

ANÁLISE DE SÉRIES TEMPORAIS DE COORDENADAS ESTIMADAS COM GPS: UMA PROPOSTA METODOLÓGICA PARA DETECÇÃO, REMOÇÃO E RECUPERAÇÃO DE EFEITOS SAZONALIS

Time series analysis of coordinates estimated with GPS: a methodological approach to detect, remove and recover seasonal effects

GUILHERME POLESZUK DOS SANTOS ROSA
JOÃO FRANCISCO GALERA MONICO
JOÃO CARLOS CHAVES

Programa de Pós Graduação em Ciências Cartográficas
Universidade Estadual Paulista - UNESP
Rua Roberto Simonsen, 305, Caixa Postal 467
CEP 19060-900, Presidente Prudente, SP
gpoleszuk@gmail.com; {galera.jcchaves}@fct.unesp.br

RESUMO

As redes ativas GPS são cada vez mais utilizadas em levantamentos geodésicos e experimentos científicos, tais como o monitoramento do vapor d'água na atmosfera e o movimento de placas litosféricas. Dentre os métodos de posicionamento GPS, o Posicionamento por Ponto Preciso (PPP) vem apresentando resultados muito promissores. Uma característica do PPP está relacionada com a modelagem e/ou estimação dos erros envolvidos nesse método. A acurácia obtida para as coordenadas pode ser da ordem de poucos milímetros. Contudo, efeitos sazonais podem afetar essa acurácia, caso não sejam considerados nas séries temporais das coordenadas das estações. Análises de séries temporais de coordenadas têm sido realizadas utilizando análise espectral de Fourier ou harmônica, *wavelets*, método dos mínimos quadrados (MMQ), dentre outros. No presente trabalho apresenta-se uma proposta metodológica visando investigar os efeitos sazonais presentes nas séries temporais de coordenadas. Experimentos foram realizados utilizando dados das estações Manaus (NAUS) e Fortaleza (BRFT) pertencentes à Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC). As coordenadas dessas estações foram estimativas diariamente com o PPP e analisadas por meio de *wavelets* para

identificação dos períodos dos efeitos sazonais (anual e semi-anual) presentes em cada série temporal. Os efeitos foram removidos mediante um processo de filtragem aplicado nas séries por meio do ajuste de uma função periódica pelo MMQ. Os resultados mostraram que a combinação dessas ferramentas matemáticas, *wavelets* e MMQ, é um interessante método para detecção e remoção de efeitos sazonais em séries temporais.

Palavras-chave: Redes ativas GPS; Efeitos sazonais; Posicionamento por Ponto Preciso; Método dos Mínimos Quadrados; Wavelets

ABSTRACT

GPS active networks are more and more used in geodetic surveying and scientific experiments, as water vapor monitoring in the atmosphere and lithosphere plate movement. Among the methods of GPS positioning, Precise Point Positioning (PPP) has provided very good results. A characteristic of PPP is related to the modeling and / or estimation of the errors involved in this method. The accuracy obtained for the coordinates can reach few millimeters. Seasonal effects can affect such accuracy if they are not consistent treated during the data processing. Coordinates time series analyses have been realized using Fourier or Harmonics spectral analyses, wavelets, least squares estimation among others. An approach is presented in this paper aiming to investigate the seasonal effects included in the stations coordinates time series. Experiments were carried out using data from stations Manaus (NAUS) and Fortaleza (BRFT) which belong to the Brazilian Continuous GPS Network (RBMC). The coordinates of these stations were estimated daily using PPP and were analyzed through wavelets for identification of the periods of the seasonal effects (annual and semi-annual) in each time series. These effects were removed by means of a filtering process applied in the series via the least squares adjustment (LSQ) of a periodic function. The results showed that the combination of these two mathematical tools, wavelets and LSQ, is an interesting and efficient technique for removal of seasonal effects in time series.

Keywords: GPS active networks; seasonal effects; Precise Point Positioning; Least Square Method; Wavelets

1. INTRODUÇÃO

No contexto da Geofísica, os estudos voltados à detecção de movimentos de placas litosféricas têm sido um dos assuntos que, com a colaboração de algumas áreas das Ciências Exatas e da Terra, procura investigar os fenômenos que ocorrem na crosta terrestre. O GPS (*Global Positioning System*) é uma tecnologia que tem sido utilizada em uma variedade de aplicações, uma delas o monitoramento da velocidade das placas litosféricas (MONICO, 2000; PEREZ, MONICO & CHAVES, 2003). A análise das séries temporais, obtidas do processamento dos dados coletados pelos receptores de uma rede ao longo de anos, torna possível

detectar os movimentos relacionados à placa que contém essas estações, revelando efeitos de longo período que não são notados em séries diárias de coordenadas.

