

SISTEMA GEODÉSICO BRASILEIRO - NOVA CONCEPÇÃO

Luiz Paulo Souto Fortes*

INTRODUÇÃO

O desenvolvimento das atividades geodésicas em território brasileiro constitui atribuição do IBGE, que a vem desempenhando desde a década de 40 através da implantação e manutenção do Sistema Geodésico Brasileiro (SGB), definido pelo IBGE [1983]. Os métodos de levantamento utilizados ao longo dos anos foram predominantemente os terrestres (triangulação, trilateração, poligonação e nivelamento geométrico), com exceção dos empregados nas determinações plani-altimétricas realizadas principalmente na região amazônica a partir do rastreamento de satélites do Sistema TRANSIT.

Recentemente, o advento do Sistema de Posicionamento Global (GPS) tem sido responsável por uma verdadeira revolução nos procedimentos de determinação de coordenadas geodésicas (latitude, longitude e altitude). Os métodos a ele associados são capazes de realizar as mesmas tarefas com maior precisão e rapidez, além de per-

mitir sua aplicação em tempo real (navegação), o que não era possível com os métodos clássicos. A única restrição ainda existente consiste nas limitações de precisão existentes na determinação de altitudes, originadas não na precisão do GPS, mas na qualidade do Mapa Geoidal do Brasil disponível na atualidade [Blitzkow et al, 1992].

O IBGE vem utilizando o sistema GPS desde 1988 em campanhas experimentais, projetos de pesquisa nacionais e internacionais e em algumas atividades de implantação e manutenção do SGB. Entretanto, as características e potencialidades do GPS levaram a instituição a modificar a concepção do SGB, a partir da proposta de desenvolvimento do projeto intitulado REDE BRASILEIRA DE MONITORAMENTO CONTÍNUO DO SISTEMA DE POSICIONAMENTO GLOBAL - RBMC [Fortes & Godoy, 1991]. Neste projeto, cada estação participante apresentará um perfil *ativo*, uma vez que, além dos dados posicionais, fornecidos tradicionalmente para as estações pertencentes às redes

* Engenheiro Cartógrafo do Departamento de Geodésia (DEGED), da Diretoria de Geociências da Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

clássicas, o IBGE tornará disponível aos usuários as observações GPS obtidas nas estações a partir do rastreamento permanente dos satélites GPS. Para tanto, cada estação estará dotada de um receptor de satélites GPS de última geração, computador dedicado, linha de comunicação de dados para a sede do Departamento de Geodésia, no Rio de Janeiro, dispositivos de coleta automática de dados atmosféricos etc, para citar alguns componentes.

A RBMC, assim estabelecida, constituirá a infra-estrutura necessária à utilização do Sistema GPS em toda a sua plenitude, contemplando inclusive as aplicações de navegação, que a rede atual não atende.

Considerando ser o IBGE o órgão brasileiro normatizador dos levantamentos geodésicos, onde inclui-se o GPS, e a urgente necessidade de se difundir conceitos, normas e especificações que contribuam para a capacitação dos usuários, encontra-se, a seguir as ESPECIFICAÇÕES E NORMAS GERAIS PARA LEVANTAMENTOS GPS (PRELIMINARES). Este documento fornece informações que possibilitarão a adequada utilização do SGB com o novo perfil definido pela RBMC.

ESPECIFICAÇÕES E NORMAS GERAIS PARA LEVANTAMENTOS GPS (PRELIMINARES)

O IBGE, como órgão gestor do Sistema Geodésico Brasileiro (SGB), tem por atribuição a elaboração de normas e especificações para levantamentos geodésicos, dentre outras não menos importantes. Em cumprimento a esta responsabilidade, o IBGE publicou em 01 de agosto de 1983, no Boletim de Serviço nº 1602, a Resolução do Presidente nº 22 de 21 de julho de 1983, contemplando o assunto. Posteriormente, este documento foi atualizado no que concerne à metodologia de transformação entre os sistemas geodésicos NWL-10D, NSWC-9Z2, WGS-84 e o SAD-69, através da publicação da Resolução do Presidente nº 23 de 21 de fevereiro de 1989.

Por outro lado, a experiência adquirida por vários anos de árduo trabalho de im-

plantação e manutenção do SGB, aliada ao dinamismo inerente à ciência geodésica, mostrou a necessidade da realização de uma revisão nas normas publicadas em 1983, adicionalmente à atualização ocorrida em 1989.

A necessidade sinalizada no parágrafo anterior foi acrescida àquela advinda do surgimento do Sistema de Posicionamento Global, mundialmente conhecido por GPS (*Global Positioning System*). Este documento, desta forma, encerra os primeiros esforços no sentido da elaboração de normas e especificações para levantamentos GPS com vistas a dotar a comunidade cartográfica nacional de elementos básicos norteadores dos serviços de posicionamento que utilizam os métodos a ele associados.

Considerando a rápida evolução a que ainda estão sujeitos os equipamentos, técnicas de observação, aplicações e *software*, além do fato do sistema ainda não estar totalmente implantado, é praticamente impossível estabelecer no momento especificações rígidas. A complementação da constelação de satélites definitiva, a implementação da disponibilidade seletiva (*Selective Availability - SA*) e da criptografia do código P (*Anti-Spoofing - AS*) irão certamente afetar as potencialidades do sistema.

Considerando o vasto número de aplicações já existentes, as que ainda serão desenvolvidas e a área de atuação do IBGE, este documento destaca as especificações para posicionamento geodésico relativo com GPS.

CONCEITOS

Os estudos iniciais para desenvolvimento do sistema GPS datam de 1973. Concebido inicialmente para contornar as limitações existentes no sistema TRANSIT, principalmente aquelas relativas à navegação, o GPS foi projetado de forma que em qualquer lugar do mundo e a qualquer momento existam pelo menos quatro satélites acima do plano do horizonte do observador. Esta situação garante a condição geométrica mínima necessária à navegação em tempo real com o sistema. Posteriormente, cientistas e pesquisadores no mun-

TABELA 1
Satélites GPS operacionais em

Novembro/92

NAVSTAR (SVN)	PRN (SV)	BLOCO
8	11	I
9	13	I
10	12	I
11	03	I
13	02	II
14	14	II
15	15	II
16	16	II
17	17	II
18	18	II
19	19	II
20	20	II
21	21	II
23	23	II
24	24	II
25	25	II
26	26	II
27	27	II
28	28	II

do todo começaram a descobrir e explorar as potencialidades do sistema, não só aquelas destinadas à navegação. Com isto, surgiram as aplicações na área da geodésia, geodinâmica, cartografia, etc., atingindo níveis de precisão inalcançáveis com os métodos clássicos utilizados até então, para surpresa dos próprios idealizadores do sistema.

