

Um Modo “Rápido-Estático” com GPS Monofrequência no Apoio à Cartografia

Carlos Antunes
Departamento de Matemática
Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa
Campo Grande - 1700 LISBOA
E-mail: mcarlos@cc.fc.ul.pt

Resumo

O apoio à cartografia de média e grande escala está aquém da necessidade de precisões de 1ppm oferecidas pelo sistema GPS com períodos de observação de 40 minutos. Deste modo, poder-se-ão usar soluções de GPS resultantes de períodos de observação muito mais curtos mas, conseqüentemente, sem fixação de ambiguidades (com valores reais na solução das ambiguidades).

Este artigo pretende mostrar como é que se pode obter a precisão de 10cm, utilizando receptores GPS de monofrequência com períodos de observação de apenas 10 minutos. Apresenta as condições necessárias à obtenção de tais precisões e casos práticos que exemplificam esses resultados.

Abstract

The support to medium and large scale cartography is inferior to the needs in precision of 1ppm offered by GPS system with observation periods of 40 minutes. So, GPS solutions resulting from shorter observation periods, without fixing ambiguities (real values solution) can be used.

This article shows how the 10cm precision can be obtained, using single frequency GPS receivers with observation periods of 10 minutes. The necessary conditions for such precision and the practical cases that illustrate the results are presented.

1. Introdução

Uma experiência de campo, utilizando receptores monofrequência e respectivo software existente no mercado, cujos respectivos fornecedores reclamam a precisão até 10cm no posicionamento relativo em modo estático com período de observação de 10 minutos, permitiu confirmar tais precisões e tirar algumas conclusões importantes sobre a utilização do sistema GPS no apoio à produção cartográfica de média e grande escala. Nesta experiência contam-se dois trabalhos, um de controlo de qualidade externa de ortofotomapas à escala 1:5000 e outro de apoio topográfico, aos quais se seguiu o estudo de análise aqui apresentado.

Neste estudo ressalta uma conclusão evidente e fundamental: para precisões decimétricas, as bases a utilizar não podem exceder os 20Km (base curta). Esta condição é obrigatoriamente imposta pelo facto de se utilizar apenas uma frequência (onda portadora L1), pois os efeitos atmosféricos, nomeadamente, o efeito ionosférico por não poder ser eliminado, começam a ter repercussões significativas nas bases superiores a 20 Km (base longa).

Neste artigo referem-se as precisões necessárias à Cartografia e as suas exigências em termos de rapidez na produção, por forma a encontrar as melhores respostas por parte do sistema GPS. Faz-se uma análise sobre a determinação das ambiguidades iniciais da fase, concluindo como é que a longevidade do período de observação influencia o rigor da sua determinação e a precisão do posicionamento. Abordam-se também, as causas do ruído presente nas observações e a forma de controlar os seus efeitos.

Apresentam-se de seguida, gráficos do comportamento das precisões em função do período de observação, do comprimento da base e do número de satélites, com o objectivo de concluir sobre as condições necessárias para a obtenção da precisão da ordem dos 10cm com 10 minutos de observação.

Finaliza-se com a abordagem da altimetria por GPS e da respectiva necessidade do geóide.

2. O sistema GPS no apoio à Cartografia

A evolução no sistema de posicionamento relativo por GPS pretende, obviamente, dar resposta às necessidades da produção cartográfica, principalmente ao nível da rapidez de execução de trabalhos de apoio de campo, como seja a coordenação de pontos fotogramétricos (PF's).

Actualmente, devido às exigências do mercado, é impensável efectuar uma coordenação de 2 mil PF's com observação de 30 a 40 minutos por PF (à razão de 5/dia), pois a rapidez com que se efectuam as várias fases de produção - vôo, revelação, rasterização, triangulação aérea, estéreoconstituição e orto-projecção - seria seriamente afectada devido à demora do apoio de campo. Por outro lado, as precisões oferecidas pelo sistema GPS nessas condições (de 1ppm) são exageradas, não só pela ordem de grandeza dos respectivos erros toleráveis (superiores a 10cm), mas também, pelo facto de o apoio ser feito a partir de uma rede, na maior parte das vezes, de segunda e terceira ordem, cujas precisões máximas se situam, respectivamente, nos 2 e 5ppm (indicação do IPCC) com distorções constatadas em certas zonas, que podem chegar aos 20 ppm.

