

EFETIVIDADE DO GPS NA AVALIAÇÃO DE PROBLEMAS GEOTÉCNICOS EM ÁREAS URBANAS

GPS effectiveness to geotechnical problems in urban areas

Sylvana Melo dos Santos*

Gerd Günter Seeber**

Verônica Maria Costa Romão***

Ivaldo Dário da Silva Pontes Filho****

Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral*****

RESUMO – Diversas análises geotécnicas, tais como recalque e análise de subsidência, demandam um monitoramento rigoroso e preciso das altitudes ou dos deslocamentos verticais. O sistema GPS é um método muito útil na determinação da posição de um ponto na superfície do solo e já vem sendo utilizado para determinação de coordenadas verticais em várias aplicações da engenharia civil em diversas localidades no mundo. O desempenho satisfatório dessa tecnologia para obter grande precisão nas coordenadas verticais exige alguns condicionantes, relacionados aos satélites, às transmissões dos sinais e, principalmente, no caso de áreas urbanizadas, à presença de obstáculos nas proximidades do equipamento que interferem na qualidade e na quantidade de informações coletadas. O presente artigo descreve formas adequadas de uso do GPS de modo a garantir boa precisão nas medidas das coordenadas verticais, mesmo em presença de obstáculos em áreas urbanas.

ABSTRACT – Several geotechnical studies such as foundation settlement and soil subsidence require a careful and precise monitoring of altitudes and vertical displacements. GPS is a powerful system for determining a point position on terrain, and it has already been used for civil engineering in several countries to precise height determination. A suitable performance of GPS measurement for obtaining height with good precision depends on a few issues related to satellites, signal transmission and, in urban areas case, obstacles around the antenna neighbourhood that interfere in quality and quantify of gathered information. This paper presents a discussion on high precision GPS measurements for small vertical displacements in urban areas, even with obstacles.

PALAVRAS CHAVE – GPS, posicionamento preciso, determinação de altitude, recalque, subsidência do solo, áreas urbanas.

* D.Sc., Professora – Centro Acadêmico do Agreste – Universidade Federal de Pernambuco.
E-mail: sylvana@ufpe.br

** D.Sc., Professor - Institut für Erdmessung - Universität Hannover. E-mail: seeber@ife.uni-hannover.de

*** D.Sc., Professora - Departamento de Engenharia Cartográfica – Universidade Federal de Pernambuco.
E-mail: vcosta@ufpe.br

**** D.Sc., Professor - Departamento de Engenharia Civil – Universidade Federal de Pernambuco.
E-mail: ivaldo@ufpe.br

***** Ph.D., Professor - Departamento de Engenharia Civil – Universidade Federal de Pernambuco.
E-mail: jcabral@ufpe.br

1 – INTRODUÇÃO

Análises geotécnicas, tais como a ocorrência de recalques e de subsidência, demandam um monitoramento rigoroso e preciso das altitudes ou dos deslocamentos verticais. As técnicas de nivelamento têm sido utilizadas tradicionalmente para o referido monitoramento, no entanto podem apresentar dificuldades de operação em áreas urbanas com uma densa concentração de edificações, onde a linha de visada fica interrompida por prédios, árvores, postes e até mesmo transeuntes e automóveis ou, em localidades sujeitas à subsidência generalizada, onde não se dispõe de um nível fixo nas proximidades que pode ser usado como referência.

O sistema de posicionamento com base em informações fornecidas por uma rede de satélites artificiais, denominado GPS (Global Positioning System) constitui uma alternativa viável para a obtenção precisa de coordenadas verticais. Nos últimos anos, devido à alta acurácia do sistema GPS e do grande desenvolvimento da tecnologia empregada na confecção dos equipamentos (receptores e antenas), uma grande gama de profissionais emergiu dos mais variados segmentos da comunidade (cartografia, navegação, posicionamento topográfico e geodésico, agricultura, etc.) como usuários do sistema GPS. Dentre as vantagens do emprego da tecnologia GPS sobre os métodos convencionais usados na Topografia, pode-se destacar a eficiência na coleta e automação dos dados e a dispensa da intervisibilidade entre os pontos que compõem os vértices da rede de levantamento. Por esse motivo, o sistema GPS vem se consolidando, cada vez mais, como uma ferramenta muito útil e eficiente na determinação de coordenadas precisas. Atualmente existem no mercado diferentes modelos de receptores GPS que podem ser agrupados, no mínimo, em três categorias: os equipamentos de navegação, que geralmente são mais simples, mais baratos e menos precisos, os equipamentos topográficos, com precisão intermediária, e os equipamentos geodésicos, que podem fornecer precisões excelentes com desvios padrão de apenas poucos milímetros, principalmente com o emprego do posicionamento relativo.