O sistema, também chamado de NAVSTAR (*NAVigation Satellite Time And Ranging*) GPS devido às suas aplicações originais de navegação, subdivide-se em três segmentos: espacial, de controle e do usuário.

O segmento espacial é composto pela constelação de satélites. Quando o sistema estiver completamente implantado, serão 21 satélites em operação, com mais três de reserva (total de 24), orbitando a uma altitude de 20 000 km aproximadamente, em seis planos orbitais com inclinação de 55°, com um período de revolução de 12 horas siderais, o que acarreta que a configuração dos satélites se repete 4 minutos mais cedo diariamente em um mesmo local.

A função do segmento espacial é gerar e transmitir os sinais GPS (códigos, portadoras e mensagens de navegação). Estes sinais são derivados da frequência

fundamental f^o de 10,23 Mhz, apresentando a seguinte estrutura:

Ondas Portadoras:

$$L1 = 154 \cdot f^o = 1575,42 \text{ Mhz}$$

$$L2 = 120 \cdot f^o = 1227,60 \text{ Mhz}$$

Modulados em fase com as portadoras, os códigos são seqüências de +1 e -1 (*Pseudo Random Noise codes - PRN codes*), emitidos a frequências de :

$$\text{Código C/A: } f^o/10 = 1,023 \text{ Mhz}$$

$$\text{Código P: } f^o = 10,23 \text{ Mhz}$$

O código C/A (*Coarse/Acquisition code*) se repete a cada 1 milissegundo, enquanto que o P (*Precision code*) a cada 267 dias. Este período de 267 dias é subdividido em segmentos de sete dias, sendo atribuída a cada satélite a seqüência de código para um segmento. Isto dá origem ao sistema de identificação dos satélites que utiliza o número do segmento do código PRN. Por exemplo, o satélite SV 19 ou PRN 19 é aquele que transmite o décimo nono segmento do código PRN. Outro sistema de identificação consiste no número sequencial de lançamento. Por exemplo, o número sequencial de lançamento do PRN 02 é NAVSTAR 13. A Tabela 1 relaciona a identificação dos 19 satélites, atualmente em operação, segundo os dois sistemas de numeração. Destes, os SV03, SV11, SV12 e SV13 pertencem ao Bloco I, formado pelos satélites experimentais (protótipos) do sistema. Os restantes (SV02, SV14, SV15, SV16, SV17, SV18, SV19, SV20, SV21, SV23, SV24, SV25, SV26, SV27 e SV28) fazem parte do Bloco II, correspondente à constelação definitiva dos 21.

Além destes, ainda existe o código Y, similar ao P, sendo gerado, entretanto, a partir de uma equação secreta (*anti-spoofing*). No futuro, poderá ser permanentemente implementado no lugar do P, a fim de que o acesso à correspondente qualidade dos resultados da navegação em tempo real seja restrito aos usuários militares americanos e seus aliados.

A portadora L1 é modulada com os códigos C/A e P (ou Y), enquanto L2 apenas com o P (ou Y). Ambas as portadoras carregam a mensagem de navegação, que consiste em uma seqüência de dados transmitidos a 50 bps (bits por segundo) destinados a informar aos usuários sobre a

saúde e posição dos satélites (efemérides transmitidas). Estas efemérides nem sempre satisfazem às necessidades de todos os usuários (por exemplo, em estudos de geodinâmica), o que tem levado diversos grupos a implantar redes de monitoramento contínuo dos satélites GPS com vistas ao cálculo de efemérides precisas. Como exemplo, podemos citar: o *U. S. Naval Surface Weapons Center (NSWC)*, que utiliza 4 estações da Defense Mapping Agency (DMA), adicionais às do segmento de controle, para o processamento; o *U. S. National Geodetic Survey (USNGS)*, que administra a rede *CIGNET (Cooperative International GPS Network)*, com estações distribuídas pelo mundo (o acesso às efemérides pode se dar através do *U.S. Coast Guard GPS Information Center - GPSIC - bulletin board service*); a Associação Internacional de Geodésia (*International Association of Geodesy - IAG*), coordenadora do *International GPS Geodynamics Service (IGS)*, que é um serviço internacional do qual participam instituições de todo o mundo na qualidade de estação de observação, centro de dados, centro de processamento ou bureau central. O Brasil participa com a implantação de estações fiduciais de observação em Brasília e Curitiba, cujos dados observados são retransmitidos eletronicamente para um centro global da rede, situado no *Crustal Dynamics Data Center (CDDIS)*, da NASA. Uma outra estação GPS e VLBI (*Very Long Baseline Interferometry*), ainda, está sendo instalada em Fortaleza como resultado de uma cooperação com o USNGS. O serviço IGS proporcionará inúmeros produtos, dentre os quais efemérides precisas. A participação brasileira com as estações mencionadas garantirá a qualidade das efemérides em levantamentos executados em território nacional; e, finalmente, o IBGE, além da participação no serviço IGS, está desenvolvendo a Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo do Sistema GPS (RBMC) que, a partir da interseção com estações da rede IGS, propiciará uma estrutura geodésica de controle altamente precisa, permitindo a aplicação da técnica de integração e relaxação orbital em posicionamentos onde busca-se precisões iguais ou melhores que 0,1 partes por milhão (ppm). Acrescenta-se que, pela filosofia de desenvolvimento da RBMC, os

usuários precisarão apenas de um equipamento para a execução de levantamentos geodésicos.

O sistema geodésico adotado para referência, tanto das efemérides transmitidas quanto das precisas é o *World Geodetic System de 1984 (WGS-84)*. Isto acarreta que os resultados dos posicionamentos realizados com o GPS referem-se a este sistema geodésico, devendo ser transformados para o sistema SAD-69, adotado no Brasil, através da aplicação da metodologia estabelecida na Resolução do Presidente do IBGE nº 23 de 21 de fevereiro de 1989. Ressalta-se que o GPS fornece resultados de altitude elipsoidal, o que torna obrigatório o emprego do Mapa Geoidal do Brasil, publicado pelo IBGE, para a obtenção de altitudes referenciadas ao geóide (nível médio dos mares).