O equipamento e respectivo método de observação têm que possibilitar a obtenção da precisão máxima necessária (entenda-se o conceito de precisão aqui aplicado, por $1/\sigma$) em benefício do tempo dispendido. Isto é, se, por exemplo, para a cartografia de 1:5000 o erro tolerável for de 0.5 metros, então o posicionamento relativo com uma base de 20 Km pode ser feito até 25 ppm de precisão; logo, o período de observação necessário poderá ser largamente inferior aos 40 minutos standart do modo estático com receptores de monofrequência.

Para que não sejam introduzidos no posicionamento os erros relativos da rede geodésica e das respectivas distorções, o apoio deverá ser feito sempre a partir dos geodésicos mais próximos. Como é mostrado na Figura 1, a coordenação de um ponto a partir de um geodésico afastado pode introduzir distorções locais na cartografia a produzir, em relação a cartografia oficial existente. Este será mais um factor que condiciona o comprimento das bases a utilizar, até 10 a 15 Km.

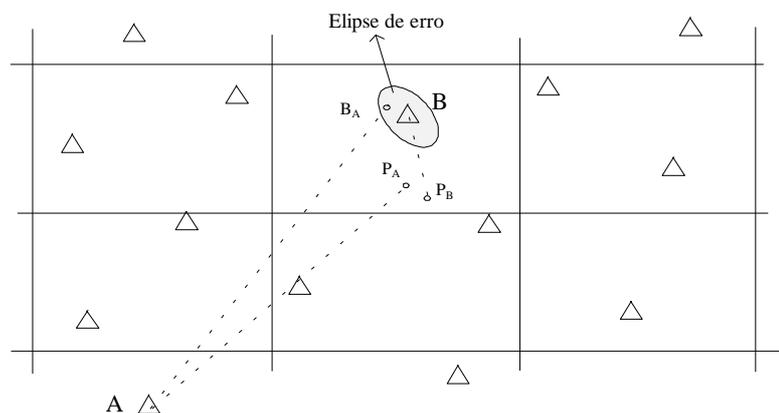


Fig. 1 - Discrepância no posicionamento de um ponto proveniente de geodésicos distintos, devida ao posicionamento distorcido de um geodésico relativamente ao outro.

No caso de estas condições não poderem ser cumpridas na totalidade, é sempre aconselhável o recurso a duas bases (dois receptores fixos) de forma a proporcionar uma boa intersecção, e para que o posicionamento resulte suficientemente preciso.

Para que o GPS se apresente como um sistema que acompanhe a evolução das diversas componentes do sector de produção cartográfica, as novas modalidades de receptores e modos de observação devem possibilitar uma rápida coordenação com uma precisão estritamente necessária aos fins a que se destina.

3. Parâmetros de ambiguidade inicial da fase e sua fixação

Os longos períodos de observação no GPS são exigidos pela necessidade de obtenção de soluções com fixação rigorosa das ambiguidades iniciais da fase a valores inteiros; resultando, nesses casos, soluções com precisões milimétricas e submilimétricas, ou mais correctamente, precisões de 1ppm a 10ppb.

Apesar das ambiguidades iniciais da fase (número de ciclos decorridos desde o instante de emissão do sinal até ao instante da sua recepção) serem parâmetros de valor inteiro, a sua primeira estimativa será sempre um valor real, pelo facto de resultar de operações reais não inteiras. Para se obter uma solução final de posicionamento relativo, é necessário fixar as ambiguidades a valores inteiros. Esta operação de fixação tem lugar depois de se encontrar uma das várias soluções inteiras na vizinhança da solução real que conduza à melhor precisão, ou de uma outra forma, terá lugar se se verificar positivamente o teste estatístico da razão das variâncias, isto é, se a melhor das soluções é significativamente mais precisa que a segunda melhor. Estas soluções, por serem grandezas vectoriais, correspondem a combinações de escalares inteiros.

O raio da vizinhança da solução real, definido para a procura da solução inteira, é determinado em função da precisão do parâmetro de ambiguidade, de modo que, quanto maior for a precisão menor será o raio.