O método de posicionamento pode ser absoluto ou relativo. O primeiro, quando é realizada a determinação das coordenadas de pontos diretamente associadas ao referencial do sistema GPS e usando um receptor, e o segundo, quando é realizada a determinação das diferenças de coordenadas entre dois pontos utilizando dois receptores que estão observando simultaneamente os mesmos satélites (a posição de um dos pontos deve ser conhecida). De forma geral, no posicionamento relativo determinam-se as coordenadas de uma estação de coordenada não conhecida a partir dessa diferença. Em dois métodos muito utilizados, o RTK (cinemático em tempo real) e o DGPS (GPS diferencial) aplicam-se correções fornecidas por uma estação de referência. As observações coletadas no modo relativo permitem a realização de um processamento rigoroso e a obtenção mais precisa das coordenadas. A determinação e o transporte de coordenadas latitude e longitude (ou Norte e Este) com o GPS são mais acurados que a altitude (h) para o mesmo modo de obtenção. Isso ocorre, basicamente, devido a fatores geométricos inerentes à configuração dos satélites. Além disso, ao se querer não as altitudes (h) sobre o elipsóide, mas a altitude (H) com relação ao nível do mar, passa-se a integrar ao problema variáveis geofísicas, como o campo de gravidade da Terra. Daí, tradicionalmente, destina-se o GPS à obtenção das coordenadas de planimétricas (latitude e longitude) e altitudes (h) diferenças de altitude ortométrica (H), para pequenas regiões.

Alguns pesquisadores brasileiros têm se dedicado ao estudo do monitoramento dos deslocamentos verticais milimétricos com GPS, como é o caso de Chaves (2001) que realizou experimentos com GPS para investigar a sua aplicabilidade na monitoração de deformações em estruturas. Com o objetivo de contribuir para a melhoria da precisão das coordenadas GPS, outros estudos foram apresentados por Marini e Monico (2003), Barbosa e Pacileo Netto (2003), entre outros. Além disso, pesquisas têm sido conduzidas, também, utilizando a combinação do GPS com outros equipamentos para o monitoramento do deslocamento vertical da superfície do solo, como foi apresentado por Larocca e

Schaal (2005) que realizou um estudo combinando interferometria e observações estáticas com GPS em linhas de base curtas, onde determinaram deslocamentos da ordem de milímetros, e por Sneed et al. (2003) que também apresentou um estudo combinando métodos interferométricos e GPS para caracterizar as variações verticais na superfície do solo. Com este mesmo propósito, além da interferometria, existem pesquisas exitosas a partir da combinação do GPS com extensômetros, como foi apresentado por Abidin et al. (2001), com o tradicional nivelamento, Bitelli et al. (2000), entre outros.

No que se refere à Engenharia Civil, o sistema GPS tem trazido consideráveis benefícios a algumas atividades, como monitoramento e controle periódico da posição de pontos de controle na superfície da Terra. A aplicação em problemas geotécnicos, entretanto, exige a avaliação da representatividade de tais pontos sobre a área de interesse. As obras de engenharia de uma forma geral e a superfície do solo são exemplos de objetos passíveis de investigação sobre a ocorrência de deslocamento e que compõem os pontos mais utilizados para a investigação com o emprego do GPS. O desempenho do sistema GPS nessas e em outras atividades é limitado, entretanto pela existência de visibilidade dos satélites, ou seja, não devem existir obstáculos (edificações, vegetação, etc.) que impeçam a recepção do sinal pelo equipamento.

Um outro aspecto, muito importante, que deve ser considerado quando se utiliza o GPS para determinação de altitudes é a estação de referência. Mesmo com o emprego do posicionamento relativo, que permite a realização de um processamento rigoroso e a obtenção mais precisa das coordenadas, deve-se ter o cuidado com o ponto fixo adotado, para que o mesmo tenha coordenadas geocêntricas precisas. A determinação da coordenada vertical do ponto fixo pode ser feita utilizando-se tecnologias, como nivelamentos geométrico e trigonométrico e gravimetria, sendo que nestes casos, as altitudes têm como referência a superfície do geóide e são medidas na direção da gravidade (chamada vertical).

Quando se queira vincular as informações altimétricas, obtidas por GPS, de cunho geométrico com a realidade física das posições dos pontos, altitudes ortométricas (sobre o geóide), deve-se fazer a amarração entre elas, determinando a chamada ondulação geoidal (N), através de ocupação de referências de nível (RN) com o GPS. Nesse pontos obtém-se $N = h - H$, e pode-se construir o mapa das ondulações, que nessa região pode ser subtraída da altitude geométrica de um ponto para fornecer a altitude ortométrica, necessária à maioria das obras de engenharia e à cartografia. Quando são consideradas apenas as diferenças de altitudes elipsoidais obtidas por GPS entre os diversos pontos, as correspondentes informações de ondulação geoidal são negligenciadas, é o caso da utilização do GPS para fins de monitoramento vertical de pontos de controle.

2 – GPS APLICADO A PROBLEMAS GEOTÉCNICOS

Gradativamente, a tecnologia GPS vem substituindo as operações geodésicas tradicionais nas diversas aplicações da engenharia que necessitam da determinação da altitude de um determinado ponto na superfície da Terra. Dentre os problemas de rebaixamento de solo que ocorrem em áreas altamente urbanizadas pode-se relacionar: recalques em edificações, recalques em pavimentos e subsidência do solo, em particular, devido à extração de água subterrânea. Em áreas urbanizadas a ocorrência de subsidência do solo está fortemente relacionada com a extração demasiada da água subterrânea. Considerando os prejuízos com a ocorrência de qualquer dos fenômenos que resultem no rebaixamento do solo é evidente a necessidade de se investigar métodos de monitoramento da superfície do terreno que podem ser utilizadas em áreas urbanizadas. Vários centros urbanos contabilizam prejuízos devido à ocorrência de tais fenômenos e existem registros de casos na literatura científica, em toda parte do mundo. No que se refere à exploração sem controle dos recursos hídricos subterrâneos que pode resultar na

subsidência do solo, alguns estudos já vêm sendo realizados durante décadas, e a tecnologia GPS já vem sendo utilizada em muitas localidades no mundo para fins desse monitoramento.