O comportamento das coordenadas das estações GPS espalhadas pelo globo tem sido constantemente investigado por alguns centros de pesquisa visando, por exemplo, a realização dos sistemas de referência. Desses centros, destaca-se o IGS (*International GNSS Service*), que consiste de mais de 200 agências que voluntariamente mantêm as estações GPS e GLONASS (*Global'naya Navigatsionnaya Sputnikova Sistema*) espalhadas pela superfície terrestre em constante funcionamento (IGS, 2008). De maneira recíproca, o IGS fornece alguns importantes produtos, como as órbitas dos satélites, erros dos relógios, elementos de orientação da Terra etc., os quais são produtos de alta qualidade e indispensáveis para pesquisas científicas e atividades operacionais relacionadas ao GNSS. No Brasil, o IBGE (Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) contribui com o IGS e utiliza seus produtos. O IBGE tem desempenhado uma importante função como mantenedor da RBMC, possibilitando a realização de inúmeras pesquisas com os dados de suas estações integradas com produtos do IGS. A análise das séries temporais das coordenadas das estações é uma delas, viável e necessária, cujo estudo tem grande importância no âmbito científico e técnico, pois essa rede é utilizada como referência nas atividades geodésicas que fazem uso dos dados GPS.

A maioria das estações de monitoramento contínuo atualmente disponibiliza seus dados ao público, geralmente de forma *on-line*, e mais recentemente também em tempo real, usando o protocolo NTRIP (*Networked Transport of RTCM via Internet Protocol*). No Brasil, a RBMC possui algumas estações com mais de dez anos de funcionamento. Estações como essas podem revelar influências causadas por eventos geofísicos de longo período, sazonais e/ou tendenciosos mediante análise das coordenadas advindas do processamento de seus dados. Quando tais efeitos não são considerados no processamento dos dados, parte deles será absorvida pelos parâmetros do modelo funcional. Dependendo do método de processamento, somente os erros presentes nas observáveis GPS já contribuem com cerca de alguns metros de maneira quase direta na posição estimada.

Um estudo realizado por Bevis et al. (2005) mostrou que as estações de monitoramento contínuo estão sujeitas a fatores ambientais. A estação MANA (Manaus), instalada na bacia Amazônica apresentou uma variação de 70 mm de amplitude vertical, indicando uma alta correlação com as enchentes e vazantes do rio Amazonas. A carga hidrostática na região produz variações nas coordenadas cujos maiores efeitos são detectados na componente vertical. Esse estudo mostrou que as coordenadas das estações possuem além de uma tendência linear (velocidade), variações cíclicas (sazonais) que dependem diretamente do local em que a estação encontra-se instalada. Acredita-se que efeitos dessa natureza estejam presentes nas séries temporais das demais estações GNSS da RBMC.

Com o desenvolvimento de novos modelos surge o interesse em reprocessar os dados, adotando os conceitos mais atuais, envolvendo diversas áreas do

conhecimento, levando em conta a evolução tecnológica, notável principalmente na Geodésia por satélites. Os efeitos temporais nas coordenadas de estações vêm sendo re-analisados pela comunidade geodésica e tem auxiliado nos projetos em que se objetiva alta precisão. As análises de séries temporais de coordenadas têm sido realizadas utilizando análise espectral de Fourier ou harmônica, *wavelets*, método dos mínimos quadrados (MMQ), dentre outros (AMIRI-SIMKOOEI, TIBERIUS & TEUNISSEN, 2007). No presente trabalho objetiva-se apresentar uma proposta metodológica visando investigar os efeitos sazonais presentes nas séries temporais de coordenadas, integrando *wavelets* e o MMQ.

2. OS FUNDAMENTOS E CONCEITOS ENVOLVIDOS NO TRABALHO

Os fundamentos básicos necessários para a proposta metodológica deste trabalho serão apresentados, dentre eles o PPP (Posicionamento por ponto preciso), séries temporais a análise de *wavelets* e sua integração com o MMQ.

