricas obtidas nas estratégias de processamento são seus resíduos em função da duração da sessão, do número e comprimento das bases e do tipo de receptores. A partir dessas informações, da precisão requerida e das características de cada levantamento geofísico, são indicados procedimentos de uso do GPS nesses levantamentos.

RESULTADOS Os resultados obtidos nas estratégias de processamento indicaram que: a) a acurácia das coordenadas obtidas por GPS é proporcional à duração da sessão; b) para receptores de uma frequência, a acurácia é inversamente proporcional ao comprimento da base, sendo que, para bases maiores que 30 km, deve-se usar receptores de dupla frequência; e c) o aumento do número de bases melhora a acurácia do posicionamento, além de garantir maior confiabilidade aos resultados com o ajustamento dos dados; e d) a acurácia das altitudes ortométricas tiveram a mesma margem de erro das altitudes geométricas (obtidas por GPS), e apresentaram comportamento idêntico em relação à duração da sessão e ao comprimento da base.

Com base nos resultados obtidos, foi definido o método de posicionamento em cada tipo de levantamento geofísico. Para isso, eles foram divididos em locais e regionais de acordo com a precisão requerida, extensão da área e distância entre os pontos de coleta.

Nos levantamentos geofísicos regionais, caracterizados por grande extensão, baixa densidade de pontos de coleta e posicionamentos de alta acurácia, a técnica mais adequada é o posicionamento relativo estático rápido, que envolve sessões de curta duração (< 20 minutos) e fornecem acurácia de alguns decímetros.

Nos levantamentos geofísicos locais, caracterizados por pequena extensão, alta densidade de pontos de coleta e posicionamentos de maior acurácia do que nos levantamentos regionais, a técnica

mais adequada é o posicionamento relativo estático convencional, com sessões relativamente maiores (> 20 minutos), cuja acurácia é de poucos centímetros. Devido ao pequeno espaçamento e ao grande número de pontos medidos em áreas relativamente pequenas, é recomendável o uso do GPS na implantação de estações de referência na área de trabalho. Os posicionamentos dos pontos de coleta devem ser realizados a partir das estações de referência com o auxílio de equipamentos topográficos como, por exemplo, estação total.

Após a escolha do método a ser usado nos posicionamentos, os parâmetros básicos de coleta e processamento de dados devem ser definidos, tais como a duração da sessão e o comprimento da base, em função dos dados e equipamentos disponíveis, como distâncias às estações de referência mais próximas, tipo e número de receptores. Por exemplo, para obter-se acurácia de aproximadamente 0,1 m usando bases maiores que 30 km, devem-se usar receptores de dupla frequência e sessões de no mínimo 30 minutos. Com bases menores do que 30 km podem-se usar receptores de dupla ou simples frequência e sessões de 30 minutos.

CONCLUSÕES As potencialidades do GPS em levantamentos geofísicos terrestres foram avaliadas a partir de um perfil contendo 38 RNs da RAFB. As coordenadas geodésicas dessas RNs foram determinadas por meio de diversas estratégias de processamento, variando os principais parâmetros envolvidos na coleta e no processamento de dados. A altitude ortométrica de cada RN foi determinada no modo relativo, usando várias estações de referência da RGSP, ponderadas em relação aos erros padrões calculados, e um modelo geoidal recente. A partir dos resultados obtidos, dos equipamentos disponíveis e das características de cada levantamento geofísico investigado, foi feita a adequação do GPS, indicando procedimentos a serem adotados.

A análise dos resultados mostra que o GPS pode ser usado nos posicionamentos horizontal e altimétrico dos levantamentos geofísicos, com vários benefícios em relação aos métodos tradicionais, como precisão, eficiência e economia. No entanto, para a adequada utilização do GPS, devem estar disponíveis os dados que permitam o uso dessa técnica: uma rede GPS que possua estações de referência com coordenadas geodésicas e altitude ortométrica, e um modelo geoidal de alta precisão.



Referências

- CASTRO A.L.P. 2002. *Nivelamento por meio do GPS: avaliação e proposição de estratégias*. Dissertação de Mestrado. Curso de pós-graduação em Ciências Cartográficas da FCT-UNESP, Presidente Prudente-SP, 174 pp.
- DOBRIN M.B. 1976. *Introduction to Geophysical Prospecting* – McGraw-Hill, USA, 630 pp.
- FEATHERSTONE W.E., DENTITH M.C. & KIRBY J.F. 1998. Strategies for the accurated determination of orthometric heights from GPS. *Survey Review*, **34**:278-295.
- FERRACCIOLI F., COREN F., BOZZO E., ZANOLLA C., GANDOLFI S., TABACCO I. & FREZZOTTI M. 2001. Rifted(?) crust at the East Antarctic Craton margin: gravity and magnetic interpretation along a traverse across the Wilkes Subglacial Basin region. *Earth and Planetary Science Letters*, **192**:407-421
- KEAREY P. & BROOKS M. 1984. *An Introduction to Geophysical Exploration*. Blackwel Scientific Publications, Califórnia – USA, 299 pp.
- OLLIKAINEN M. 1998. Accuracy of GPS levelling. The XIII General Meeting of the Nordic Geodetic Commission. *Anais 1*: 25-29, Gävle, Sweden.
- PEROSI F.A. 2000. *Refração sísmica profunda no setor Sudeste da Província Tocantins*. Dissertação de Mestrado. Curso de pós-graduação em Geofísica do IAG-USP, São Paulo, 115 pp.
- SÁ N.C.de. 2004. *O campo de gravidade, o geóide e a estrutura crustal na América do Sul*. Tese de Livre Docência. Departamento de Geofísica do IAG-USP, São Paulo, 121 pp.
- SÁ N.C. de, SOUZA S.F. de, MONICO J.F.G., CASTRO A.L.P. & KRUEGER C.P. 2001. O GPS no estado de São Paulo: potencialidades, desafios e estratégias. XX Congresso Brasileiro de Cartografia, Porto Alegre, *Anais* (cd-rom).
- SANTOS M.S.T. 2005. *Potencialidades do GPS em levantamentos geofísicos terrestres*. Dissertação de Mestrado. Curso de pós-graduação em Geofísica do IAG-USP, São Paulo, 140 pp.
- SEEBER G. 1993. *Satellite Geodesy: Foundations, methods and applications*. Walter de Gruyter, N. York, 531 pp.
- SHIRAIWA S. & USSAMI N. 2001. Gravity survey of the Pantanal Wetland: data acquisition and processing. *Brazilian Journal of Geophysics*, **19**(3).
- TORGE W. 1989. *Gravimetry*. Walter de Gruyter, New York, 465 pp.