

A PRECISÃO POSSÍVEL COM GPS L1/CA EM GEORREFERENCIAMENTO: O DESAFIO DO MULTICAMINHO NO PROJETO DE UM RECEPTOR COM CÓDIGO SUAVIZADO

Analysis of the feasible GPS L1/CA code-smoothed receiver precision under the challenge of multipath

JULIO CESAR FARRET
MARCELO CARVALHO DOS SANTOS
CARLITO VIEIRA DE MORAES
ROGERS ADEMIR DRUMM PEREIRA
Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Ciências Rurais
Departamento de Engenharia Rural
Setor de Geodésia
Programa de Pós-Graduação em Geomática
(jcfarret@smail.ufsm.br , msantos@unb.ca , carlito@smail.ufsm.br ,
buck@mail.ufsm.br)

RESUMO

Desde a criação do sistema NAVSTAR/GPS várias fontes de erros nas observáveis foram sendo identificadas e estudadas, tais como o atraso ionosférico e o não sincronismo de relógios. O erro causado pelo multicaminho, no entanto, ainda persiste como um desafio, especialmente para aplicações que exigem maior acurácia. No caso do Brasil, com a promulgação da Lei 10.267/2001 que instituiu o Cadastro Nacional de Imóveis Rurais (CNIR), este desafio passou a ter uma conotação específica, pois influencia a aplicabilidade do GPS no contexto do novo sistema cadastral. As empresas fabricantes de receptores GPS têm feito grandes investimentos em pesquisa nesse sentido, especialmente no projeto dos seus receptores. O presente trabalho busca analisar as tecnologias aplicadas no receptor GPS Leica GS20, bem como analisar o desempenho dessas tecnologias em nível de condições de campo representativas da realidade do georreferenciamento no CNIR. Os resultados mostram grande potencial de uso desse receptor para trabalhos de

certificação junto ao INCRA, bem como evidenciam situações limites em que o emprego dele fica prejudicado.

Palavras-chave: GPS, multicaminho, Delay Lock Loop (DLL), Phase Lock Loop (PLL).

ABSTRACT

Since the creation of the NAVSTAR/GPS several sources of observational errors have been identified and studied. They include, among others, ionospheric delay and clock offsets. The error caused by multipath, however, persists as a challenge, especially for applications that demand high accuracy. In Brazil, with the promulgation of Law 10267/2001 creating the National Cadastre of Rural Properties (CNIR), this challenge assumes a specific feature since it influences the applicability of the new cadastral system. The GPS receiver manufacturing companies have been making large investments in research to deal with multipath, especially at receiver design level. This work performs an analysis of the applied technologies involved in the Leica GS20 GPS receiver in field conditions as realistic as possible similar to the ones encountered in geodetic surveys satisfying CNIR's specifications. The results show the potential of using such receivers to certification works by the Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária (INCRA). It also makes evident their limitations.

Keywords: GPS, multipath, Delay Lock Loop, Phase Lock Loop.

1 INTRODUÇÃO

Os erros nas medidas GPS podem-se relacionar às suas fontes, como no caso dos erros relacionados aos satélites (erros de órbita e relógio), dos erros relacionados à propagação do sinal e à estação receptora (refração troposférica e ionosférica, perdas de ciclos, rotação da Terra e multicaminho). Pesquisadores e empresas fabricantes de receptores GPS vêm se empenhando em apresentar soluções para a atenuação e/ou eliminação desses erros, sendo que a maioria já não representa problemas para a obtenção de altas precisões. Esse não é o caso do erro devido ao multicaminho (FARRET, 2000) pois, apesar de alguns avanços nas técnicas de atenuação, ainda se trata de uma das últimas fronteiras para obtenção de bom nível de acurácia, como necessário em levantamentos cadastrais legais, caso do Cadastro Nacional de Imóveis Rurais (CNIR).

Objetivando dar maior competitividade comercial aos seus produtos, as empresas têm financiado estudos e pesquisas com o intuito de criar técnicas capazes de, pelo menos, atenuar esse problema. Devido às peculiaridades do multicaminho, principalmente relacionadas às características de diversidade e não estaticidade dos ambientes, esses investimentos têm se concentrado no aperfeiçoamento do projeto interno dos receptores, ou seja, no tratamento do problema de rastreamento do sinal e, mais especificamente, na função de correlação do sinal vindo do satélite com a réplica gerada internamente no receptor. Desses estudos resultaram técnicas de

processamento como: *Narrow Correlator* - receptores Novatel (FENTON et. al., 1991), *Strobe Correlator*, *Edge Correlator* e *Enhanced Strobe Correlator* – receptores Ashtech (GARIN et al., 1996), *Multipath Estimating Delay Lock Loop – MEDLL* (VAN NEE, 1994), *Gated Correlator* (BRAASH & MCGRAW, 1999), *Multipath Mitigation Correlator - MM Correlator* (receptores Leica), *Smoothing* (HATCH, 1982 e LACHAPELLE et al., 1986) dentre outras. Estas e outras técnicas de processamento de sinal estão atualmente introduzidas sob a forma de algoritmos em diferentes tipos de receptores GPS disponíveis no mercado. Elas proporcionaram melhoras efetivas no desempenho dos receptores GPS? Qual o desempenho desses receptores nas condições de campo impostas pela nova Lei 10.267/2001 do CNIR? O presente trabalho procura subsidiar os usuários do receptor GPS Leica GS20, especialmente aqueles que se dedicam ao georreferenciamento de imóveis rurais, fazendo-se uma análise do seu desempenho. Busca-se avaliar a eficiência das técnicas de atenuação do multicaminho implementadas nesse receptor em situações de multicaminho representativas da realidade dos levantamentos de campo em extrema dificuldade de rastreamento por obstrução por folhagem e interferência. Também pode sinalizar caminhos a projetistas de receptores, na busca de soluções específicas. Atendendo à recomendação da Norma Técnica para o Georreferenciamento de Imóveis Rurais (INCRA, 2003), o receptor foi utilizado conforme a recomendação da própria empresa fabricante. Os resultados apontam para o uso satisfatório desse instrumento para o georreferenciamento no CNIR.

2 CONCEITOS FUNDAMENTAIS

2.1 O Georreferenciamento no Cadastro Nacional de Imóveis Rurais

A Portaria INCRA 1101 de 17 de novembro de 2003 homologa a Norma Técnica para Georreferenciamento de Imóveis Rurais (no âmbito deste trabalho chamada de Norma Técnica). A obediência rigorosa aos procedimentos nela contidos não garante a acurácia final estabelecida pela Lei 10.267/2001. Isso se deve, principalmente, ao multicaminho, pois ele não é um fenômeno plenamente detectável e controlável pelos receptores GPS. É por esse motivo que essa norma, como em geral todas as demais, não apresentam indicações de valores e parâmetros seguros que tratem de forma adequada o problema do multicaminho nos levantamentos, mas apenas sugestões preventivas, como a localização adequada das antenas, por exemplo.