A convergência da solução real para o valor inteiro exacto das ambiguidades e, paralelamente, a convergência da respectiva precisão para um valor considerável, verifica-se com o aumento do período de observação. De tal modo, que a fixação rigorosa das ambiguidades a valores inteiros só é possível, de um modo geral, com períodos de observação superiores a 30 minutos para bases curtas e superior a 50 minutos para bases longas, ou seja, se existir um conjunto de observações suficientemente redundante ou, embora pouco redundante, de grande precisão.

A solução exacta do valor inteiro das ambiguidades conduz, obviamente, a uma precisão de posicionamento na ordem do milímetro e submilímetro, enquanto que, uma solução ligeiramente afastada dessa solução exacta (solução ligeiramente desviada até meio ciclo, sem fixação) conduzirá a uma precisão de posicionamento menos preciso, na ordem do centímetro ou mesmo decímetro.

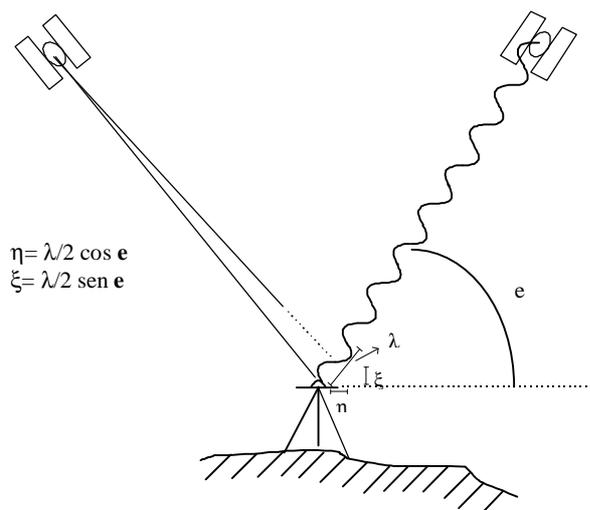


Fig. 2 - Desvios no posicionamento devidos ao erro de meio ciclo no valor da ambiguidade inicial da fase.

Como o comprimento da onda portadora L1 é de 19cm, e considerando que o máximo que se pode errar na determinação do valor das ambiguidades com 10 minutos de observação, salvo os casos em que exista ruído significativo nas observações, é de meio ciclo ($\cong 10\text{cm}$), então a

solução resultará com uma precisão dessa ordem, do decímetro ou ligeiramente superior. A Figura 2 mostra, para o caso de uma única observação, o desvio do posicionamento devido ao erro de meio ciclo no valor da ambiguidade da fase; como a elevação do satélite é $e \geq 15^\circ$ e considerando o respectivo comprimento de onda λ , resulta um desvio planimétrico de $\eta \leq 9.2\text{cm}$. Se se imaginar a intersecção dos vectores de vários satélites com uma imprecisão de meio ciclo durante cerca de 10 minutos, obteremos um elipsóide de erro com um raio médio (precisão de posicionamento) inferior ao decímetro.

A maior ou menor precisão das estimativas reais não inteiras das ambiguidades dependerá, obviamente, da maior ou menor precisão das observações, e esta, por sua vez, dependerá do maior ou menor ruído presente nessas observações.

O ruído nas observações provém das seguintes fontes: satélites; receptor e antena; e meio de propagação. Associado ao satélite encontram-se os erros das efemérides, do acesso selectivo e da nitidez do sinal em relação ao ruído de fundo (SNR - *Signal Noise Ratio*, razão sinal/ruído); associado ao receptor estão incluídos os erros do relógio e o ruído interno dos circuitos electrónicos; associado à antena estão os erros de multitrajecto (sinais indirectos ou reflectidos por superfícies próximas da antena, como o telhado de uma casa ou mesmo o próprio terreno), e ainda, a estabilidade da antena, a qual deve ser cuidada nos pontos de estacionamento rápido e sem qualquer suporte de fixação (Fig. 3); finalmente, associado ao meio de propagação encontram-se os erros da ionosfera e da troposfera.