2.1 Posicionamento por Ponto Preciso

O PPP é um dos métodos de posicionamento factíveis de serem realizados com o GNSS. Refere-se ao posicionamento com precisão da ordem de poucos centímetros, com apenas um receptor, no modo estático e um longo período de coleta de dados. Já para o PPP no modo cinemático a precisão das coordenadas estimadas se deteriora para a casa dos decímetros. Deve-se considerar no processamento a combinação linear livre da ionosfera (*iono-free*) para o código e fase de batimento da onda portadora (LEICK, 2004), ou inserir correções devidas à ionosfera a partir de modelos. A qualidade das coordenadas estimadas está relacionada principalmente aos erros considerados no processamento dos dados, cuja remoção parcial ou completa dos efeitos é realizada através de modelos matemáticos ou estratégias de parametrização. Quanto aos modelos, a maioria foi desenvolvida com base em teorias, mas outros tiveram seus parâmetros determinados empiricamente, como é o caso de alguns modelos da troposfera (Hopfield, Saastamoinen, etc.), logo não sendo tão precisos em descrever determinada realidade física.

Um dos requisitos para realizar o PPP é dispor das posições e do erro do relógio de cada satélite com alta acurácia. Essa informação é disponibilizada pelos centros integradores de órbitas, que estimam as efemérides precisas e os erros dos relógios dos satélites, fornecendo-os sem nenhum custo (IGS, 2008). Esses produtos, especificamente as efemérides, atualmente encontram-se disponíveis em três níveis de qualidade: efemérides ultra-rápidas, rápidas e precisas. A principal diferença entre cada um desses produtos está relacionada com sua qualidade, que advém do lote de dados utilizado para estimar os parâmetros, fator determinante para a latência das efemérides rápidas e precisas bem como as estimativas dos erros dos relógios dos satélites.

Quando se dispõe de dados de receptores de dupla freqüência, tanto para fase (L1 e L2) quanto para o código (C1 ou P1 e P2), a combinação *iono-free* pode ser utilizada para eliminar os efeitos de primeira ordem da ionosfera presente nas observáveis. Os modelos matemáticos utilizados no PPP que descrevem as observáveis básicas depois de realizada a combinação linear *iono-free*, são apresentados na Equação 1 (MONICO, 2008):

$$\begin{aligned} PD_{r,IF}^s &= \rho_r^s + c(dt_r - dt^s) + T_{r,0}^s + dt_r^s m(E) + dm_{PD} \\ \Phi_{r,IF}^s &= \frac{f_I}{c} \rho_r^s + f_I(dt_r - dt^s) + N_{IF} + \frac{f_I}{c} T_{r,0}^s + \frac{f_I}{c} dt_r^s m(E) + dm_{\varphi} \end{aligned} \quad (1)$$

onde: $PD_{r,IF}^s$ = pseudodistância resultante da combinação linear *iono-free*; $\Phi_{r,IF}^s$ = fase obtida da combinação linear *iono-free*; ρ_r^s = distância geométrica entre os centros de fase da antena do satélite e do receptor; dt_r = erro do relógio do receptor; dt_s = erro do relógio do satélite; N_{IF} = ambigüidade da observável *iono-free*; $T_{r,0}^s$ = atraso zenital troposférico obtido de um modelo teórico ou empírico; dt_r^s = atraso zenital troposférico residual; $m(E)$ = função de mapeamento em função do ângulo de elevação E do satélite; dm_{PD} = efeito do multicaminho na pseudodistância; dm_{φ} = efeito do multicaminho na fase; c = velocidade da luz no vácuo (299.792.458 m/s); f_I = freqüência da observável *iono-free*.

No modelo matemático para a pseudodistância e fase da onda portadora (Equação 1), comparecem apenas os erros mais comuns. O erro do relógio do satélite dt^s é injuncionado pelo valor fornecido no arquivo de efemérides precisas.

O atraso troposférico total é representado por uma parcela constante $T_{k,0}^p$, relacionada à componente hidrostática, geralmente modelada e $dt_k m(\vartheta^p)$, que é uma variável referente principalmente à componente úmida, mapeada por uma função de acordo com o ângulo de elevação do satélite. Essa última possui uma alta taxa de variação durante poucas horas sendo de difícil modelagem, fazendo com que passe a ser tratada como um parâmetro no processamento. No caso do efeito do multicaminho (dm), ao realizar a combinação *iono-free*, os erros provenientes desse efeito e ruídos são ampliados. Devido ao fato do efeito do multicaminho ser altamente dependente de cada ambiente onde a observação está sendo realizada, a modelagem desse efeito torna-se difícil (HOFMANN-WELLENHOF, LICHTENEGGER e COLINS, 2001).