2.2 Técnicas de Atenuação do Multicaminho

Sendo o multicaminho causado por reflexões do sinal direto em objetos mais ou menos próximos da antena, os seus efeitos podem ser dirimidos por meio de técnicas que, de um ponto de vista geral, podem ser divididas em técnicas externas ao receptor e técnicas internas a ele. As técnicas externas são de natureza

primária e consistem de técnicas baseadas em antenas e no tratamento de sinais no pós-processamento. As técnicas internas ao receptor compreendem melhoras nas tecnologias de recepção (*tracking*) ou no processamento interno do sinal, ou seja, atuam no projeto dos receptores, pressupondo sofisticação tecnológica.

As técnicas baseadas em antena levam em conta a geometria dos sinais ao redor dela e compreendem a sua localização adequada, o uso de antenas especiais e o uso de múltiplas antenas. Encaixam-se aqui o uso de antenas com plano-terra e do tipo *choke-ring* (WEILL, 1997) ou antenas com capacidade de rejeitar a polarização à esquerda (LHCP – *Left-Hand Circular Polarized*), que é a polarização do sinal refletido, ao contrário da polarização circular à direita (RHCP – *Right-Hand Circular Polarized*), como é o caso do sinal direto (BRAASH, 1996 e MONICO, 2000). A eficiência dessa técnica é parcial, uma vez que somente partes dos sinais polarizados à esquerda são atenuados. Isso faz com que essa técnica deva ser utilizada em conjunto com outras, especialmente as técnicas internas do receptor, como ocorre com a chamada tecnologia *ClearTrak™*, empregada no receptor em estudo, onde a empresa afirma que sua antena apresenta respostas mínimas a sinais com ângulos de elevação muito baixos (<http://www.leica-geosystems.com>), ou seja, aqueles com maior potencial de multicaminho e ruído. Pode-se ainda reduzir os efeitos do multicaminho adotando o desenvolvimento de múltiplas antenas, como em RAY et al. (1998) e FARRET (2000) ou o conjunto de múltiplas estações de referência proposto por LACHAPPELLE et al. (1986).

Com relação às técnicas baseadas no tratamento de sinais no pós-processamento, cita-se o uso da alta correlação do sinal em antenas próximas (FARRET, 2000 e RAY et al., 1998), a técnica de multirresolução baseada em integrais *wavelets* (SOUZA & MONICO, 2003) e a variação da geometria das reflexões causada pela movimentação angular dos satélites no tempo (WEILL, 1997).

Com relação às técnicas internas ao receptor, elas apresentam grande atratividade comercial, pois possibilitam atenuar o multicaminho em condições de navegação em tempo real, com constantes mudanças de cenário. Essas técnicas atuam no rastreamento do sinal pelo receptor (medida direta de tempo) ou na própria forma de cálculo da distância receptor-satélite. As técnicas internas ao receptor são o enfoque precípuo deste trabalho.

As técnicas baseadas no rastreamento do sinal atuam na determinação do tempo que gera as distâncias receptor-satélite, básicas para a determinação das coordenadas desejadas com GPS. Os receptores também usam as medidas da fase das ondas portadoras para obter essa distância com maior acurácia (WEILL, 1997) através do produto entre o número de ciclos existentes desde a antena do receptor até o satélite e o comprimento de onda da portadora utilizada (L1 e/ou L2). A estimativa de tempo de propagação é feita por meio da correlação (alinhamento) entre o sinal que chega e sua réplica, calculado pelo grau desse alinhamento entre os dois sinais e evidenciado pela chamada Função de Correlação (ou de Auto-Correlação), cuja

sugestão de modelo matemático pode ser vista em WEILL (1997). É na Função de Correlação que atuam as técnicas de atenuação do multicaminho baseadas no *tracking* do sinal; logo, para uma boa precisão nas medidas de pseudodistâncias, quanto mais agudo for o pico da Função de Correlação Cruzada, melhor.

FENTON et al. (1991) e VAN DIERENDONCK et al. (1992) introduziram pela primeira vez a técnica chamada de Correlacionadores Estreitos (*Narrow Correlators*). Esta técnica se baseia na diminuição nos intervalos originalmente utilizados na concepção do sistema GPS para correlação entre o sinal original e sua réplica, buscando uma diminuição das interferências de sinais adjacentes ao pico dessa função, como o multicaminho. A técnica *Narrow Correlator* oferece uma significativa melhora na atenuação dos efeitos do multicaminho em comparação com o obtido com a correlação padrão original (WEILL, 1997) e serviu de base para a criação de outros métodos similares originados posteriormente, como: *Multipath Estimating Delay Locked Loop (MEDLL)*, em TOWNSEND et. al. (1995); *Strobe Correlator* (GARIN et al., 1996); *Modified Rake DLL (MRDLL)*, em LAXTON (1996); *Rake Delay Locked Loop (RDLL)*, em SHEEN & STUBER (1995); *n - Multipath Reflections DLL (n-MRDLL)*, em LAXTON (1996) e *Deploying Estimator* (GADALLAH et al., 1998). O *Narrow Correlator* padrão utiliza espaçamentos de 0,1 segmento (chip) do código C/A para realizar a Função de Correlação, o que ocorre dentro do *Delay Locked Loop (DLL)* (GADALLAH et al. 1998).

Em relação às técnicas baseadas na forma de determinação da distância receptor-satélite, a forma mais consagrada baseia-se no fato de usar a quantificação precisa da variação da pseudodistância determinada através das medidas da fase da portadora para gerar medidas de pseudodistâncias receptor-satélite bem mais precisas que aquelas derivadas de código simples. A grande vantagem desta técnica é a operacionalidade, pois não depende da resolução de ambigüidades. A forma original foi proposta por HATCH (1982) a serviço da Leica, que não a patenteou. Ela foi aperfeiçoada posteriormente por LACHAPPELLE et. al. (1986) e WESTROP et. al. (1990). Segundo SEEGER (2003), a técnica passou a apresentar melhores resultados após a desativação do SA em 1º de maio de 2000. Segundo BISNATH et. al. (2002), posicionamentos absolutos são possíveis com alta precisão usando-se uma combinação de código suavizado com órbitas e tempo precisas. Considerando um receptor de dupla frequência, pode-se obter as distâncias por código $R_{L_1}(t_i)$ e $R_{L_2}(t_i)$ (convertidas para ciclos) bem como as distâncias por fase das portadoras $\phi_{L_1}(t_i)$ e $\phi_{L_2}(t_i)$. O desenvolvimento matemático dessa técnica pode ser encontrado, por exemplo, em HOFMANN-WELLENHOF (2001), SEEGER (2003) e FARRET (2003). Com base nestas fontes, mostra-se o algoritmo final recursivo (solucionável por etapas) para uma época t_i em relação à época anterior t_{i-1} :