De acordo com Sneed et al. (2002), a subsidência do solo foi reconhecida como um problema potencial no Vale Coachella, Califórnia, desde o início dos anos 20 devido ao bombeamento excessivo de água, que resultou num rebaixamento do nível da água subterrânea de mais de 15 metros até o final dos anos 40 e na compactação do sistema aquífero. A localização, extensão e magnitude das variações verticais da superfície do solo no Vale Coachella, entre os anos de 1998 e 2000, foram determinadas com o emprego do GPS e Interferometria por Radar de Abertura Sintética (InSAR, Synthetic Aperture Radar Interferometry). O InSAR é uma técnica de metrologia que concilia o estudo e medição da interferência de ondas com o imageamento por radar, que pode ser empregada para determinar a orientação e escala da Terra utilizando sinais de rádio de astros distantes, técnica chamada VLBI (Very Long Baseline Interferometry), que permite a definição, implantação e manutenção de sistemas de referência geodésicos modernos. Os resultados obtidos com o emprego do InSAR foram comparados aos obtidos com GPS e, segundo os autores, ambos se ajustaram razoavelmente bem. As medições com GPS realizadas em 15 monumentos geodésicos indicaram uma movimentação vertical da superfície do solo da ordem de -34 mm a +60 mm durante o período de dois anos. Verificou-se uma flutuação sazonal, mas, segundo os autores, razoavelmente estável, que indica uma relação entre os níveis da água dentro de uma faixa elástica de tensão que não ultrapassou a tensão de pré-consolidação do sistema aquífero, neste período de dois anos. Por outro lado, todas as áreas que rebaixaram coincidem com as (ou são próximas das) áreas onde o nível da água rebaixou.

Sneed et al. (2003) relataram o ocorrido no Deserto Mojave, na Califórnia, onde a água subterrânea constitui a fonte primária de abastecimento de água para uso doméstico, para a agricultura e para os habitantes do município no deserto desde o começo dos anos 90. De acordo com os autores, o bombeamento do reservatório subterrâneo foi responsável por um rebaixamento no nível da água subterrânea de mais de 30 metros entre os anos 50 e 90. Para o monitoramento da superfície do solo foi realizado um levantamento com GPS utilizando-se uma rede geodésica para determinar a localização, extensão e a magnitude dos deslocamentos verticais na localidade. Segundo os autores, os levantamentos realizados em 1998 indicaram que ocorreu uma subsidência de cerca de 600 mm entre 1969 e 1998 em três monumentos enquanto que em outros sete monumentos ocorreu um pequeno ou nenhum deslocamento. Entre os anos de 1970 e 1998, o nível da água na área em que ocorreu a subsidência desceu 15 metros. Também foram utilizados métodos interferométricos para caracterizar as variações verticais na superfície do solo da área das bacias do Rio Monjave e Morongo. Os resultados da aplicação desses métodos indicaram que ocorreu uma subsidência de 45 a 90 mm em quatro áreas destas duas bacias (Sneed et al., 2003).

Abidin et al. (2001) relataram a ocorrência de subsidência em Jakarta na Indonésia, onde além do uso de extensômetros para a medição da subsidência e do acompanhamento do nível da água subterrânea, têm sido implantados na região sistemas de monitoramento geodésicos, como o tradicional nivelamento e o GPS. Utilizando resultados de nivelamentos realizados em 1982, 1991 e 1997, e de campanhas com GPS conduzidas em 1997 e 1999, foram detectadas subsidências acima de 80 cm durante o período de 1982 a 1991, e acima de 160 cm entre 1991 e 1997. Os resultados das campanhas com GPS, por sua vez, apontaram uma subsidência superior a 20 cm, de 1997 a 1999. Segundo os autores, a comparação com os dados hidrológicos mostrou que a subsidência do solo está fortemente relacionada com a excessiva extração da água subterrânea.

Ao relatar o estudo realizado no Condado de Yunlin, em Taiwan, Chang (2000) ressaltou a eficiência do emprego do GPS no monitoramento da subsidência, uma vez que, além de rápida, essa técnica não é cara e permite a obtenção de resultados com precisão suficiente para o caso. Com o

objetivo de determinar o conjunto de dados da primeira época de medições e investigar a praticabilidade do monitoramento da subsidência local com GPS foi instalada uma rede de monitoramento com 52 estações GPS. O autor ressaltou a importância do conhecimento preciso da altura geoidal quando se utiliza a técnica de nivelamento combinada com GPS, uma vez que esse parâmetro constitui o datum entre os dois sistemas, influenciando na confiabilidade da subsidência obtida com essa integração. Por outro lado, as variações na altura geométrica entre dois conjuntos de soluções podem ser tratadas como subsidência do solo sem requerer qualquer informação sobre altitude geoidal. A combinação dessas duas técnicas, entretanto, é particularmente interessante em localidades que já vêm utilizando o nivelamento por um longo tempo para o monitoramento da superfície do solo e pretende-se realizar um primeiro conjunto de medições de altitude com GPS. Os resultados GPS foram obtidos de uma campanha realizada em 4 dias com sessões de observação de 2 horas e mostraram basicamente que ocorreu uma subsidência significativa (que indica uma velocidade superior a 10 cm/ano) na área monitorada, sendo necessário um período maior de observação GPS para identificar claramente esse fato, ficando claro que séries de tempo maiores de monitoramento, usando levantamentos repetidos com GPS são muito úteis.