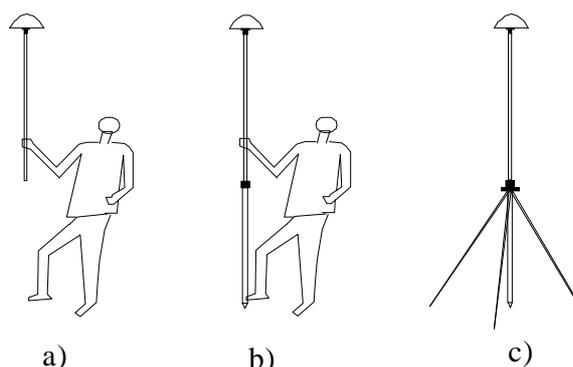


Fig. 3 - Apoio da antena de: má - a), razoável - b) e boa estabilidade - c).

Afectos à acção do operador encontram-se apenas os erros de multitrajecto (escolha dos pontos a coordenar) e de estabilidade da antena (operação de estacionamento). Esta última influência mostrou ser de importância considerável face aos resultados verificados, pois na prática a escolha de pontos bons no terreno nem sempre é fácil, necessitando-se, por vezes, de elevar a antena aos dois e três metros do nível do solo, e por uma questão de rapidez de operação torna-se bastante prático a utilização de bastões extensíveis como suporte da antena. Deverá, por isso, haver o cuidado de garantir ao máximo a estabilidade da antena, para o caso de bastões ou varas de suporte, aconselhasse sempre utilizar qualquer método de fixação.

4. Análise numérico/gráfica de alguns exemplos

A convergência dos valores da precisão do posicionamento em função do período de observação pode ser visualizada nos gráficos que a seguir se apresentam. Para a construção destes gráficos, além do período de observação fez-se também variar o comprimento da base e o número de satélites observados. Os dados utilizados para tal efeito são os de três bases geodésicas, duas curtas e uma longa, respectivamente, de 1548.2m (01-02), de 14931.1m (01-07) e de 48349.6m (01-10), os quais foram processados, para esta análise, pelo programa NUNCA de Antunes [1996].

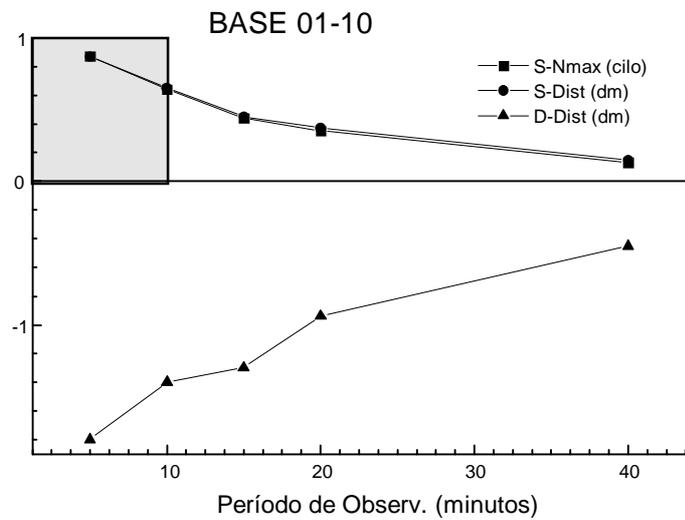
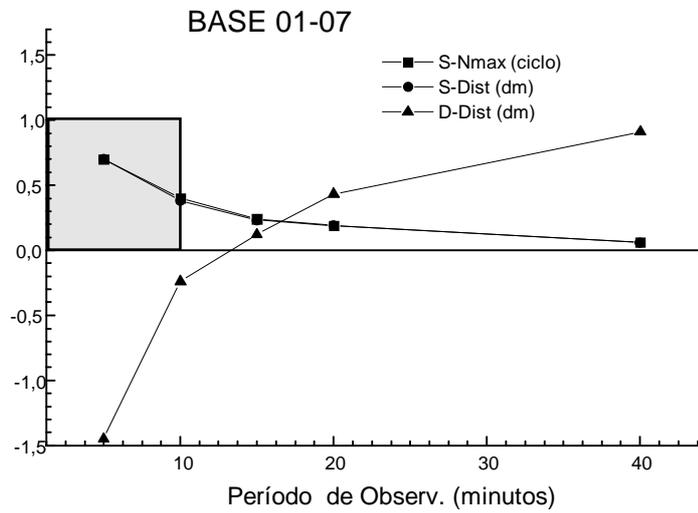
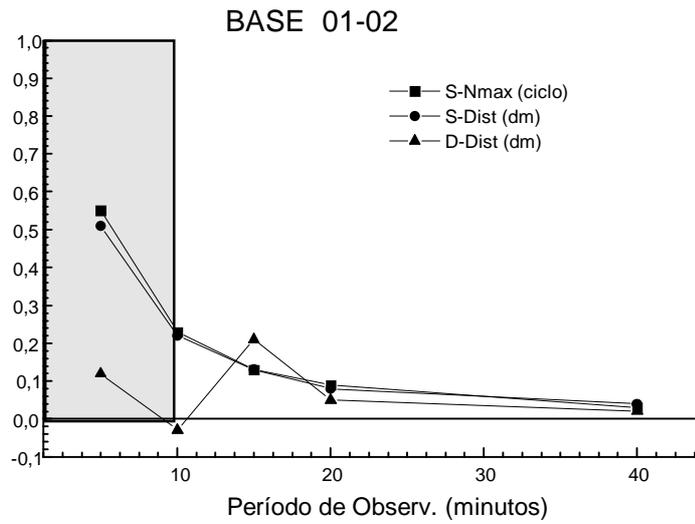