O segmento de controle é responsável pela operação do sistema GPS. A função principal deste segmento é atualizar a mensagem de navegação transmitida pelos satélites. Para o alcance deste objetivo, o segmento de controle consiste de estações de monitoramento distribuídas pelo mundo (Ascencion, Colorado Springs, Diego Garcia, Kwajalein e Hawaii). Estas estações rastreiam continuamente todos os satélites visíveis e estes dados são transmitidos para a estação de controle mestre (*Master Control Station*), em Colorado Springs, EUA, onde são processados com a finalidade de determinação das efemérides e das correções aos relógios dos satélites. A mensagem atualizada é, então, transferida para os satélites, para que seja retransmitida aos usuários. Esta transferência pode ocorrer, eventualmente, mais de uma vez por dia.

O segmento dos usuários está associado às aplicações do sistema. Refere-se a tudo que se relaciona com a comunidade usuária (receptores, algoritmos, *software*, etc) com vistas à determinação da posição, velocidade e/ou tempo.

Os receptores, de uma forma geral, podem ser classificados segundo as aplicações a que se destinam. E como as aplicações estão intimamente ligadas ao tipo de sinal GPS utilizado, os tipos de receptores diferenciam-se segundo a(s) componente(s) do sinal que é(são) rastreada(s). Basicamente, existem aqueles que se destinam às aplicações de posicionamento em tempo real (navegação), carac-

terizando-se pela observação do(s) código(s) C/A (e P); e os que são utilizados em aplicações estáticas, que observam principalmente a fase da(s) portadora(s) L1 (e L2). Naturalmente, são muitas as alternativas existentes no mercado em relação aos tipos de equipamento disponíveis e em desenvolvimento. E esta situação ainda está longe de alcançar uma estabilidade, de forma que a descrição detalhada de todas as opções mostra-se inadequada. Entretanto, cabe destacar apenas algumas características dos equipamentos *atuais* para fins geodésicos, uma vez que a sua proliferação entre instituições nacionais públicas e privadas já é significativa. Estes equipamentos, que buscam em última instância tornar disponíveis aos usuários as observações da fase da onda portadora, rastreiam também, pelo menos, o código C/A. Como L1 é modulada com os códigos, a disponibilidade do C/A permite a recuperação de L1. No caso de determinações onde se busca altas precisões ou localizadas em zonas de forte atividade da ionosfera (Receptores de uma e duas frequências), o equipamento deve também rastrear L2. Mas, como L2 é modulada apenas com o código P, a sua recuperação é implementada nos receptores de duas formas: a primeira delas, através da geração de uma réplica do código P no receptor, já que este código está disponível atualmente; a outra técnica consiste na quadratura da onda (*squaring*), uma vez ser o código uma sequência de ± 1 . O primeiro método apresenta vantagens quanto à qualidade da onda resultante, enquanto que o segundo dispensa o conhecimento do código, o que pode vir a ser uma vantagem quando o sistema estiver totalmente operacional e houver a implementação do código Y. A utilização do código P, ainda, pode ser vantajosa em situações de baixa qualidade das observações por ocorrência de frequentes perdas de sinal (*cycle slips*).

Em função dos avanços mais recentes da tecnologia, os equipamentos de última geração já conseguem, segundo os fabricantes, observar os códigos em L1 e L2, mesmo em períodos de criptografia do código P. As soluções baseiam-se no fato de que o código preciso, apesar de secreto, é o mesmo nas duas frequências portadoras, dando origem ao que está se denominando

de correlação cruzada (*cross-correlation*) dos códigos precisos.

O sistema GPS fornece dois tipos de observação diretamente associados à componente do sinal rastreado: pseudo-distâncias, obtidas a partir da observação dos códigos, e fases das portadoras.

A observação dos códigos propicia a medida do tempo de propagação do sinal entre um determinado satélite e o receptor, que multiplicado pela velocidade da onda eletromagnética ocasiona o conhecimento da distância percorrida pelo sinal. Portanto, a observação de pelo menos três satélites proporciona a situação geométrica mínima para a determinação isolada das coordenadas do centro elétrico da antena do receptor. Como os receptores apresentam osciladores não tão estáveis como os dos satélites, inclui-se na modelagem matemática da solução do problema uma incógnita a mais correspondente à correção associada ao relógio do receptor, o que eleva para 4 o número mínimo de satélites necessários à determinação e denomina-se *pseudo-distância* a observação correspondente. As aplicações que utilizam este tipo de observação são aquelas que buscam primordialmente o posicionamento em tempo real (navegação). Pela geometria do problema, um fator que se reveste da maior importância no tocante à propagação de erros, e conseqüentemente à qualidade das determinações, é a disposição geométrica dos satélites. Denomina-se DOP (*Dilution Of Precision*) os fatores que descrevem este efeito. Matematicamente, estes fatores são função dos elementos da diagonal da matriz variância-covariância dos parâmetros ajustados, podendo ser calculados previamente a partir do conhecimento das coordenadas aproximadas da localidade e das órbitas preditas dos satélites. Os tipos de fatores são: HDOP (efeito da geometria dos satélites nas coordenadas planimétricas), VDOP (idem, para a altitude), PDOP (idem, para a posição tri-dimensional), TDOP (idem, para o tempo) e GDOP (idem, para a posição e o tempo). Quanto maior os valores numéricos dos fatores, pior a qualidade da determinação correspondente, ou seja, maior a influência dos erros de observação nos resultados do posicionamento. Geometricamente, demonstra-se que o GDOP é inversamente proporcional ao volume do

tetraedro formado pelos quatro raios vetores unitários definidos pelo receptor e os satélites.

As observações das fases das ondas portadoras, analogamente àquelas obtidas a partir dos códigos, também fornecem indiretamente a medida da distância receptor-satélite. Entretanto, neste caso específico, como o que se mede é a diferença de fase entre o sinal que chega do satélite e o gerado pelo oscilador do receptor, existe uma incógnita adicional na observação da distância, denominada de *ambigüidade*, que é o número inteiro de ciclos que a onda levou para chegar ao receptor no início do período de rastreamento. Por este motivo, estas observações normalmente não são utilizadas em tempo real, sendo aplicadas para posicionamentos estáticos. Devido ao fato de que a observação representa uma fração da fase da portadora, o termo *interferometria* é usado frequentemente para descrever as técnicas correspondentes.