Na cidade de Ojiya, no Japão, as subsidências do solo foram medidas com o emprego do sistema de posicionamento global – GPS, entre 1 de abril de 1996 e 31 de dezembro de 1998 (Sato et al., 2003). Três linhas de base foram selecionadas nas redondezas da cidade e foram medidas as diferenças de altitude, com referência ao elipsóide WGS-84, para cada linha de base. No que se refere à precisão, as medições apresentaram um desvio padrão de 9,5 mm. Além disso, foram observados os níveis d'água em um poço próximo à estação GPS. O valor da subsidência detectado com as observações foi de 7 cm num período de 3 anos. Os resultados indicaram que o GPS é uma boa ferramenta para o monitoramento contínuo da subsidência para longos períodos.

Bitelli et al. (2000) apresentaram resultados de campanhas de nivelamento conduzidas por várias autoridades no Vale de Pó, que compreende as cidades de Veneza, Bologna e Ravena, para acompanhamento da evolução do processo. Além do nivelamento, foram realizadas campanhas com técnica GPS ao longo da linha da costa, que resultou na problemática que envolve a homogeneidade dos dados de diferentes origens, diferentes períodos e com campanhas realizadas utilizando diferentes benchmarks de referência. Para solucionar esse problema os autores propuseram uma rede de nivelamento cobrindo a área do vale, que deve funcionar como uma estrutura para referência espacial e temporal de todas as medições realizadas anteriormente e das atuais. Alguns valores do rebaixamento do solo, detectados com o emprego do GPS, bem como o tempo de monitoramento empregado, estão apresentados na Tabela 1; dela se pode concluir que para realizar o monitoramento de fenômenos dessa natureza, deve-se obter medidas com precisão de alguns poucos centímetros.

Tabela 1 – Alguns casos de subsidência investigados com o emprego do GPS.

Localidade	Tempo de Monitoramento	Subsidência	Fonte da informação
Vale Coachella, Califórnia	2 anos	0,06 m	Sneed et al. (2002)
Deserto Mojave, Califórnia	–	0,05 a 0,09 m	Sneed et al. (2003)
Jakarta, Indonésia	–	0,20 m	Abidin et al. (2001)
Condado de Yulin, Taiwan	–	0,10m/ano	Chang (2000)
Ojiya, Japão	3 anos	0,07 m	Sato et al. (2003)
Veneza, Itália	17 anos	0,10 m	Bitelli et al. (2000)

3 – PRECISÃO DAS COORDENADAS OBTIDAS COM GPS EM ÁREAS URBANAS

Há vários métodos que podem ser empregados na determinação de coordenadas (latitude, longitude, altitude) com o GPS, dentre os quais se destaca o método relativo estático que consiste basicamente no posicionamento de um receptor GPS em um ponto de coordenadas conhecidas e de pelo menos mais um outro receptor no ponto onde se deseja determinar suas coordenadas, tal que todos os receptores envolvidos na operação rastreiem simultaneamente os satélites do sistema GPS num determinado intervalo de tempo pré-definido. Com essas observações são calculadas as coordenadas tridimensionais dos pontos de investigação.

Dentre as coordenadas determinadas a partir do sistema GPS, a altitude destaca-se pelas restrições feitas na sua determinação. As altitudes determinadas com essa técnica também são conhecidas como altitudes geométricas, referindo-se ao elipsóide de revolução determinado como superfície de representação matemática da Terra, o WGS 84 (World Geodetic System 1984). As fontes de erro que mais interferem na determinação da altitude, exercendo um efeito condicionante sobre a sua precisão são as efemérides transmitidas pelos satélites, a ionosfera, a troposfera, os multicaminhos de sinais e o deslocamento do centro de fase da antena (Seeber, 2003).

O posicionamento relativo permite a minimização, ou eliminação, dos efeitos de alguns erros sistemáticos que incidem de forma semelhante em ambas as estações. A contabilidade dos erros associados à determinação da altitude conforme o método de posicionamento adotado, absoluto ou relativo, foi discutida por Menge (2003) e está apresentada na Tabela 2. Erros resultantes de multicaminhos e deslocamento do centro de fase da antena não obedecem a um comportamento padrão, dependendo das condições em que são instalados os equipamentos em campo, nesse contexto, Menge (2003) indicou que os mesmos podem variar, inclusive, de ordem de grandeza, mesmo em posicionamentos relativos (Tabela 2).

Além da adoção do método de posicionamento relativo, algumas circunstâncias operacionais são decisivas no posicionamento com GPS visando a minimização (ou mesmo eliminação) desses erros, tais como: comprimento da linha de base, duração da observação, disponibilidade de dupla frequência, número de estações envolvidas, quantidade de satélites rastreados e geometria da localização dos satélites.