$$R(t_i) = \frac{f_{L1}R_{L1}(t_i) - f_{L2}R_{L2}(t_i)}{f_{L1} + f_{L2}}$$

$$\phi(t_i) = \phi_{L1}(t_i) - \phi_{L2}(t_i) \quad (1)$$

$$R(t_i)_{ex} = R(t_{i-1})_{suav} + [\phi(t_i) - \phi(t_{i-1})]$$

$$R(t_i)_{suav} = \frac{1}{2}[R(t_i) + R(t_i)_{ex}]$$

o qual considera a condição inicial $R(t_1) = R(t_1)_{ex} = R(t_1)_{suav}$ para $i > 1$, onde pressupõem um sistema livre de erros grosseiros, o que não é o caso das medidas de fase que são sujeitas a perdas na contagem de ciclos (cycle slips). Isso é resolvido através da seguinte expressão:

$$R(t_i) = R(t_i)_{ex} = R(t_i)_{suav} \quad (2)$$

onde ω é o fator de peso dependente do tempo. Para a primeira época $i=1$ este fator vale 1, conferindo peso máximo às distâncias por código. Para as épocas seguintes este valor é continuamente reduzido de forma a aumentar o peso das medidas de fase. Uma estimativa desse fator de redução é dado por LACHAPELLE et al. (1986) como sendo de 0,01 de uma época para outra para casos cinemáticos com intervalo de amostragem de dados de 1 Hz. Isso significa que, após 100 segundos, somente os valores suavizados da época anterior serão considerados, com pesos máximos para fase. Se ocorrer perda de ciclo (o que pode ser detectado pelo produto de duas épocas consecutivas do valor Doppler e o intervalo de tempo) o valor de ω é novamente configurado para 1 (peso total nos códigos) tirando a influência das medidas de fase para aquele instante, eliminando a influência daquela perda de ciclos nas medidas de distância e reiniciando o processo, com erros maiores nesse momento. Logo, a exigência é que a perda de ciclo seja detectada, não sendo necessária a sua correção, o que é automaticamente solucionado pelo algoritmo. Este é um aspecto fundamental para o bom desempenho dessa tecnologia em ambientes de difícil rastreamento, sujeitos a multicaminho, onde ocorrem frequentes perdas de ciclos. Pode-se inferir desse fato, que um tempo de tomada de dados de 100 segundos com intervalo entre épocas de um segundo (1,7 minutos de tempo de rastreamento) seria o suficiente para atingir a máxima qualidade possível na posição. Mas isso somente será correto se não houver perda na medida da fase. Segundo FARRET et al. (2005), um tempo de permanência adequado para obtenção de acurácia condizente com o CNIR é de 2,5 minutos (150 segundos). A explicação para essa necessidade de um tempo maior pode estar na ocorrência de quedas de ciclos e, portanto, a necessidade de um tempo adicional de tomadas de medidas com máxima precisão para possibilitar a o bom funcionamento do algoritmo. Ainda assim existe a necessidade de verificar o comportamento do sistema se, durante essa tomada de tempo extra, houver a queda nas medidas de fase novamente. Nesse caso,

o peso do código voltará ao máximo, mas qual a influência das medidas feitas até então com precisão máxima? No presente trabalho buscou-se essa resposta pela quantificação dessas quedas em um ambiente real de trabalho, aproximando-se gradativamente o receptor do refletor principal (mato) e contando as quedas de ciclos, as quais foram relacionadas com a acurácia obtida por código suavizado em cada ponto.

2.3 A Atenuação do Multicaminho no Receptor Leica GS20

O receptor GS20 é dotado de tecnologia de atenuação do multicaminho chamada pela empresa fabricante de *ClearTrak™*. Essa tecnologia é baseada na técnica de filtragem das medidas de distância por código pelas medidas de fase das ondas portadoras, técnicas especiais de rastreamento do sinal e em tecnologias de antenas especiais (seção 2.2). A empresa não apresenta mais detalhes técnicos de como são implementadas de forma específica essas tecnologias em seus receptores, o que envolve, provavelmente, materiais especiais e algoritmos diferenciados de domínio do fabricante. Mas a empresa cita a implementação de uma tecnologia de rastreamento dos sinais no *DLL* e no *Phase Lock Loop (PLL)* que, ainda segundo a empresa fabricante, proporciona ganhos significativos na atenuação do multicaminho e ruído, com reflexo em coordenadas com maior precisão.

Essas novas metodologias de atenuação do multicaminho foram desenvolvidas com propósitos comerciais por HATCH, KEEGAN e STANSELL (1998) e parecem ter como característica fundamental a redução ainda maior nos intervalos de correlação em relação ao correlacionador *narrow*. Eles começaram a apresentar resultados dessas novas técnicas para atenuação do multicaminho no código e uma para o multicaminho na fase. Elas foram chamadas de Correlacionador de Atenuação do Multicaminho Leica Tipo A (*Leica Type A Multipath Mitigation Correlator*), Correlacionador de Atenuação do Multicaminho Leica Tipo B (*Leica Type B Multipath Mitigation Correlator*) e Atenuador do Multicaminho na Fase (*Phase Multipath Mitigation*). Como estes dois últimos apresentam evolução em relação ao primeiro, em 1999 foi apresentada a técnica chamada simplesmente Correlacionador de Atenuação de Multicaminho (*Multipath Mitigation Correlator – MM Correlator*), com capacidade de atenuação do multicaminho e interferências em código e fase. Todas essas técnicas foram devidamente patenteadas pela empresa. As figuras 1 e 2 mostram os resultados apresentados por HATCH et al. (1998) para essas novas tecnologias, comparando a tecnologia *MM Correlator* com o correlacionador de espaçamento reduzido padrão (*narrow correlator*) e o correlacionador de espaçamento largo (*wide correlator*). O espaçamento reduzido padrão para o *narrow correlator* é de 10% em relação ao *wide correlator*.

A figura 1 mostra que o erro devido ao multicaminho tende a zero para atrasos maiores que 0,115 segmentos de código C/A, exceto para atrasos de multicaminho entre 0,85 e 1,15, sendo que 1 (um) segmento do código C/A equivale a aproximadamente 300m. Na figura 2 esse efeito residual é eliminado pelo

Correlacionador de Atenuação do Multicaminho Leica Tipo B e Atenuador de Multicaminho na Fase, para atrasos de multicaminho entre 0,85 e 1,15 segmentos de código C/A.

Assim como o Correlacionador de Atenuação de Multicaminho Leica Tipo B traz melhoras significativas às medidas por código, o Atenuador de Multicaminho na Fase o faz em relação às medidas por fase. Isso ocorre porque sinais de multicaminho com atrasos muito curtos afetam significativamente a acurácia nas medidas de fase da portadora, o que não ocorre em relação aos atrasos longos (HATCH et al., 1998). Segundo ainda segundo este autor, o Correlacionador de Atenuação do Multicaminho Leica Tipo A tem desempenho semelhante ao *Strobe Correlator*.

STANSELL e MAENPA (1999) apresentaram a tecnologia chamada de *MM Correlator* como uma evolução das tecnologias implementadas até então pela Leica. Esta tecnologia apresenta um erro máximo de $\frac{1}{4}$ em relação aos correlacionadores com espaçamento 10% reduzido em relação aos correlacionadores de espaçamentos largos. O sinal de multicaminho tem a metade da amplitude do sinal direto o que corresponde a um quarto da potência do sinal direto.