Um conceito extremamente importante relacionado às técnicas de levantamento com o sistema GPS é o de posicionamento relativo. Tanto as observações de código quanto as da fase das portadoras podem ser tratadas a partir de pelo menos duas estações observadoras simultâneas dos mesmos satélites. Esta consideração proporciona a minimização, ou até mesmo o cancelamento, dos efeitos de alguns erros sistemáticos que incidem de forma semelhante em ambas as estações (erros das órbitas dos satélites, refração troposférica e ionosférica etc). No caso dos códigos, a técnica associada denomina-se DGPS (*Differential GPS*), sendo largamente empregada em navegação. No caso da fase da portadora, as observações são combinadas linearmente, dando origem às seguintes observações derivadas: *simples diferença de fase*, quando diferencia-se as observações de fase de duas estações para o mesmo satélite; *dupla diferença de fase*, quando diferencia-se as diferenças simples para dois satélites; e *tripla diferença de fase*, quando diferencia-se a dupla diferença no tempo. O objetivo da combinação linear das observações é o cancelamento de incógnitas no ajustamento, a saber:

simples diferença: cancelam-se os erros dos relógios dos satélites:

dupla diferença: cancelam-se os erros dos relógios dos satélites e dos receptores;

tripla diferença: cancelam-se os erros dos relógios dos satélites, dos receptores e as ambigüidades.

Das combinações acima, a mais empregada é a dupla diferença de fase, por corresponder ao modelo matemático que fornece a melhor rigidez geométrica para a solução. A tripla diferença, por não conter parâmetros associados às ambigüidades, é utilizada às vezes em determinações relativas de longas linhas de base (>100 km), quando a qualidade dos resultados das duplas diferenças não se mostra satisfatória.

O fator DOP relacionado ao posicionamento relativo com a fase das portadoras denomina-se RDOP. Descreve o efeito da geometria dos satélites na qualidade do(s) raio(s) vetor(es) definido(s) pelas estações envolvidas no levantamento.

As observações de fase das portadoras podem, evidentemente, ser utilizadas para a determinação de posições isoladas. Entretanto, devido aos excelentes resultados que são obtidos com o posicionamento relativo, não foram desenvolvidas as técnicas necessárias a esta aplicação. Por outro lado, as aplicações relativas têm sido largamente empregadas e otimizadas. Atualmente, destacam-se as seguintes técnicas de posicionamento:

Posicionamento Estático: dois ou mais receptores fixos observam os mesmos satélites durante uma hora ou mais, sendo determinadas as componentes do(s) raio(s) vetor(es) definido(s) pelas estações com uma precisão de 1 a 2 partes por milhão (ppm);

Posicionamento Cinemático Contínuo e Semi-cinemático (*stop-and-go*): um receptor é mantido fixo enquanto outro(s) é(são) móvel(is); no caso do Cinemático Contínuo, adota-se uma taxa de observação de apenas um segundo, enquanto que no caso do Semi-cinemático o tempo de ocupação nas estações móveis é reduzido a alguns minutos (no mínimo 2 segundos, ou seja, o suficiente para serem realizadas as observações em duas épocas distintas); a(s) antena(s) móvel(is) retorna(m) à posição inicial; necessidade de se definir as ambigüidades no início do processo, através do rastreamento de uma base conhecida, ou do rastreamento de uma linha de base segundo a técnica

ca do posicionamento estático ou ainda através do procedimento de troca de antenas (*swap*); os sinais devem ser continuamente rastreados, evitando-se obstruções no percurso, a fim de que os valores determinados para as ambiguidades permaneçam válidos durante o levantamento;

Posicionamento Pseudo-cinemático ou Pseudo-estático um receptor é mantido fixo enquanto outro(s) itinerante(s) ocupa(m) a(s) mesma(s) estação(ões) mais de uma vez (2 ou 3), durante períodos de tempo de alguns minutos (2 segundos, no mínimo, para serem observadas duas épocas distintas), separados por pelo menos uma hora; não é necessário manter-se o rastreamento durante o deslocamento do(s) receptor(es) itinerante(s), podendo-se inclusive desligá-lo(s).

Recentemente, duas outras técnicas de posicionamento têm sido pesquisadas, com sucesso, no sentido de otimizar ainda mais os levantamentos GPS. O *Posicionamento Estático-Rápido (FastStatic)* corresponde ao pseudo-cinemático (pseudo-estático) sem a necessidade de ocupação da(s) estação(ões) itinerante(s) mais de uma vez. Já a técnica de *Solução das Ambigüidades em Tempo Real (Ambiguities Fixing on the Fly)*, equivale ao estático-rápido com o receptor itinerante se movendo continuamente. Ambas as técnicas adotam soluções que utilizam simultaneamente os quatro tipos de observação proporcionados pelo sistema: fases das portadoras e códigos em L1 e L2.

As técnicas de posicionamento relativo revestem-se de grande importância quando considera-se a implementação da degradação da qualidade proporcionada pelo sistema. Devido ao fato do GPS ter sido desenvolvido principalmente por razões de cunho militar, o Departamento de Defesa dos EUA projetou as seguintes técnicas:

Disponibilidade Seletiva (Selective Availability - SA): técnica de degradação deliberada da estabilidade dos relógios dos satélites e da mensagem por eles transmitida; já implementada nos satélites do Bloco II;

Anti-spoofing (AS): técnica de criptografia do código P, dando origem ao código Y; em fase de testes de implementação;

Considerando que o posicionamento relativo minimiza erros sistemáticos associados aos relógios dos satélites e às

efemérides, espera-se que, para estas aplicações, a implementação da SA não constitua maiores problemas, no caso da separação das estações não ser muito grande (<100 km). Tratando-se da técnica de AS, a maioria dos receptores utiliza o código C/A ou possuem alternativas implementadas para o caso do código P ser criptografado (por exemplo, a disponibilidade da quadratura do sinal - *squaring*, ou a utilização da técnica de correlação cruzada - *cross correlation*, desenvolvida recentemente por imposição dos métodos estático-rápido e solução das ambigüidades em tempo real). Portanto, a degradação dos sinais representa um problema apenas para os usuários que buscam o posicionamento isolado, o que prejudica a maioria das aplicações tradicionais em tempo real. Os serviços proporcionados pelo GPS são subdivididos em dois tipos, de acordo com o acesso do usuário às informações:

Serviço de Posicionamento Preciso (Precise Positioning Service - PPS): os usuários deste serviço têm acesso aos dados dos relógios dos satélites não adulterados, às correções às efemérides transmitidas e ao código descifrado; são os militares americanos, os aliados e os amigos privilegiados;

Serviço de Posicionamento Padrão (Standard Positioning Service - SPS): os usuários deste serviço acessam os dados GPS como são transmitidos, com todos os tipos de degradação e criptografia; é a comunidade civil, de uma forma geral.