Fig. 4 - Gráficos da 1ª sessão das três bases, com 6 satélites observados.

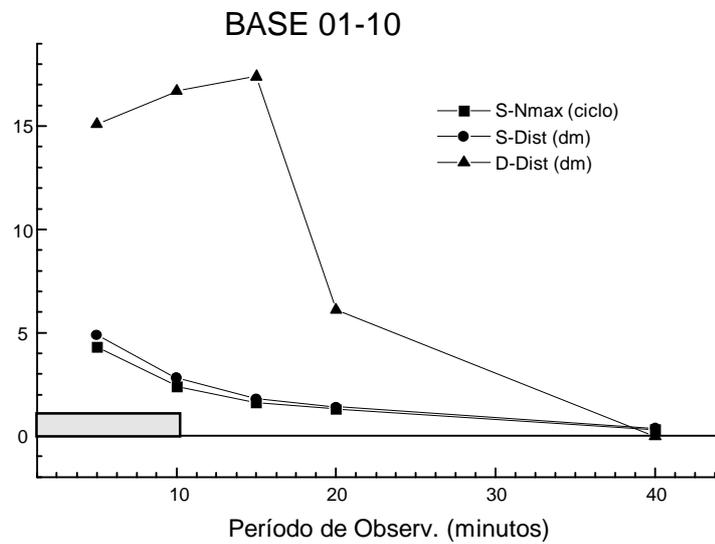
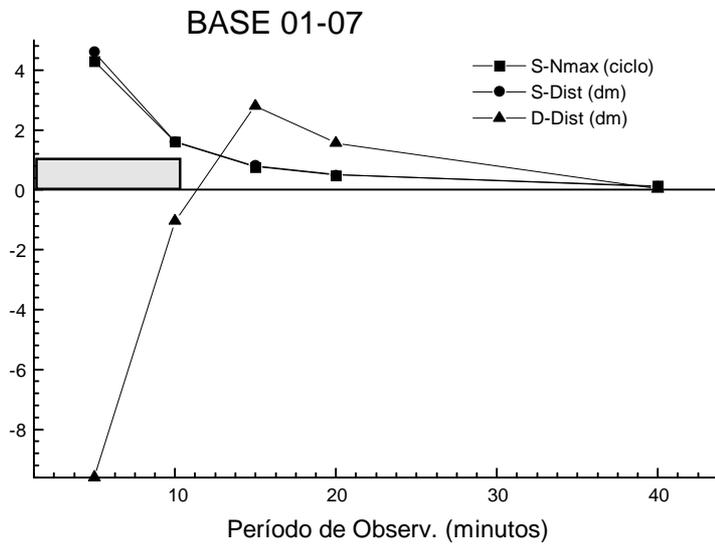
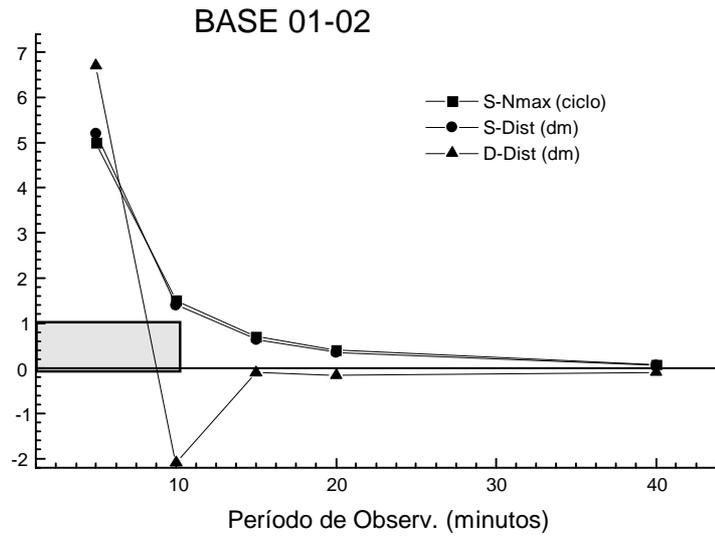