Figura 1: Erro na pseudodistância com o uso dos correlacionadores *narrow* e *wid* no código C/A comparado com o erro na pseudodistância com o uso do correlacionador de atenuação do multicaminho Leica Tipo A.

Fonte: HATCH, KEEGAN e STANSELL (1998, p.15).

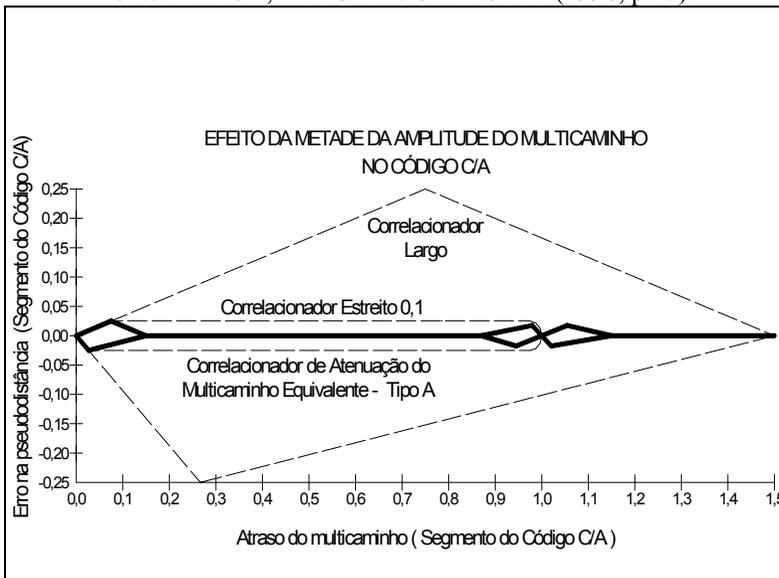


Figura 2: Erro na pseudodistância com o uso dos correlacionadores *narrow* e *wide* no código C/A comparado com o erro na pseudodistância com o uso do correlacionador de atenuação do multicaminho Leica Tipo B.

Fonte: HATCH, KEEGAN e STANSELL (1998, p.15).

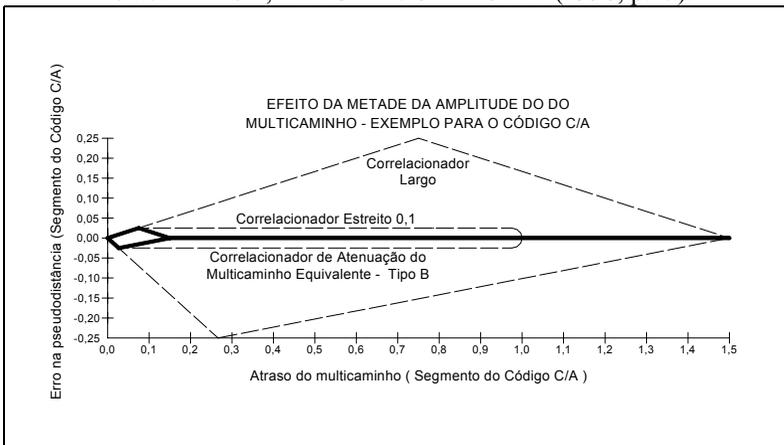
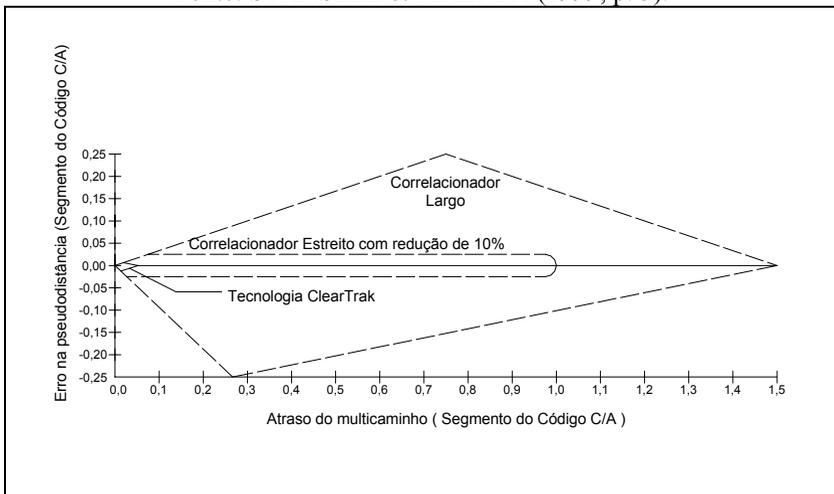


Figura 3: Erro na pseudodistância com o uso dos correlacionadores *narrow* e *wide* no código C/A comparado com o erro na pseudodistância com o uso da tecnologia MM Correlator.

Fonte: STANSELL & MAENPA (1999, p. 3).



3 MATERIAL E METODOLOGIA

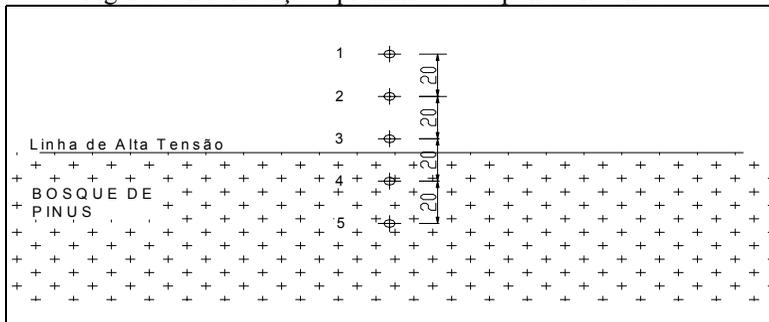
Utilizou-se o receptor GS20 em condições representativas das condições de maior desafio em termos de multicaminho, atenuação e interferência enfrentadas pelos técnicos que trabalham sob os requisitos do CNIR. Avaliaram-se condições crescentes de dificuldade na recepção do sinal através do rastreamento de pontos que se aproximavam gradualmente de um mato de pinus com rede elétrica. Em todos eles o receptor foi testado nas duas configurações possíveis de trabalho segundo a Norma Técnica, ou seja, com código suavizado e com fase. Cada condição de campo teve 30 repetições, possibilitando a formação da estatística para cada ponto, bem como em dois dias consecutivos, por questões de confiabilidade. Os pontos foram rastreados em semelhança de condições, isto é, o rastreamento dos pontos foi realizado em dias consecutivos mas praticamente nos mesmos horários. Procurou-se obedecer a defasagem diária de 3 minutos e 56 segundos em cada ponto para poder extrair o sinal do multicaminho pela repetibilidade diária (FARRET, 2000). Em todos os casos, a correção foi feita utilizando-se a base de Santa Maria (SMAR) da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC).