Tabela 2 – Contabilidade dos erros associados à determinação da altitude (Menge, 2003).

Fonte de Erro	Posicionamento	
	absoluto	relativo
Erros dependentes da distância		
Órbita (transmitida)	5-50m	0,5-2ppm
Ionosfera	0,5-100m	0,1-50ppm
Troposfera	0,01-0,4	0,1-2ppm
Erros dependentes da estação		
Multicaminhos (receptor)	mm-cm*	mm-cm*
Deslocamentos do centro de fase da antena	mm-cm*	mm-cm*
Ruído nas medições	≤ 3mm	≤ 4mm

*Erros que não obedecem a um comportamento padrão, podendo variar de ordem de grandeza.

De forma geral, um fator que afeta a precisão das coordenadas obtidas com GPS é a geometria formada pela distribuição dos satélites no céu e a posição da antena do receptor no ponto, sendo

que quanto melhor a distribuição, melhor será a geometria identificada por uma quantidade denominada PDOP (*Positional Dilution of Precision*). Os menores PDOP indicarão uma melhor geometria e, portanto, uma melhor precisão na determinação da posição. A geometria dos satélites ganha mais importância quando se usa o receptor GPS próximo a edifícios, em áreas montanhosas ou vales, pois com o bloqueio de algum satélite, a geometria piora, elevando-se o valor do PDOP. A cobertura de satélites hoje é tão favorável que o valor do PDOP muito raramente está acima de 5 (cinco) e mesmo assim por períodos muito curtos. Em situações livres de obstrução à recepção dos sinais, não é tão necessário o planejamento das observações segundo o PDOP.

4 – OBSTÁCULOS QUE DIFICULTAM A CAPTAÇÃO DOS SINAIS GPS

Em áreas urbanas a presença de edificações, árvores, postes, entre outros, pode ser responsável por situações geométricas desfavoráveis principalmente quando são utilizados períodos curtos de tempo para a coleta de observações GPS; portanto na análise de resultados críticos devem ser verificados os valores dos PDOP. Num estudo sobre o desempenho da técnica GPS como instrumento de detecção de pequenos deslocamentos verticais, como os experimentados na ocorrência da subsidência inicial do solo, Santos (2005) realizou um experimento para simulação de tais deslocamentos. As observações coletadas foram então utilizadas com vistas a analisar a influência da presença de edifícios (situação bastante comum nos centros urbanos) em locais próximos aos pontos de observação, para isso foram realizados processamentos simulando a existência de alguns obstáculos.

O experimento, realizado no teto de medições da Universidade de Hannover na Alemanha, entre 10 e 21 de setembro de 2004, consistiu no levantamento estático com coleta de dados contínua de duas antenas GPS, com uma sessão mínima de 48 horas. As antenas foram apoiadas sobre dois pilares estáveis separados por uma distância de aproximadamente 8m, em situação favorável devido à localização das antenas, sobre o prédio, com pouco ou nenhum obstáculo para recebimento do sinal do satélite. Neste evento, obteve-se uma grande quantidade de dados. Os receptores utilizados no teto de medições foram ASHTECH – modelo Z-XII, que possui duas frequências. Foram coletadas simultaneamente observações de sete estações de referência da rede de rastreamento GPS permanente da Alemanha. A Tabela 3 apresenta o distanciamento aproximado entre as estações de referência observadas, que estão localizadas ao redor da cidade de Hannover, e as antenas sobre o teto de medições; já a Figura 1 apresenta a localização das referidas estações dentro da região da Nieder Sachsen, no norte da Alemanha.

Tabela 3 – Distância aproximada das estações de referência ao teto de medições.

Estação	Localização	Distância
0640	Hannover	6km
0652	Alfed	44km
0657	Hameln	39km
0663	Hildesheim	29km
0665	Schwarmstedt.	33km
0666	Nienberg	44km
0676	Celle	36km



Fig. 1 – Mapa da Niedersachsen, Alemanha, com a localização das estações utilizadas no experimento.

4.1 – Simulação da obstrução do sinal devido aos prédios urbanos

A simulação das obstruções compreendeu as seguintes etapas:

- Coleta dos almanques (efemérides precisas): contendo as informações referentes às posições dos satélites no período de coleta das observações, do site da *U.S. Coast Guard Navigation Center* (<http://www.navcen.uscg.gov>).
- Construção dos diagramas de visibilidade dos satélites e os valores de PDOP: a partir dos dados coletados dos almanques para um período de 24 horas.
- Escolha e “materialização” das obstruções: o cenário simulado compreendeu um ponto de observação localizado na calçada de uma rua e ladeado por quatro prédios, sendo dois deles de 16 pavimentos (15 andares e garagem, com aproximadamente 48 metros de altura) e os outros dois de 11 pavimentos (10 andares e garagem, com cerca de 33 metros de altura) – Figura 2.