CLASSIFICAÇÃO DOS LEVANTAMENTOS GPS

A revolução que o sistema GPS vem trazendo aos procedimentos de levantamentos geodésicos pode ser avaliada pela classificação dos levantamentos executados com a sua utilização. Conforme o Boletim de Serviço 1602 de 01 de agosto de 1983, que contempla as Especificações e Normas Gerais para Levantamentos Geodésicos, a categoria de alta precisão (âmbito nacional) subdivide-se em dois subgrupos: científico e fundamental (ou de 1ª ordem), com precisões associadas melho-

res que 1/500.000 e 1/100.000, respectivamente. Na ocasião que aquele documento foi redigido, o IBGE era praticamente a única instituição capaz de executar levantamentos fundamentais, sendo que os científicos requeriam equipamentos e técnicas de alta complexidade e elevado custo, tais como SLR (*Satellite Laser Ranging*), LLR (*Lunar Laser Ranging*) e VLBI. No entanto, os posicionamentos geodésicos com o GPS, já nos dias de hoje, são capazes de facilmente fornecer resultados com precisões da ordem de 1 a 2 ppm (1/1.000.000 a 1/500.000), passíveis de serem obtidos por qualquer empresa usuária de receptores que observam a fase da portadora.

Considerando as aplicações do sistema, pode-se identificar perfeitamente três categorias no nível científico:

Geodinâmica Global e Regional; medidas de deformação: nesta categoria, as exatidões almejadas são melhores que 0,01 ppm; representam os trabalhos conduzidos internacionalmente, com objetivos tais como estudo da deriva continental, determinação do movimento do polo, etc (por exemplo, serviço IGS); normalmente, emprega-se a técnica de integração orbital no processamento das observações;

Sistemas Geodésicos Nacionais (redes primárias); geodinâmica regional e local; medidas de deformação: nesta categoria, busca-se exatidões melhores que 0,1 ppm; enquadra-se nesta categoria a estrutura de controle definida pelas estações pertencentes à RBMC e as determinações dela decorrentes efetuadas com a técnica de relaxação orbital;

Sistemas Geodésicos Nacionais (redes secundárias); geodinâmica local; medidas de deformação; levantamentos de engenharia altamente precisos: esta categoria contempla os trabalhos determinantes de resultados com exatidões melhores que 1 ppm; consistem nos levantamentos de densificação do SGB realizados tanto pelo IBGE quanto por outras empresas.

Pelo exposto acima, verifica-se que o advento do Sistema de Posicionamento Global é responsável por uma melhoria de qualidade da rede de alta precisão do SGB

de pelo menos 100 vezes (de 1/100.000 ou 10 ppm para 0,1 ppm). Este fato reveste-se da maior importância no momento atual, quando inúmeras empresas usuárias do sistema se surpreendem ao obter resíduos da ordem de 10ppm em ajustamentos realizados a partir de levantamentos GPS apoiados em mais de um ponto da rede clássica do SGB. Considerando que os serviços foram executados segundo os padrões de posicionamento geodésico diferencial com GPS, os resultados encontrados traduzem a situação de densificação de uma rede geodésica por um método que fornece uma precisão maior que a da própria rede. Esta situação será naturalmente contornada por ocasião da conclusão do projeto de ajustamento da rede planimétrica de alta precisão do SGB, ora em andamento, uma vez que estão sendo utilizadas observações GPS para controle e aumento da rigidez da rede.

Considerando o vasto espectro de aplicações do sistema, a Tabela 2 relaciona didaticamente as técnicas disponíveis, tipos de observação e precisões alcançadas. É importante reafirmar que o GPS está em processo de implantação, de forma que as informações fornecidas retratam a situação atual. Acrescenta-se que as precisões assinaladas referem-se tanto ao posicionamento horizontal quanto ao vertical. Entretanto, cabe destacar que a qualidade vertical está associada à superfície de referência adotada em posicionamentos por satélite, ou seja, o elipsóide de revolução. Portanto, isto significa que o GPS fornece, com aquelas qualidades, valores de altitude elipsoidal. Considerando que normalmente a referência adotada para as altitudes é o geóide e não o elipsóide, há a necessidade de se adicionar os valores de ondulação geoidal, obtidos a partir do Mapa Geoidal do Brasil, aos resultados altimétricos do GPS a fim de serem obtidos os valores de altitude referenciados ao geóide. Atualmente, a qualidade dos valores de ondulação geoidal obtidos do mapa é inferior à fornecida pelo GPS, o que ocasiona que o erro das determinações altimétricas derivadas do GPS é proveniente, principalmente, do mapa geoidal.