O receptor GPS Leica GS20 é um receptor de uma frequência. Na presente pesquisa, foi dotado da antena do tipo AT501 Pole. Segundo a empresa fabricante, esse receptor fornece precisão de 1 cm + 2 ppm do comprimento da linha de base para posicionamentos relativos, com a utilização das fases da portadora L1 com ambigüidades resolvidas, e precisão de 30 cm para trabalhos com código suavizado. Neste caso, a distância máxima da linha de base não é explicitada nos manuais. Para fins de georreferenciamento pelo CNIR, e por exigência da Comissão de Certificação da Superintendência Regional do INCRA em Porto Alegre, RS, Brasil, a empresa informou oficialmente, através de documento enviado a essa Superintendência, que essa distância é de 250 km a partir de bases homologadas pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). A antena AT 501 é uma antena externa, tanto para coletas de dados da fase como por código, projetada para dar alta precisão às medidas, o que não ocorre quando do uso da antena interna.

Os pontos de teste estão localizados relativamente próximos a um bosque de pinus com altura em torno de 25 metros e com uma rede elétrica de alta tensão na borda do bosque, para verificação de eventuais interferências. Esses pontos, em número de 5 (cinco), estão em linha perpendicular ao bosque e, por conseguinte, à linha de energia elétrica de alta tensão, a distâncias de 20 metros entre si, como mostra a figura 4. Essa localização configura pontos em situação de multicaminho e interferência muito baixa ou quase inexistente até situações onde esses fatores são bastante fortes. As coordenadas desses pontos de teste foram determinadas a partir de medidas realizadas com a estação total Leica TC307 e foram tomadas como verdadeiras. Elas são mostradas nos gráficos de dispersão das repetições em cada ponto, sendo utilizadas no cálculo das acurácias. Tomou-se como base quatro pontos de apoio localizados no interior do campus da UFSM, com saída e chegada em pares distintos desses pontos, para verificação da qualidade do transporte de

coordenadas, na forma de azimute, inclusive. Para o transporte dessas coordenadas no elipsóide usaram-se as fórmulas de Puissant implementadas até segundos de arco para distâncias de até 100 km. Esses cálculos foram processados no programa FM Geodésico, desenvolvido no setor de Geodésia do DER/UFSM.

Figura 4: Distribuição aproximada dos pontos levantados.



Para o processamento dos dados brutos brutos usou-se um programa comercial específico do equipamento utilizado na pesquisa, ou seja, o GisDataPro 3.0 (Leica).

O desenvolvimento da estatística utilizada pode ser encontrada em GEMAEL (1994), sendo que a acurácia para cada ponto é dada em função de sua coordenada verdadeira e é expressa da seguinte forma, para amostras grandes, como é o caso do presente trabalho (COSTA NETO, 1977, p. 73-75):

$$\sigma_{E_v} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (E_i - E_v)^2}, \tag{3}$$

$$\sigma_{N_v} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (N_i - N_v)^2}, \tag{4}$$

onde E_v e N_v são as coordenadas verdadeiras do ponto considerado.

A acurácia da posição é dada por

$$\sigma_p = \sqrt{(\sigma_{E_v})^2 + (\sigma_{N_v})^2} \tag{5}$$

Ambas as possibilidades de uso do GS20 (fase ou código suavizado) se enquadram nas condições de uso determinadas pela Norma Técnica no item 4.5.3.3,

GPS3, página 24. Para os trabalhos com fase usou-se 2,5 minutos de duração da sessão em cada ponto após inicialização estática de 9 minutos (<http://www.leica-geosystems.com>) para determinação das ambigüidades iniciais das medidas de fase, a qual foi feita no ponto 1, que é o mais longe das fontes de multicaminho e interferência elétrica, e com intervalo entre épocas de 1 (um) segundo. A diferença básica em relação à ocupação por código suavizado é que, neste caso, não exige a inicialização estática, mas a duração das sessões foi a mesma. O ângulo de corte para satélites com baixa elevação foi de 15° e o PDOP variou de 2,5 a 5,0. O receptor também pode ser usado segundo os itens 4.5.3.5.1 – Posicionamento Relativo Rápido Estático (fase da portadora) e 4.5.3.5.2 - Posicionamento Relativo Pseudo-estático (fase da Portadora), página 25, na Norma Técnica, tanto de forma estática como na forma de cadeia cinemática, mas sempre utilizando a fase das portadoras como observável básica. Do ponto de vista prático e de rendimento, porém, é irracional usá-lo nessas situações, uma vez que, segundo o fabricante (<http://www.leica-geosystems.com>) e como confirmam os resultados do presente trabalho, o receptor possui processador de sinais com capacidade para obter a acurácia nominal com tempo de rastreo bem inferior aos 5 minutos exigidos no último ítem sem exigir a reocupação de pontos.

Para identificação das medidas em cada um dos 5 (cinco) pontos, nos 2 (dois) dias em seqüência, utilizou-se a nomenclatura como GS1 para referir as medidas com o GS2 no ponto 1, MRE para referir-se ao mata e à rede elétrica e 1D para identificar o primeiro dia, ficando esse ponto identificado como GS1MRE1D, e assim sucessivamente.

4 RESULTADOS E ANÁLISES

Somente foi realizada a análise estatística para o levantamento dos pontos com código suavizado, por ter maiores conseqüências nos resultados do que com a fase, onde a conseqüência principal do multicaminho é prejudicar a fixação das ambigüidades, as quais, uma vez fixadas, praticamente garantem a ocorrência da precisão nominal do instrumento. Por esse motivo, para os trabalhos com a fase, procurou-se apenas verificar a ocorrência de perdas de ciclos em relação à aproximação das fontes refletoras principais, isto por que, as perdas de contagem das fases têm influência na qualidade das medidas feitas com o código suavizado.

4.1 Perdas de Ciclos

Tanto no posicionamento utilizando-se código suavizado quanto no posicionamento utilizando-se as fases das portadoras, não houve perda de ciclos do ponto 1 ao ponto 3, distantes 60, 40 e 20 metros do refletor principal, respectivamente. Elas somente ocorreram durante o deslocamento para o ponto 4, que fica entre o bosque de pinus e a rede de alta tensão. Isto se refletiu em posições com maior acurácia até o ponto 3, nos levantamentos com código suavizado, como reflexo direto da deficiência de suavização do código nos pontos 4 e 5, em

decorrência da carência de medidas de fase, quando o algoritmo de suavização atribuiu peso máximo aos códigos. Nos levantamentos com fase, a consequência foi a impossibilidade de obter esse tipo de solução nos pontos 4 e 5, uma vez que não houve como fixar as ambigüidades inteiras no processamento desses pontos. Nesses casos, o programa utilizado fornece automaticamente a solução com código suavizado, a qual também apresenta o problema de otimização acima descrito.

4.2 Posicionamento com Código Suavizado

A tabela 1 apresenta os resultados de precisão nas componentes E e N das coordenadas UTM resultantes dos processamentos com código suavizado, bem como a acurácia dessas componentes e a acurácia total da posição, conforme as expressões 3, 4 e 5.