Fig. 5 - Gráficos da 2ª sessão das três bases, com 5 satélites observados.

Os gráficos representam a precisão das ambiguidades iniciais da fase, **S-Nmax** (o máximo dos respectivos valores), a precisão da distância das bases, **S-Dist**, e ainda, a diferença entre a distância obtida e o respectivo valor exacto, **D-Dist**. Para as três bases foram construídos dois gráficos com base em duas sessões, uma com 6 satélites e outra com 5 satélites observados, respectivamente, com os valores médios de PDOP de 2.6 e 4.0.

Nos gráficos estão representadas as zonas, a sombreado, correspondentes à **relação precisão/período** (10cm em 10min), de modo a poder evidenciar os casos onde a relação é conseguida. Pela leitura dos gráficos, verifica-se que é apenas na primeira sessão, exactamente com 6 satélites observados e o PDOP mais baixo, que essa relação é obtida. Embora esteja também incluída a base mais longa, verifica-se nesse caso um grande desvio no valor da distância da base, cerca de 1.5m; e aqui se pode dizer que boa precisão não se traduz em boa exactidão, a razão é o facto de ser uma base longa, portanto, com influência dos efeitos atmosféricos que actuam de forma sistemática. Na segunda sessão, com 5 satélites, as bases curtas necessitam de um período de observação mais longo, 15 minutos, de modo a obter-se a precisão do decímetro, enquanto que na base longa já é necessário chegar aos 30 minutos de observação.

Esta primeira análise reflecte a importância de uma boa configuração de satélites (PDOP's inferiores a 4), a fim de se obter precisão e exactidão.

Uma outra conclusão evidente é a grande analogia entre as curvas do valor máximo das precisões das ambiguidades e das precisões do valor das distâncias das bases (saliente-se a necessidade de reduzir as unidades métricas ao decímetro para se conseguir a coincidência). Estas curvas traduzem o comportamento das precisões de todos os parâmetros e que está directamente relacionadas com a precisão do ajustamento.

5. Altimetria por GPS

A coordenação altimétrica rigorosa por GPS exige o conhecimento, também rigoroso, das ondulações do *geóide* relativas ao WGS84, já que das observações GPS resulta, por conversão da solução $((X,Y,Z)_{WGS84} \Leftrightarrow (\varphi,\lambda,h)_{WGS84})$, a altitude elipsóidica.