2.2 Séries Temporais: Detecção e Remoção dos Efeitos de Tendência e Sazonalidade

Os efeitos presentes nas séries temporais podem ser removidos mediante o ajustamento de uma função adequada aos dados. O vetor de resíduos do processo de ajustamento corresponde à série filtrada dos efeitos considerados no modelo matemático. A escolha do modelo matemático apropriado geralmente é feita com base no conhecimento de algumas hipóteses, ou seja, considerando que a série esteja envolvida de um deslocamento, uma tendência e efeitos de natureza cíclica. Pode-se acrescentar uma parcela representando os saltos presentes na série devido à substituição de antena, receptor, sismos, dentre outros efeitos. Na Equação 2 é apresentado o modelo matemático que leva em consideração esses efeitos (NIKOLAIDIS, 2002):

$$y(t_i) = a + bt_i + c \sin(2\pi t_i) + d \cos(2\pi t_i) + e \sin(4\pi t_i) + f \cos(4\pi t_i) + \sum_{j=1}^{n_g} g_j H(t_i - T_{gj}) + \nu_i; \quad (2)$$

onde a e b representam os coeficientes linear e angular da reta, respectivamente. Os coeficientes c e d representam a amplitude dos efeitos anuais. Os coeficientes e e f representam a amplitude dos efeitos semi-anuais. H é a função salto de Heaviside (WEISSSTEIN, 2008; BRACEWELL, 2000) e ν_i representando os efeitos não modelados, considerados como sendo efeitos residuais.

Um modelo matemático utilizado para remoção dos efeitos de tendência e sazonalidade mais simples é apresentado na Equação 3 (AMIRI-SIMKOOEI, TIBERIUS, TEUNISSEN, 2007; CHATFIELD, 1984):

$$y_n(t) = y_0 + rt + \sum_{k=1}^m a_k \cos(\omega_k t) + b_k \sin(\omega_k t) \quad (3)$$

onde y_0 e r representam os coeficientes linear e angular da reta. Os coeficientes a_k e b_k representam as amplitudes dos termos harmônicos do cosseno e seno, respectivamente. O argumento ω_k das funções trigonométricas é dado por $\omega_k = 2k\pi$. Cada elemento da série temporal é representado por $y_n(t)$.

Os modelos matemáticos apresentados na Equação 2 e Equação 3 são similares, atuando de maneira idêntica desde que a série temporal esteja livre dos saltos devido a eventos específicos na estação GPS. Uma particularidade desses

modelos é que ambos possuem uma estrutura linear, a menos que os coeficientes ω_k sejam desconhecidos.

2.3 Análise de Séries Temporais Usando Wavelets

A análise de sinais por meio de *wavelets* consiste em decompor um sinal em componentes dentro do espaço de freqüências e tempo. São utilizadas funções *wavelets* limitadas, cuja energia é restrita a um intervalo finito. Essa característica é conhecida por suporte compacto e permite a localização espacial na análise.

Existem diversas funções *wavelets* de suporte compacto e, uma vez escolhida um dessas funções, conhecida como *wavelet* mãe ou base, a análise de *wavelets* é realizada a partir de translações e dilatações (compressões) dessa *wavelet* base.

Dentre as *wavelets* existentes, cada uma aplica-se a um determinado fim. Segundo Christopoulou (2002), a *wavelet* de Morlet é a mais apropriada para análise de séries temporais provenientes de situações do mundo real.

Wavelets pode ser utilizada para analisar séries temporais que contenham energia não-estacionária em diferentes freqüências. Nesse sentido, a série temporal é decomposta em componentes de diversas freqüências e escalas para obter o espectro de *wavelets*. A partir desse espectro, informações desconhecidas da série são reveladas, ou seja, é possível conhecer as freqüências predominantes e onde elas ocorrem no tempo, o que não é possível com a análise de Fourier. Para aplicação da análise de *wavelets* assume-se que a série temporal seja igualmente espaçada no tempo (TORRENCE e COMPO, 1998).

2.4 Intregação de Wavelets e MMQ

Utilizando a análise de *wavelets* para investigar uma série temporal, a qual pode em princípio ser considerada como sendo do tipo da Eq. 2, é possível quantificar os períodos existentes na série. De posse dessas informações, pode-se num segundo momento injuncionar os valores desses períodos e estimar os demais elementos do modelo num ajustamento pelo MMQ.