Tabela 1: Resultados Obtidos no Levantamento dos pontos de teste com o receptor GS20 com código suavizado

Pontos	Desvio Padrão da coord. Este σ_E (m)	Desvio Padrão da coord. Norte σ_N (m)	Desvio Padrão da Posição Σ_P (m)	Acurácia da coord. Este σ_{Ev} (m)	Acurácia da coord. Norte σ_{Nv} (m)	Acurácia da posição σ_P (m)
GS1MRE1D	0,1566	0,1590	0,2232	0,2152	0,1636	0,2703
GS1MRE2D	0,1784	0,1631	0,2417	0,3002	0,1812	0,3507
GS2MRE1D	0,1330	0,1948	0,2359	0,2593	0,2008	0,3279
GS2MRE2D	0,1315	0,2101	0,2479	0,2606	0,2113	0,3355
GS3MRE1D	0,1409	0,2045	0,2483	0,1441	0,3009	0,3336
GS3MRE2D	0,2154	0,2205	0,3082	0,2266	0,2274	0,3210
GS4MRE1D	1,0185	1,1170	1,5116	1,0777	2,1170	1,9967
GS4MRE2D	0,7629	0,8829	1,1668	0,8367	0,8880	1,2201
GS5MRE1D	1,5702	1,5802	2,2277	1,5772	1,7067	2,3239
GS5MRE2D	1,1895	1,2642	1,7358	1,2183	1,2666	1,7574

A comparação do desvio padrão da posição estimada para cada ponto (coluna 4) com a respectiva acurácia (coluna 7) demonstram valores sistematicamente maiores para essas últimas em todos os pontos, o que indica a presença de efeitos sistemáticos nas medidas que podem ser atribuídos em grande parte ao multicaminho, mas não somente a ele, pois permanecem com pouca variação mesmo com a aproximação aos refletores, o que pode ser devido ao ruído do receptor.

Uma indicação segura da magnitude desses efeitos sobre as coordenadas estimadas pode ser dada pela distância entre a posição média do ponto e o valor verdadeiro. Usando valores médios entre as posições estimadas nos dois dias de levantamento, o valor desta distância para os pontos 1 à 5 são, respectivamente: 20 cm, 17 cm, 15 cm, 35 cm e 46 cm. Observa-se, portanto, que a aproximação das situações limitantes de levantamento analisadas no presente trabalho, causaram não somente dispersão aleatória como também deslocamento sistemático nas coordenadas.

Esta dispersão relativamente ao valor verdadeiro, e tendo em vista o limite de 0,5 m imposto pela Lei 10267/2001, é mostrada nas figuras a seguir para 3 dos pontos de teste.

Figura 5: Dispersão das coordenadas no ponto GS1MRE1D.

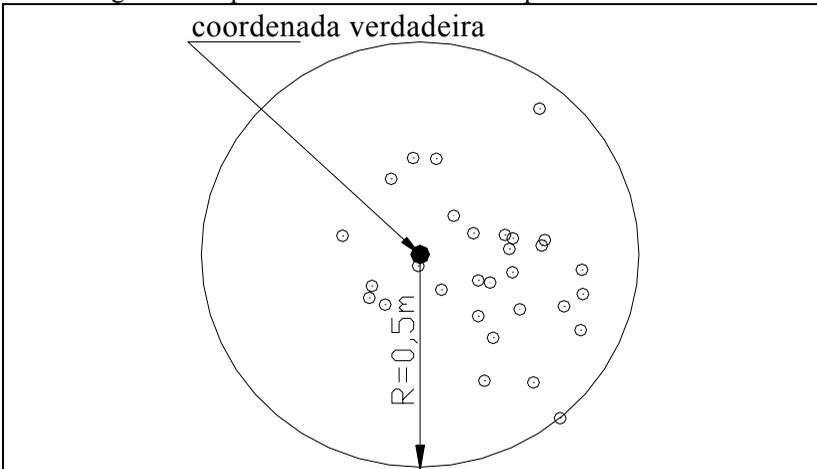


Figura 6: Dispersão das coordenadas no ponto GS3MRE1D.

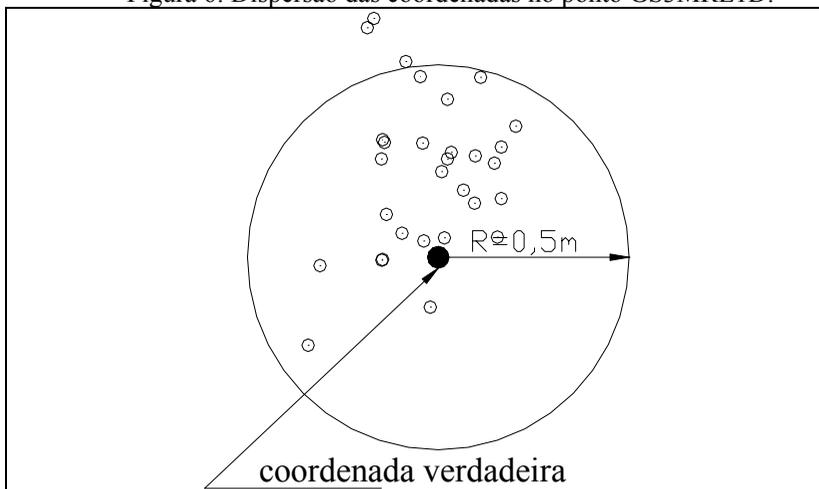
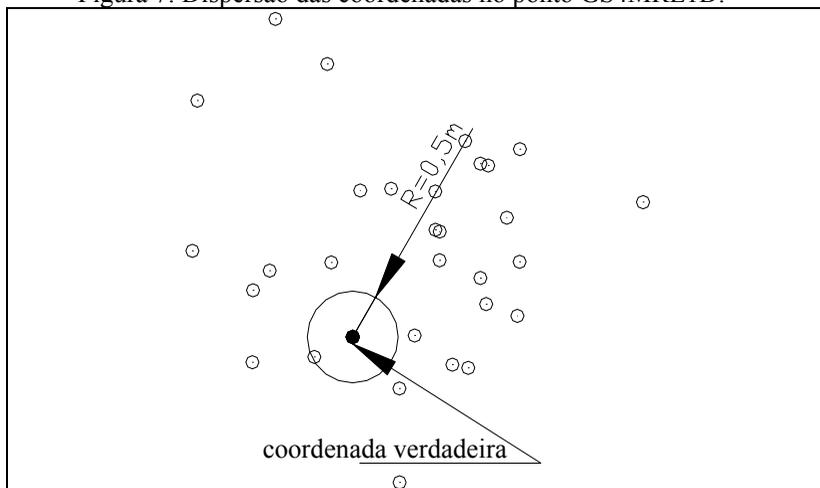


Figura 7: Dispersão das coordenadas no ponto GS4MRE1D.