TABELA 2
Técnicas de Posicionamento com o sistema GPS

TÉCNICA	APLICAÇÕES	OBSERVAÇÃO	PRECISÃO (sem S.A.)	PRECISÃO (com S.A.)
Ponto Isolado instantâneo	Navegação	código C/A (Pseudo-distância)	30 m	120m
	Reconhecimento	código P (Pseudo-distância)	20 m	120m
DGPS	Navegação	código C/A (Pseudo-distância)	1 a 10 m	1 a 10 m
	Engenharia	código P (Pseudo-distância)	(1) ND	(1) ND
Ponto Isolado acumulado	Topografia	código C/A (Pseudo-distância)	20 m	(1) ND
	Engenharia	código C/A e P (Pseudo-distância)	3 m	(1) ND
Diferencial com código acumulado	Topografia	código C/A (Pseudo-distância)	3 a 5 m	3 a 5 m
	Engenharia	código P (Pseudo-distância)	1m	1m
Interferometria (Estático)	Geodésia (bases curtas)	portadora L1	2 ppm	2 ppm
	Geodésia	portadoras L1 e L2	1 ppm	1 ppm
Interferometria (Cinemático)	Geodésia (bases curtas)	portadora L1	2 ppm	2 ppm
		portadoras L1 e L2	1 ppm	1 ppm
Interferometria (Pseudo-Cinemático)	Geodésia	portadora L1	2 ppm	2 ppm
		portadoras L1 e L2	1 ppm	1 ppm
Estático-Rápido e Solução de Ambigüidades em Tempo Real	Geodésia	portadoras e código P em L1 e L2 (sem S.A.)	1 ppm	1 ppm
		portadoras, código C/A em L1 e correlação cruzada do código P (com S.A.)		
Relaxação Orbital	Geodésia (fins científicos)	portadoras L1 e L2	0,1 ppm	0,1 ppm
Integração Orbital	Geodinâmica	portadoras L1 e L2	0,01 ppm	0,01 ppm

(1) ND - não definido

RECOMENDAÇÕES PRELIMINARES PARA POSICIONAMENTO GEODÉSICO DIFERENCIAL COM GPS

SELEÇÃO DE EQUIPAMENTOS

Receptores e Antenas

Considerando que a precisão geodésica só é alcançada com o posicionamento relativo, pelo menos dois receptores devem ser utilizados em qualquer projeto (até a operacionalização da RBMC). Entretanto, devido às vantagens decorrentes do uso de um número maior de receptores (aumento da produção, conexão múltipla a estações adjacentes, repetição de linhas de base e maior rigidez geométrica), o emprego de um mínimo de quatro receptores otimiza a relação custo/benefício.

Receptores de diferentes modelos ou fabricantes podem ser usados em um mesmo projeto (calibração). Entretanto, deve-se garantir a simultaneidade das observações através da seleção de intervalos de tempo apropriados entre épocas medidas (taxa de observação). Além disto, os fabricantes devem suprir rotinas de conversão dos diferentes formatos de arquivos de observação gravados pelos diferentes receptores para um formato único, de forma a ser possível a formação das duplas diferenças de fase em um processamento simultâneo. Recomenda-se a adoção do formato RINEX2 (*Receiver Independent Exchange Format Version 2*) como formato único.

Apesar de ser admissível o uso de diferentes receptores em um mesmo projeto, ressalta-se que cada tipo de antena possui a sua própria definição do centro de fase, que varia, inclusive, com a direção do satélite que está sendo rastreado. Recomenda-se, portanto, o uso do mesmo tipo de

antena para todos os receptores, de forma que sejam minimizados os erros sistemáticos provenientes de diferentes definições de centros de fase. Além disto, idealmente deve ser selecionado o tipo de antena que apresente a menor sensibilidade aos efeitos de multicaminhamento da onda (*multipath*) e a menor variação de centro de fase.

Receptores de uma e duas frequências

Para levantamentos onde se busca uma maior precisão em longas linhas de base ou em áreas de forte atividade ionosférica, recomenda-se o uso de receptores de duas frequências (L1 & L2). Os distúrbios na ionosfera podem causar a perda do sinal, ocasionando aparentemente dados com ruídos. Os ruídos podem ter a dimensão de um ciclo ou mais, tornando impossível distinguir entre variações da ionosfera e perda de ciclos (*cycle slips*). Com receptores de duas frequências, os efeitos principais da refração ionosférica podem potencialmente ser corrigidos, sendo que os que recuperam L2 (e até L1) a partir da geração de uma réplica do código P apresentam maiores condições de correção de perda de ciclos em circunstâncias adversas.

O comportamento da ionosfera é função de muitas variáveis inter-relacionadas incluindo ciclo solar, época do ano, hora do dia, localização geográfica e atividade geomagnética. Classicamente, as zonas sob grande perturbação ionosférica situam-se em altas latitudes ($>55^{\circ}$ Norte ou Sul), que não é o caso do território brasileiro. Entretanto, resultados obtidos na região próxima a Curitiba levantaram suspeitas sobre as influências da Anomalia Geomagnética do Atlântico Sul (*South American Geomagnetic Anomaly - SAGA*) no comportamento da ionosfera, fato que vem sendo pesquisado. Caso sejam confirmadas as suspeitas, levantamentos no sudeste do Paraná e Santa Catarina devem ser realizados com equipamentos de duas frequências.

No caso da utilização de equipamentos de uma frequência, sempre devem ser tomadas precauções adicionais, tais como: aumento do número de repetições de linhas de base, períodos contínuos de observação (sessão) mais longos e conexões adicionais entre estações, de forma que seja garantido que os efeitos sistemáticos

oriundos da falta de correção da refração ionosférica não prejudiquem a qualidade do levantamento. Quando possível, a realização da sessão de observação durante a noite pode vir a ser um fator favorável no caso do emprego deste tipo de equipamento.

RECONHECIMENTO

Seleção dos locais das estações

As observações GPS requerem a intervisibilidade entre a estação e os satélites. Uma vez que os sinais transmitidos podem ser absorvidos, refletidos ou refratados por objetos próximos à antena ou entre a antena e o satélite, recomenda-se que o horizonte em torno da antena esteja desobstruído acima de 15° . No caso da impossibilidade de atendimento desta condição, um gráfico polar da distribuição dos satélites para a localidade em questão é uma ferramenta muito útil para avaliação da influência da obstrução na trajetória dos satélites.

Deve-se evitar locais próximos a estações de transmissão de microondas, radares, antenas rádio-repetidoras e linhas de transmissão de alta voltagem por representarem fontes de interferência para os sinais GPS.

Multicaminhamento (*multipath*) é o efeito de retardo do sinal causado pela sua reflexão em objetos metálicos ou outras superfícies refletoras. A fim de minimizar este problema, a área situada a 50 metros da estação deve estar livre de estruturas artificiais, particularmente paredes metálicas, cercas ou superfícies naturais. Algumas vezes, um longo período de rastreamento pode reduzir os efeitos do multicaminhamento e esta condição deve ser considerada sempre que a proximidade de superfícies refletoras for inevitável, como em áreas urbanas.