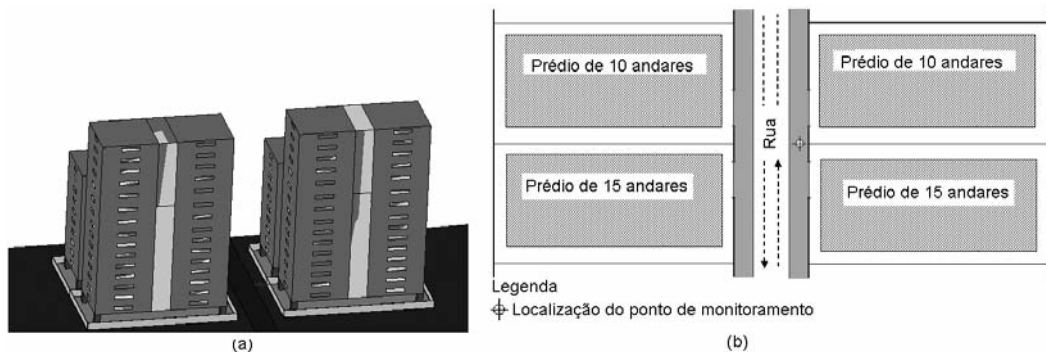


Fig. 2 – Esquemas gráficos para entendimento do cenário simulado: (a) perspectiva; e (b) planta.

- d) Implantação dos obstáculos e simulação das obstruções: nesta etapa foi realizado o processamento das observações do experimento, desativando os satélites que se mostraram obstruídos com a implantação dos obstáculos, no período do dia analisado. O processamento das observações, na presença de obstruções, foi realizada com o programa GEONAP (Wübbena, 1989), buscando a resolução das ambigüidades. Foram consideradas no processamento as três estações de referência Schwarmstedt (0665), Celle (0676) e Hannover (0640), que distam, respectivamente, 33 km, 36 km e 6 km, do teto de medições. Todo o processamento foi realizado com uma máscara de 15° sobre o horizonte, isto é, não considerando os satélites que estão abaixo desse limiar.
- e) Definição de uma solução padrão para verificação da acurácia das coordenadas obtidas. Os resultados de referência que compõem as coordenadas da solução padrão - coordenadas, variâncias e covariâncias – foram obtidos do processamento de todas as observações do experimento e utilizando o tempo total observado com as sete estações de referência. A duração de uma sessão foi de pelo menos 48 horas, o que garantiu a obtenção de coordenadas de referência com valores de desvio padrão máximos menores que 5 mm.

4.2 – Considerações sobre a precisão das coordenadas com a existência de obstáculos

Após a implantação dos obstáculos na geometria do experimento, foi realizada a simulação das obstruções, que consistiu na realização do processamento considerando a desativação dos satélites que se mostraram obstruídos no período analisado.

Foi considerado inicialmente um período de 2 horas de observação. A comparação dos resultados obtidos nas duas situações, com e sem as referidas obstruções, Figura 3, mostra que o desvio padrão na altitude da antena, para um mesmo período de 2 horas, foi quase 1 cm maior com a presença dos obstáculos. Verificou-se, portanto, que a presença dos obstáculos simulados pode influenciar na precisão dos resultados, principalmente no que se refere à altitude.

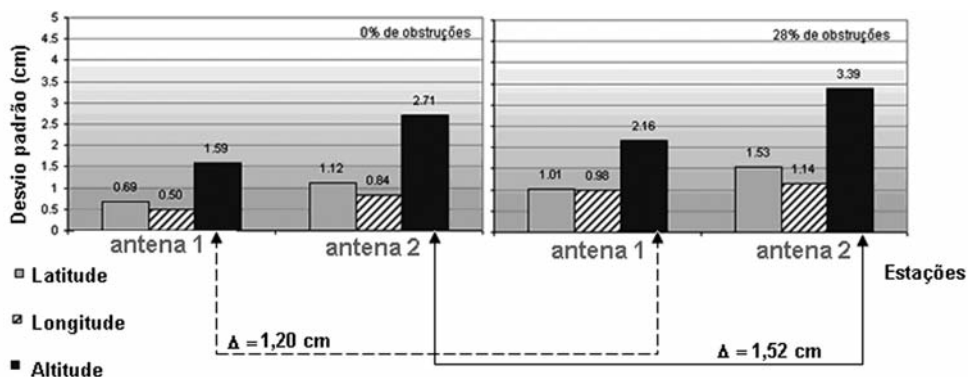


Fig. 3 – Desvio padrão das coordenadas das antenas (duas horas de observação e três estações de referência) com e sem obstruções.

A ocorrência de obstruções que impedem a recepção dos sinais GPS integralmente também são fatores condicionantes da acurácia das coordenadas, tal que a discrepância com relação à solução padrão é maior com a presença dos obstáculos (além de poder provocar multicaminhos). A diferença entre as coordenadas verticais do posicionamento e a solução padrão, com e sem a presença dos obstáculos, foram da ordem de 1 cm para as antenas localizadas sobre o teto de medições. Di-

ferentes resultados podem ser obtidos conforme o período do dia em que são realizadas as observações. Daí a importância em se considerar a existência dos obstáculos no planejamento em todos os períodos, pois a deteriorização dos resultados obtidos sem considerar as obstruções, quando elas existem, pode se refletir em resultados com baixas precisões.