A análise das figuras 5 a 7 mostra os efeitos sistemáticos apontados na tabela 1, na medida em que mostram tendências de posicionamento dos pontos em uma determinada região em relação ao valor verdadeiro. O maior efeito do multicaminho e de eventuais ruídos podem ser percebidos com bastante clareza sobre o desvio-padrão onde, nos pontos sujeitos a multicaminho mais intenso, a dispersão é

significativamente maior, apresentando maiores valores para a acurácia (pontos GS4MRE1D, GS4MRE2D, GS5MRE1D e GS5MRE2D).

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os resultados mostram os efeitos da aproximação do receptor em relação aos ambientes estudados, os quais foram tanto de natureza aleatória como sistemática, cujas principais fontes podem ser atribuídas em grande parte ao multicaminho e em menor grau ao ruído do receptor.

Do ponto de vista do usuário, os resultados advindos do processamento das medidas da fase, tendo-se utilizado o modo *Max Precision* do receptor, mostram que 20 metros de distância em relação ao tipo de refletor estudado, é uma distância segura para realizar posicionamento com medidas de fase utilizando o GS20, havendo baixa perda de ciclos e segurança para fixação das ambigüidades, podendo haver casos em que seja possível o uso de distâncias menores, pois somente embaixo da cobertura vegetal houve a perda quase total dos sinais de fase. Deve-se observar as condições aqui estudadas, ou seja, inicialização estática de 9 minutos, intervalo entre épocas de um segundo e permanência no ponto de 2,5 minutos. Nesses casos pode-se esperar com segurança a realização da precisão nominal do receptor, o que é um demonstrativo do bom desempenho da tecnologia *ClearTrak™* para as condições gerais de uso dos receptores dotados deste conjunto de recursos para trabalhos de georreferenciamento. Trabalhos em locais com condições piores (PDOP mais elevado e menor número de satélites, por exemplo) mas sem a perda do sinal podem ser resolvidos com um tempo de permanência um pouco maior no ponto (cerca de 15 a 20 minutos), sempre para distâncias da base até 5 km, conforme a configuração do aparelho (<http://www.leica-geosystems.com>). Pontos com forte obstrução têm as medidas de fase dificultadas, praticamente inviabilizando seu uso em sessões de ocupação relativamente curtas, o que demonstra ainda parecer haver margem para aperfeiçoamentos no processamento do sinal. Havendo necessidade de distâncias menores que 20 metros, recomenda-se a prévia desobstrução da cobertura vegetal, utilização de bastões com altura superior a essas ou a realização de vértices virtuais, conforme admitido na Norma Técnica .

No caso da utilização do código suavizado, valem as mesmas sugestões feitas para os trabalhos com fase. Como o efeito do multicaminho se refletiu tanto no comportamento aleatório quanto no sistemático, um bom indicativo da presença dele é dado por um desvio-padrão alto. Dessa forma sugere-se, pelo menos nos locais com maior potencial de haver limitação por multicaminho, fazer uma repetição (série) de observações e verificar a dispersão dos mesmos. Se o comportamento é satisfatório, pode-se proceder a escolha da estimativa com parâmetro de qualidade que se enquadra dentro das exigências da Norma Técnica. Esta pode ser uma boa opção para levantamentos sob cobertura vegetal (margens de rios e sangas, por exemplo) uma vez que, apesar da piora na qualidade da estimativa, o receptor apresentou boa capacidade de recepção nesses ambientes.

Do ponto de vista do receptor, os resultados com código suavizado mostram coerência com os resultados de fase. Também nesses casos somente houve acurácia incompatível com a Norma Técnica em pontos sob os refletores principais e fonte de interferência elétrica. A coerência reside no fato de que as perdas nas medidas de fase influenciaram o desempenho do algoritmo de suavização do código pelas ondas portadoras. Nesse caso, também uma eventual deficiência da antena em detectar um número muito grande de refletores pode ter influenciado. Como a taxa de suavização do código parece ser de 0,01 Hz, poder-se-ia esperar um desempenho máximo do algoritmo após 100 segundos para as condições da pesquisa, o que corresponde a 1,7 minutos. Nesse caso, o tempo excedente poderia ser justificado pela busca de maior segurança quando houvesse queda de ciclos. Partindo do pressuposto de que o máximo desempenho do receptor GS20 ocorre com 1,7 minutos de rastreo sem queda de ciclos, uma grande vantagem teriam os usuários se a empresa proporcionasse a informação das quedas de ciclos durante a sessão no mostrador do receptor. Nesse caso, o usuário poderia realizar uma sessão mais longa conforme fosse a necessidade, e não de forma preventiva como ocorre em muitos casos, com desperdício de tempo. Parece não haver limitação técnica para que a empresa proceda dessa forma, pois as medidas Doppler possibilitam essa detecção em tempo real, logo, essa é uma recomendação que parece bastante válida e de grande utilidade, e que fica da presente pesquisa. Interessante também a análise comparativa com os resultados obtidos por STANSELL & MAENPA (1999) em condições de rastreo do sinal sob folhagem, quando obtiveram um desvio-padrão de 1,44 metros somente com a tecnologia *MM Correlator* sem a suavização do código, sendo que no presente trabalho obteve-se 1,34 metros para o ponto 4 e 1,98 para o ponto 5. Não foi possível confirmar se o *MM Correlator* também encontra-se presente no receptor analisado, caso em que poderia-se esperar resultados um pouco melhores. Se isso é correto, talvez as pequenas diferenças possam residir na densidade das folhagens e na geometria próxima da antena.

Do ponto de vista dos desdobramentos futuros do presente trabalho, pretende-se um melhor estudo da influência da perda de ciclos nas medidas por código suavizado, especialmente objetivando a determinação do tempo ideal de rastreo para esses casos, uma vez que o tempo de 2,5 minutos adotado na presente pesquisa se baseou em dados de pesquisas preliminares (FARRET et al. 2005) e na frequência de atualização do algoritmo de suavização do código pela portadora (0,01 Hz). Pretende-se também fazer uma melhor análise do erro em nível de *DLL*, especialmente em função dos níveis de ruído, levando em conta os valores de espaçamento entre os correlacionadores e “bandwidth” (KAPLAN et. al., 2006). Da mesma forma, o estudo dos efeitos dos refletores vegetais e das redes elétricas de forma separada.