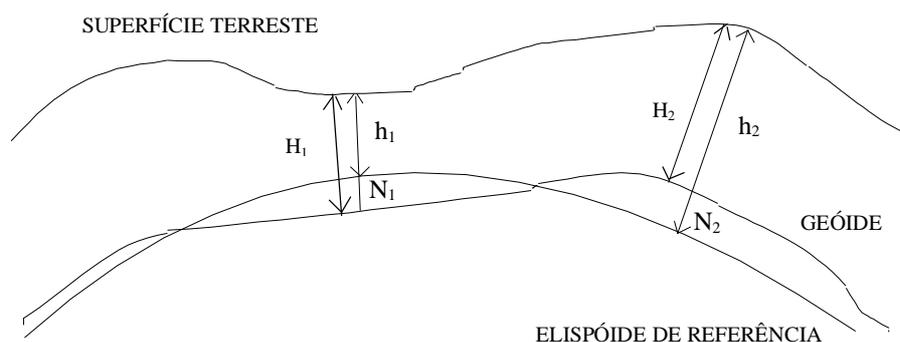


Fig. 4 - Relação altimétrica entre as superfícies terrestre, do geóide e do elipsóide.

Considerando as ondulações (N) positivas quando a superfície do geóide está acima da superfície do elipsóide de referência, então temos que

$$h=H+N \quad (1)$$

ou seja, a altitude elipsóidica é igual à altitude ortométrica mais a ondulação do geóide.

No posicionamento relativo, resulta-nos o desnível elipsóidico como solução e

$$h_2=h_1+\Delta h \quad (2)$$

Substituindo (1) na relação anterior temos para altitude ortométrica

$$H_2 = H_1 + \Delta h - \Delta N \quad (3)$$

Para as aplicações de produção cartográfica, com precisão decimétrica, o termo da variação da ondulação do geóide, ΔN , pode ser desprezado na maior parte das zonas do nosso território, existindo, no entanto, algumas zonas onde esta variação pode chegar aos 3-4cm/km (ver Romão *et. al.* [1995]) originando desvios de valor superior à precisão pretendida ($\sigma_n \leq 10\text{cm}$) para bases até 10-15Km. Nesses casos, para que os sistematismos devidos ao desprezo de ΔN sejam inferiores ao valor de precisão de 10cm, é necessário que as bases não ultrapassem os 2-3Km de comprimento, uma situação nem sempre possível devido às maiores distâncias a que se encontram os geodésicos. Por este facto, e só nestas situações de maior gradiente, não se deve dispensar o termo do geóide.

Admitindo esta possibilidade de utilizar o GPS para o transporte de cotas sem o conhecimento do geóide, este método de posicionamento fica, mais uma vez, condicionado à utilização de base curta, não dispensando, contudo, a utilização do geóide para os casos de maior rigor.

6. Conclusões

Conclui-se, então, que caso sejam garantidas as condições aqui indicadas, é possível obter posicionamentos com precisões na ordem do decímetro e mesmo superiores, utilizando receptores GPS de monofrequência e observando apenas por períodos de 10 minutos.

Da análise dos casos apresentados, impõem-se, em primeiro lugar, duas condições fundamentais: 1) utilizar base curta; e 2) observar com uma boa configuração de satélites - PDOP inferior a 4; na impossibilidade de se terem estas duas condições, dever-se-á prolongar o período de observação. A seguir, deve-se ter o cuidado em evitar: 3) o multitrajecto; e 4) a instabilidade da antena, por forma a garantir o mínimo de ruído nas observações. Finalmente, e caso as condições anteriores não se verificarem na integra, é aconselhável: 5) o recurso a duas bases de apoio, para dar maior constrangimento e, conseqüentemente, garantir maior precisão.

Saliente-se, ainda, a necessidade de se ter um bom receptor, isto é, um receptor que gere o mínimo ruído sobre as observações de fase, por forma a garantir estes resultados de precisão.

7. Referências bibliográficas

- Antunes, C. (1996), *Técnica Sequencial de Ajustamento no Problema da estimação linear Discreta*. Provas de Aptidão Pedagógica e Capacidade Científica, FCUL, Lisboa.
- Leick, A. (1989), *GPS Satellite Survey*. Edited by Jonh Willey & Sons, USA.
- Romão, M. S., J. Teixeira Pinto, H.C. Ribeiro (1995), *Geóide Astro-Geodésico em WGS84*. Cartografia e Cadastro - Revista do Instituto Português de Cartografia e Cadastro, Lisboa.
- Wells, D. E., *et. al.* (1986). *Guide to GPS Positioning*. Canadian GPS association, Fredericton, N.B., Canada.