O acesso deve ser considerado na seleção de uma nova estação. Idealmente, o marco deve estar acessível a menos de 30 metros dos meios de transporte. Para levantamentos semi-cinemáticos ou pseudo-cinemáticos, esta condição reveste-se de mais alta importância.

Considerando que o GPS fornece resultados de alta qualidade para posicionamentos geodésicos, deve-se garantir que o

local selecionado para a estação seja firme e estável, de forma que a determinação não perca sua exatidão por conta de possíveis abalos no marco.

No caso da necessidade de implantação de marcos de azimute, pode-se utilizar o GPS para o seu posicionamento.

Materialização dos marcos

O sistema GPS proporciona posições tridimensionais. Esta característica deve estar refletida no tipo de materialização da estação. Considerando que as especificações para construção e implantação de marcos geodésicos, abordadas na Norma de Serviço do Diretor de Geociências do IBGE nº 029/88 de 22 de setembro de 1988, contemplam estes requisitos, recomenda-se a sua adoção.

GEOMETRIA DA REDE

Conexão dos levantamentos a estações de controle existentes

A conexão da rede objeto do levantamento GPS a estações de controle do SGB existentes é realizada com vistas a integrar as novas estações ao SGB, conforme o estabelecido na legislação vigente.

Apesar dos problemas existentes atualmente na utilização de mais de um ponto de controle no processamento de levantamentos GPS precisos (classificação dos levantamentos GPS e processamento), recomenda-se a conexão da rede levantada a pelo menos 3 pontos de controle, uma vez que, mesmo que apenas um deles participe do ajuste isolado da rede GPS, as observações correspondentes podem ser integradas ao ajustamento global das redes componentes do SGB, conduzido pelo IBGE, melhorando a qualidade das informações posicionais a serem repassadas no futuro aos usuários do SGB.

Conexão entre estações novas

Cada estação nova deve ser conectada a, pelo menos, duas outras (novas e/ou de controle) na rede.

Deve ser dada preferência à ocupação simultânea de estações adjacentes na rede, uma vez ser geralmente mais fácil determinar as ambiguidades em linhas de base mais curtas, o que contribui para um aumento da rigidez da rede.

Recomenda-se que, sempre que possível, cada estação do projeto seja ocupada mais de uma vez, em sessões independentes. Apesar do custo adicional decorrente, este procedimento proporciona condições de verificação da ocorrência de erros grosseiros (centragem e altura da antena, identificação do marco etc), além de aumentar a redundância e, por conseguinte, a rigidez da rede. Além disto, cada sessão de observação deve apresentar pelo menos uma linha de base comum a outra sessão, garantindo que algumas estações da rede sejam reocupadas e permitindo a comparação de resultados de uma mesma linha de base em sessões distintas, o que propicia a análise da variação da escala e orientação entre sessões devido a mudanças nas condições atmosféricas e a erros orbitais. No caso de serem utilizados apenas dois receptores no levantamento, a situação ideal corresponde à dupla determinação de cada linha de base a ser observada.

Acrescenta-se que a formação de figuras geométricas fechadas (polígonos) fornece parâmetros de controle de qualidade, desde que os lados sejam determinados em sessões distintas, pois, de outra forma, a determinação de um polígono em uma sessão única fornece lados dependentes entre si, o que ocasiona geralmente a obtenção de bons resultados de fechamento da figura independentemente da qualidade do levantamento.

OBSERVAÇÕES DE CAMPO

Estacionamento da antena

Esta atividade (identificação do marco, centragem e medição do centro de fase da antena) pode se constituir na maior fonte de erros das operações de campo em levantamentos GPS. Desta forma, é impor-

TABELA 3 - Duração mínima da sessão

COMPRIMENTO DA LINHA DE BASE	DURAÇÃO DA SESSÃO
<2 km	1 hora
<50 km	2 horas
<100 km	4 horas

tante adotar-se alguns procedimentos de segurança, principalmente considerando que os erros ocorridos nesta fase só são detectados no caso da repetição da observação da linha de base.

O nivelamento e a centragem da antena devem ser verificados antes e depois de cada sessão de observação. A medição da altura do centro de fase da antena sobre o marco deve ser realizada antes e depois de cada sessão, efetuando-se a leitura ao milímetro e registrando-se os valores no relatório de ocupação. Alguns modelos de antena requerem a sua orientação para o norte verdadeiro.

Duração da sessão de observação

A duração ótima da sessão de observação depende de vários fatores, tais como: precisão requerida, geometria dos satélites, atividade ionosférica, tipo de receptores, comprimento das linhas de base, probabilidade de ocorrência de multicaminhamentos da onda nos locais das estações, método de redução dos dados, software utilizado etc. Considerando ser prematuro o estabelecimento de especificações rígidas para este critério face a estes inúmeros fatores influenciadores, recomenda-se a adoção dos valores constantes da Tabela 3 como mínimos que proporcionam a observação de dados suficientes para a solução das ambigüidades:

A experiência a ser adquirida no exaustivo uso do sistema certamente permitirá o detalhamento dos valores especificados na Tabela 3.

Ressalta-se que o efeito do multicaminhamento da onda (*multipath*) é função da geometria da configuração dos satélites observados, que por sua vez se modifica com o tempo. Desta forma, quanto maior o período de observação, maior a probabilidade de redução dos efeitos de multicaminhamento.

Naturalmente, os tópicos tratados neste item relacionam-se a posicionamentos estáticos.

Taxa de observação

A escolha da taxa de observação, isto é, o intervalo de tempo entre a gravação de observações consecutivas, depende da técnica de posicionamento utilizada no levantamento. A regra geral é que quanto

maior a taxa de observação, mais fácil é a detecção e correção de perda de ciclos. Por outro lado, uma taxa muito alta gera arquivos de observação muito grandes, dificultando sua manipulação. De uma maneira geral, para posicionamentos estáticos, a taxa de uma observação a cada 15 segundos tem se mostrado adequada. Para posicionamentos cinemáticos, uma taxa mais alta pode ser necessária.

Observação de condições meteorológicas

A necessidade de observação de dados meteorológicos é função dos requisitos de precisão, comprimento das linhas de base, diferença de altitude entre as estações e a finalidade do projeto.