Portanto, é possível utilizar o PDOP como um dos critérios a serem atendidos para obtenção de coordenadas verticais com precisão de, pelo menos, algumas unidades de centímetros, em áreas sujeitas à existência de obstruções. Valores de PDOP abaixo de 4 (quatro) correspondem a medições de posicionamento consideradas acuradas. Neste caso, foram desprezados os valores de PDOP maiores que 4 (quatro) e foram considerados apenas os dados obtidos da observação de, pelo menos, 4 (quatro) satélites. A exclusão dos dados obtidos no período considerado desfavorável não resultou na obtenção de resultados mais precisos uma vez que os valores de desvio padrão permaneceram na mesma ordem de grandeza. Os resultados obtidos nesse período estão mais próximos da solução padrão, com uma discrepância da ordem de 1 cm, enquanto que com a utilização de todas as observações do período resultou numa discrepância máxima de cerca de 2 cm. Com um aumento no período de observação verificou-se ainda que os resultados são mais próximos da solução padrão. Portanto a retirada de períodos de PDOP aparentemente desfavoráveis e com número de satélites abaixo de 4, não representou ganho de precisão (Figura 4) e nem de acurácia (Figura 5).

Inesperadamente, os desvios padrão foram menores quando foram utilizadas todas as observações coletadas no período e considerando a existência das obstruções. Para o experimento realizado, o período de 6 horas foi suficiente para obtenção de altitudes com desvio padrão máximo inferior a 2 cm e discrepância com relação às coordenadas de referência da ordem de 1 cm, a partir do processamento de todas as observações coletadas no período. A partir da simulação de obstruções, verifica-se que a utilização desse critério geométrico pode ser útil na determinação de coordenadas verticais quando não se disponha de um período de observação muito grande.

Além disso, subtraindo-se os períodos com PDOP alto e número de satélites inadequados do período de observação total (tempo bruto), o período restante utilizado no processamento (tempo líquido) pode ser drasticamente reduzido e, conseqüentemente, pode não atender outras características fundamentais ao posicionamento vertical preciso. Já é sabido que, algumas vezes, longos períodos de observação são úteis para a redução dos efeitos de multicaminhos e esta condição deve ser considerada sempre que a proximidade de superfícies refletoras for inevitável, como em áreas urbanas, mas é importante observar que esses longos períodos correspondem ao tempo de observação líquido.

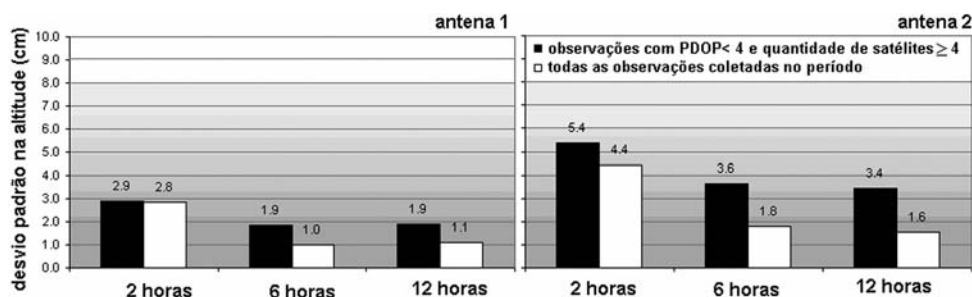


Fig. 4 – Desvios padrão da altitude obtidos utilizando-se 3 estações de referência, considerando: todas as observações coletadas no período; e apenas as observações que atendem ao critério de PDOP e quantidade de satélites.

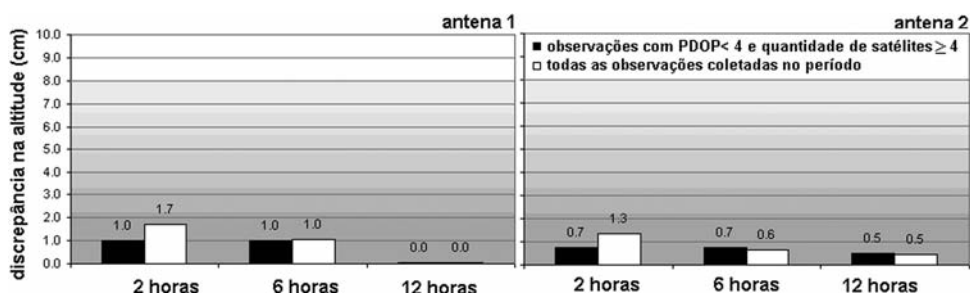


Fig. 5 – Discrepâncias na altitude com relação à solução padrão utilizando-se 3 estações de referência, considerando: todas as observações coletadas no período; apenas as observações que atendem ao critério de PDOP e quantidade de satélites.

Assim sendo, mesmo considerando-se a presença de obstáculos na área de investigação, verifica-se que é possível a obtenção de coordenadas verticais com discrepâncias da ordem de milímetros. Para cada situação, de localidade e disponibilidade de tempo, pode-se definir a duração do rastreamento necessária para obtenção da precisão requerida. Na impossibilidade de desenvolver o trabalho com um horizonte em torno da antena desobstruído acima de 15°, reforça-se a recomendação da avaliação da influência da obstrução na trajetória dos satélites.

5 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O receptor GPS geodésico pode ser utilizado para medição de recalques de solos, pavimentos e edificações em áreas urbanas com boa precisão. Com base nos resultados obtidos recomenda-se a utilização do GPS para o monitoramento do nível do solo em outros problemas geotécnicos semelhantes.

Para o estudo de deslocamentos verticais o sistema GPS pode ser utilizado associado com outros métodos, aumentando a rapidez das medições e reduzindo o custo.