6 AGRADECIMENTOS

Os autores apresentam seus agradecimentos a empresa Manfra & Cia. Ltda., representante da Leica no Brasil, pela cedência de equipamentos e material técnico que possibilitaram a presente pesquisa.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BRAASCH, M. S.; McGraw, G. *GNSS Multipath Mitigation Using Gated and High Resolution Correlator Concepts*. Proceedings... Institute of Navigation National Technical Meeting, San Diego, CA, Jan, 1999.
- BISNATH, S.; BERAN, T.; LANGLEY, R. *Precise Platform Positioning with a Single GPS Receiver*. GPS World, 2002. Disponível em <http://gpsworld.com/gpsworld/article/articleDetail.jsp?id=15110>. Acesso em: 23 nov 2004.
- BRAASH, M. S. *Multipath Effects*. In: PARKINSON, B. W. e SPILKER, J. J. *Global Positioning System: Theory and Applications*. Cambridge: American Institute and Aeronautics, 1996, VII, p.547-568.
- BRASIL. Lei 10.267/2001. Altera dispositivos de Leis anteriores e cria o CNIR. Brasília, ed DOU, 2001.
- COSTA NETO, P. L. O. *Estatística*. São Paulo: E. Blücher, 1977
- FARRET, et al. *A Acurácia Possível no Georreferenciamento com Código Suavizado: O Caso do Receptor GPS GS20 – Multicaminho e Interferência*. In: COLÓQUIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS, 4, 2005 Curitiba. Anais... Curitiba: UFPR, 2005.
- FARRET, J. C. *O Efeito do Multicaminho Estático nas Medidas da Fase das Portadoras GPS*. Curitiba, 2000. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) - Universidade Federal do Paraná, 2000.
- FARRET, J. C. et al. *Correlação SNR e Multicaminho na Fase das Portadoras GPS*. In: COLÓQUIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS, 3, 2003 Curitiba. Anais... Curitiba: UFPR, 2003. 1 CD-ROM.
- FENTON, P. et al. *Novatel's GPS Receiver: The High Performance OEM Sensor of the Future*. In: INTERNATIONAL TECHNICAL MEETING, 1991, Albuquerque. Proceedings... Washington, p. 49-58, 1991.
- GADALLAH, E.S.; PACTER, M.; DeVILIBISS, S. *Design of GPS Receiver Code and Carrier Tracking Loops for Multipath Mitigation*. In: INTERNATIONAL TECHNICAL MEETING, 11., 1998 Nashville. Proceedings... Nashville: THE SATELLITE DIVISION OF THE INSTITUTE OF NAVIGATION, 1998.
- GARIN, L.; Van DIGGELEN, F. e ROUSSEAU, J. M. *Strobe & Edge Correlator – Multipath Mitigation for Code*. In: INTERNATIONAL TECHNICAL MEETING, 9, 1996, Kansas City. Proceedings... Kansas City: The Satellite Division of the Institute of Navigation, 1996. p. 657-664.

- GEMAE, C. *Introdução ao Ajustamento de Observações – Aplicações Geodésicas*. Curitiba: Ed. UFPR, 1994.
- HATCH, R. R. et al. *Code and Phase Multipath Mitigation Techniques*. GPS Directory, 1998.
- HATCH, R. R. *The Synergism of GPS Code and Carrier Measurement*. In: International Geodetic Symposium on Satellite Doppler Positioning, 3., 1982, Washington. Proceedings... Washington: 1982.
- HATCH, R.R; KEEGAN, R.G.; STANSELL, T.A. *Leica's Code and Phase Multipath Mitigation Techniques*. Proceedings of the National Technical Meeting, INSTITUTE of NAVIGATION. January, 1998.
- HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; COLLINS, J. *Global Positioning System Theory and practice*. 5.ed Wien: Springer, 2001.
- INSTITUTO NACIONAL DE COLONIZAÇÃO E REFORMA AGRARIA (Brasil). Ministério do Desenvolvimento Agrário. Norma Técnica para Georreferenciamento de Imóveis Rurais. Aplicada à Lei 10.267, de 28 de agosto de 2001 e do Decreto 4.449, de 30 de outubro de 2002. Brasília, DF, nov, 2003. Disponível em:
<<http://200.252.80.5/Cartografia/download/Norma%20Técnica.pdf>>. Acesso em: 10 jul 2004.
- KAPLAN, E. D.; HEGARTY, C. J. *Understanding GPS Principles and Applications*. 2.ed Boston/London: Artech House, 2006.
- LACHAPELLE, G. et al. *GPS Land Kinematic Positioning Experiments*. Proceedings 4th Int. Geod. Symp. On Satellite Positioning, Austin, v. 2. 1986, p. 1327-1344.
- LAXTON, M. C. *Analysis and Simulation a New Code Tracking Loop For GPS Multipath Mitigation*. WPAFB, Ohio: Master Thesis, Air Force Institute of Technology, 1996.
- LEICA GEOSYSTEMS INC., Torrance, CA, USA. Disponível em:
<<http://www.leica-geosystems.com/>>. Acesso em: 16 jan 2004.
- MONICO, J. F. G. *Posicionamento pelo NAVSTAR – GPS: Descrição, Fundamentos e Aplicações*. São Paulo: UNESP, 2000.
- RAY, J.K.; CANNON, M.E.; FENTON, P. *Mitigation of Static Carrier Phase Multipath Effects Using Multiple Closely-Spaced Antennas*. In: INTERNATIONAL TECHNICAL MEETING, 11, 1998, Nashville. Proceedings... The Satellite Division of the Institute of Navigation, p. 1025-1034. 1998.
- SEEBER, G. *Satellite Geodesy: Foundations, Methods, and Applications*. Berlin: W. de Gruyter, 2003.
- SHEEN, W. H.; STUBER, G. L. *A Coherent Tracking Loop for Direct Sequence Spread Spectrum Systems on Frequency Selective Fading Channels*. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Communications, Seattle, Washington. p. 1364-1368, jun, 1995.

- SOUZA, E. M.; MONICO, J. G. *Efeito de Multicaminho nas Medidas de Fase e Pseudodistância GPS: Detecção e Atenuação Utilizando Wavelets*. In: COLÓQUIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS, 3, Curitiba. Novos Desenvolvimentos em Ciências Geodésicas: Anais. Curitiba: UFPR, 2003. 1 CD-ROM.
- STANSELL, T. A.; MAENPA, J. E. *ClearTrak™ Receiver Technology*, Leica Geosystems Inc., Torrance, CA, March, 1999.
- TOWNSEND, B. R.; FENTON, P.; VAN NEE, D. J. R.; VAN DIERENDONCK, A. J. *Performance Evaluation of the Multipath Estimating Delay Lock Loop*, In: NATIONAL TECHNICAL MEETING, 01. 1995, Anaheim. Proceedings... Anaheim: INSTITUTE OF NAVIGATION, 1995.
- VAN DIERENDONCK, A. J.; FENTON, P.; FORD, T. *Theory and Performance of Narrow Correlator Technology in GPS Receiver*. Journal of The Institute of Navigation, USA, v. 39, n. 3. 1992, p. 265-283.
- VAN NEE, R. D. J.; SIEREYELD, J.; FENTON, P. C.; TOWNSEND, B. R. *The Multipath Estimating Delay Lock Loop Approaching Theoretical Accuracy Limits*. IEEE Position: Location and Navigation Symposium, Las Vegas, 1994.
- WEILL, L. R. *Conquering Multipath: The GPS Accuracy Battle*. GPS World, v. 8, p. 59-66, 1997.
- WESTROP, J., Napier, M., Ashkenazi, V. *The Use of Phase for Kinematic Positioning by GPS*. In: Book, Leppard (eds), p. 334-339, 1990.

(Recebido em fevereiro/2006. Aceito em novembro/2006)