Em geral, para levantamentos locais e regionais, as observações meteorológicas não são necessárias. Nestes casos, pequenos erros nos dados meteorológicos (devidos, por exemplo, a instrumentos descalibrados) podem introduzir erros sistemáticos maiores do que aqueles que ocorreriam caso fosse utilizada uma atmosfera padrão com um modelo de refração troposférica como o de Saastamoinen ou Hopfield.

Para levantamentos onde se busca exatidões da ordem de 0,1ppm, ou com linhas de base sistematicamente maiores que 100 km ou com grandes diferenças entre as altitudes das estações (várias centenas de metros), pode ser necessário observar-se as condições meteorológicas. Neste caso, devem ser tomadas as temperaturas seca, úmida (ou umidade relativa) e pressão atmosférica no início e fim da sessão, sempre que houver a mudança brusca das condições do tempo e pelo menos a cada hora se a sessão for mais longa. As temperaturas e a umidade relativa devem ser medidas a uma altura do solo que evite o gradiente criado por efeitos de aquecimento do solo. As temperaturas devem ser lidas com aproximação de 0,1° C e a umidade relativa de 2%. A pressão atmosférica deve ser medida à altura do centro de fase da antena com aproximação de 0,2mmHg ou 0,3mb. Recomenda-se que os instrumentos sejam aferidos antes da campanha e comparados entre si pelo menos uma vez por semana durante o andamento do projeto.

Anotações de campo

Sugere-se a utilização dos formulários adotados pelo IBGE em levantamentos geodésicos diferenciais com GPS. Estes formulários foram projetados de forma a atender às recomendações constantes destas normas.

PROCESSAMENTO

A fim de que qualquer problema seja rapidamente identificado e sejam adotadas as medidas necessárias para sua correção, os dados observados devem ser processados logo que possível após a sessão de observação.

As diferenças obtidas para resultados de linhas de base observadas mais de uma vez devem ser comparadas tendo por base os requisitos de precisão para o projeto.

Os sistemas de processamento de observações GPS existentes geralmente classificam as soluções em três tipos (os nomes podem variar):

Solução DUPLA-FIX: resultante do processamento de duplas diferenças de fase onde foi possível determinar as ambiguidades como números inteiros; normalmente, este é o tipo de solução encontrada para linhas de base curtas (<15 Km), fornecendo, neste caso, os resultados de melhor qualidade em comparação com os outros dois tipos de solução;

Solução DUPLA-FLOAT: resultante do processamento de duplas diferenças de fase onde não foi possível determinar as ambiguidades como números inteiros; normalmente, é a solução obtida para linhas de base médias e longas que apresentam observações de boa qualidade;

Solução TRIPLA: proveniente do processamento de triplas diferenças de fase; normalmente, é a solução indicada para longas linhas de base (>100 Km) que apresentam observações de qualidade insuficiente para a obtenção da solução DUPLA-FLOAT, devido, por exemplo, a inúmeras ocorrências de perdas de ciclos.

Conforme o exposto anteriormente, o GPS proporciona atualmente resultados com qualidade superior a da rede clássica de controle. Até que esta situação esteja resolvida com a conclusão do ajustamento da rede planimétrica do SGB, em fins de

1993, a finalidade do projeto indicará a melhor solução para a questão. No caso dos requisitos de precisão serem muito rígidos, do nível dos fornecidos pelo GPS (1 a 2 ppm), os usuários deverão realizar o ajustamento final (tridimensional) da rede levantada considerando fixa apenas uma estação de controle. Caso contrário, a precisão GPS será degradada pelas injunções da rede preexistente. Este procedimento apresenta o inconveniente de gerar uma rede GPS que pode apresentar diferenças sistemáticas significativas em relação ao controle não utilizado existente na região. Se os requisitos de precisão para o projeto forem compatíveis com a rede clássica (10 ppm), mais de um ponto de controle poderá participar do ajuste final, o que propiciará a obtenção de resultados homogêneos com o restante do controle existente na região.

Qualquer que seja o procedimento adotado para o projeto, é **EXTREMAMENTE IMPORTANTE** que os dados sejam enviados para o IBGE, não só pelo papel desempenhado por esta instituição como gestora do SGB, mas principalmente pelos benefícios que a integração destes dados ao processo de ajustamento das redes componentes trará à qualidade final das coordenadas das estações que, em última instância, será repassada aos usuários pertencentes à comunidade cartográfica nacional. Os procedimentos para tal encaminhamento serão oportunamente divulgados pelo IBGE.

CALIBRAÇÃO

Recomenda-se a execução da calibração de equipamentos e métodos para o controle de erros sistemáticos em levantamentos GPS. Esta operação deve ser realizada a partir do levantamento de uma rede de teste pré-implantada. Com este objetivo, o IBGE está desenvolvendo um projeto de implantação de um campo de provas, no Rio de Janeiro, para servir de padrão nos testes de instrumentos, processamento e análise de dados.

Esta recomendação reveste-se de grande importância no caso de levantamentos realizados com receptores e antenas de diferentes modelos e fabricantes.

BIBLIOGRAFIA

- BLITZKOW, D., et al. *Mapa Geoidal do Brasil* - 1992. Rio de Janeiro EPUSP - PTR e Departamento de Geodésia - IBGE. Nov. de 1992.
- FORTES, L.P.S.; GODOY, R.A.Z.. *Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo do Sistema de Posicionamento Global - GPS*. Coletânea de Trabalhos Técnicos do XV CONGRESSO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA, vol. 3, p. 677-682. São Paulo. 1991.
- FUNDAÇÃO INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE) *Especificações e Normas Gerais para Levantamentos Geodésicos em Território Brasileiro. RPR nº 22/83, Boletim de Serviço nº 1602. Rio de Janeiro, 01 de ago. de 1983. (Suplemento)*

RESUMO

São apresentadas, em linhas gerais, as idéias relacionadas à nova concepção do Sistema Geodésico Brasileiro, emergidas com o advento dos métodos de posicionamento decorrentes da implantação do Sistema de Posicionamento Global - GPS. São apresentadas, também, as especificações e normas gerais preliminares para levantamentos GPS, para emprego pela comunidade brasileira usuária do sistema.

ABSTRACT

The general ideas related to the new conception of the Brazilian Geodetic System, emerged from the incoming Global Positioning System (GPS) positioning methods, are presented. The preliminary standards and specifications for GPS surveys, to be used by the Brazilian GPS user community, are also presented.