Na ausência de níveis fixos nas proximidades dos pontos objeto a serem medidos pode-se utilizar o sistema GPS na obtenção de coordenadas verticais com desvio padrão inferior a 2 cm.

Com relação à presença de obstáculos, a consideração das obstruções para definição do melhor horário para realização das observações é muito importante e, mesmo resultando em períodos com PDOP desfavorável, para obtenção de coordenadas que podem ser consideradas acuradas, é preferível utilizar todas as observações coletadas no período para realização do ajustamento.

Recomenda-se, principalmente em áreas urbanas, a realização de um planejamento das observações e, sempre que possível, realizar um estudo prévio do local onde serão feitas as medições. É importante também a implantação dos obstáculos existentes (construções e árvores) sobre o *sky plot* ainda na fase de planejamento. Com o resultado dessa investigação, analisando-se a combinação PDOP e quantidade de satélites disponíveis, pode-se afirmar qual o período do dia é o mais indicado para a coleta dos dados.

Para obtenção de coordenadas verticais com alta precisão, em áreas urbanas, além da consideração dos obstáculos presentes no local do levantamento, é necessária a realização do levantamento por longos períodos, sem excluir as observações coletadas em períodos com PDOP desfavoráveis e com número de satélites baixo.

6 – AGRADECIMENTOS

O primeiro autor agradece ao convênio CAPES/DAAD e ao CNPq/CT-Hidro pelas bolsas concedidas que permitiram a realização das atividades na Alemanha e no Brasil e ao *Institut für Erdmessung* da Universidade de Hannover onde foi realizado o experimento dessa pesquisa.

7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abidin, H.Z., Djaja, R., Darmawan, D., Hadi, S., Akbar, A., Rajiyowiryo, H., Sudibyo, Y., Meilano, I., Kasuma, M. A., Kahar, J., Subarya, C. (2001), *Land Subsidence of Jakarta (Indonesia) and its Geodetic Monitoring System*, Natural Hazards 23, pp. 365-387.
- Barbosa, L. G., Pacileo Netto, N. (2003), *Integração de Rede Local de Nivelamento à Rede Altimétrica Fundamental Utilizando o Sistema de Posicionamento Global (GPS)* – Estudo de Caso, Anais do XXI Congresso Brasileiro de Cartografia, Belo Horizonte, Minas Gerais, disponível em: http://www.cartografia.org.br/xxi_cbc/128-G21.pdf (acessado em 04/09/2006).
- Bitelli, G., Bonsignore, F., Unguendoli, M. (2000), *Levelling and GPS networks to monitor ground subsidence in the Southern Po Valley*, Journal of Geodynamics, 30: 355-369.
- Chang, C. (2000), *Estimation of Local Subsidence Using GPS and Levelling Combined Data*, Surveying and Land Information Systems, Vol. 60, N. 2, p. 85-94.
- Chaves, J. C. (2001), *Uso da Tecnologia GPS na Monitoração de Deformação: Sistemas, Etapas e Experimentos*, Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo.
- Larocca, A. P. C., Schaal, R. E. (2005), *Milimeters in Motion – Dynamic Response Precisely Measured*, GPS World, Janeiro, disponível em: <http://sc.gpsworld.com/gpssc/article/articleDetail.jsp?id=308341> (acessado em 04/09/2006).
- Marini, M. C., Monico, J. F. G. (2003), *Aspectos da Otimização e Processamento de Redes GPS*. Pesquisas em Geociências, Nº 30, Vol. 2, p. 51-60.
- Menge, F. (2003), *Zur Kalibrierung der Phasenzentrums variationen von GPS-Antennen für die hochpräzise Positionsbestimmung*, Tese de doutorado Nº. 247, Universität Hannover, Alemanha.
- Santos, S. M. (2005), *Investigações Metodológicas sobre o Monitoramento da Subsidência do Solo devido à Extração de Água Subterrânea – Caso da Região Metropolitana de Recife*, Tese de doutorado, Universidade Federal de Pernambuco.
- Sato, H. P., Abe, K., Ooraki, O. (2003), *GPS-Measured Land Subsidence in Ojiya City, Niigata Prefecture, Japan*, Enginering Geology: 67, p. 379-390.
- Seeber, G. (2003), *Satellite Geodesy. Foundations, Methods, and Applications*. De Gruyter, Berlin.
- Sneed, M., Stork, S.V., Ikehara, M. E. (2002), *Detection and Measurement of Land Subsidence Using Global Positioning System and Interferometric Synthetic Aperture Radar, Coachella Valley, California, 1998-2000*, U.S.Geological Survey Water Resources Investigations Report 02-4239, 29p.
- Sneed, M., Ikehara, M. E., Stork, S. V., Amelung, F., Galloway, D.L. (2003), *Detection and Measurement of Land Subsidence Using Interferometric Synthetic Aperture Radar and Global Positioning System, San Bernardino County, Mojave Desert, California*, U.S.Geological Survey Water Resources Investigations Report 03-4015, 69p.
- Wübbena, G. (1989), *The GPS Adjustment Software Package -GEONAP- Concepts and Models*, Proceedings of the Fifth International Symposium on Satellite Positioning, Las Cruces, New Mexico, p. 452-461.