3. METODOLOGIA PROPOSTA NA ANÁLISE DE SÉRIES TEMPORAIS DE COORDENADAS GPS

A partir das coordenadas cartesianas geodésicas (X, Y, Z) obtidas do processamento, com suas respectivas precisões, efetua-se a análise das coordenadas após essas terem sido transformadas para um sistema de referência geodésico local (E, N e U). As coordenadas diárias estimadas para cada componente durante um determinado período representam as séries temporais, as quais são os dados de entrada. Algumas características das séries temporais, como a tendência e sazonalidade, são determinadas computacionalmente por meio de aplicativos apropriados. Para a análise de tendência, foi implementado o MMQ conforme a metodologia descrita na seção 2.2. Já para a análise da sazonalidade foi utilizado o

toolbox desenvolvido por Torrence e Compo (1998). Esse *toolbox* permite realizar a análise de *wavelets*. Dessa forma, as séries temporais são decompostas e as informações referentes à periodicidade de cada série podem ser obtidas. Num segundo passo, essas informações são aplicadas no argumento ω_k , referente à freqüência, do modelo matemático simplificado que é apresentado na Equação 3 (seção 2.2), tornando possível a remoção dos efeitos de sazonalidade da série.

De forma geral, são utilizadas duas ferramentas matemáticas integradas: *wavelets* e estimativa pelo MMQ. A primeira delas proporciona a freqüência com que determinado fenômeno ocorre, bem como sua localização no tempo. Já a segunda permite estimar os parâmetros que descrevem a série temporal no que diz respeito à amplitude do efeito, pois a freqüência de ocorrência passa a ser injuncionada assim que obtida por *wavelets*. Dessa forma, os efeitos citados podem ser removidos e recuperados quando necessário.

4. EXPERIMENTOS REALIZADOS

Os dados das estações NAUS e BRFT da RBMC, localizadas, respectivamente, nas cidades de Manaus-AM e Euzébio-CE, foram processados utilizando o *software* NRCan-PPP, utilizando dados de um período de dois anos e maio. Os efeitos anual e semi-anual poderão ser estimados, apesar de o período do efeito anual estar próximo ao limiar estabelecido pelo critério de Nyquist (INGLE, 2000).

A partir das séries temporais das coordenadas geocêntricas X, Y e Z foram obtidos os respectivos valores médios e discrepâncias em relação a media. Essas discrepâncias foram transformadas para um sistema geodésico local (E, N e U) cuja origem foi definida como sendo a média das coordenadas da série. Enquanto as componentes E e N representam a variação horizontal das estação, a componente U mostra a variação na vertical.

4.1. Análise dos Efeitos Sazonais na Estação Manaus (NAUS)

Os dados referentes à estação NAUS foram processados no modo PPP utilizando as correções de marés oceânicas, marés terrestres, segundo os padrões IERS (*International Earth Rotation and Reference System Service*) (MCCARTHY, 2004) e correções absolutas para a variação do centro de fase da antena segundo o padrão do IGS (IGS, 2008). Para a modelagem da troposfera o modelo de Hopfield foi empregado. Nas Figuras 1, 2 e 3 são apresentadas as séries temporais das coordenadas diárias, representadas no sistema geodésico local, tendo como origem o valor médio calculado.

Figura 1. Série temporal da componente Leste.

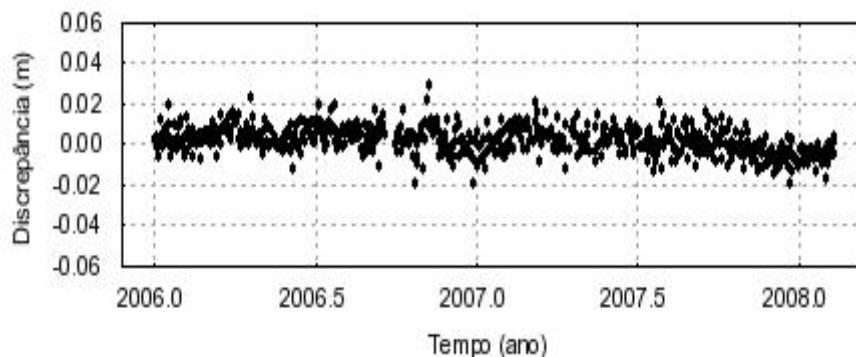


Figura 2. Série temporal da componente Norte.

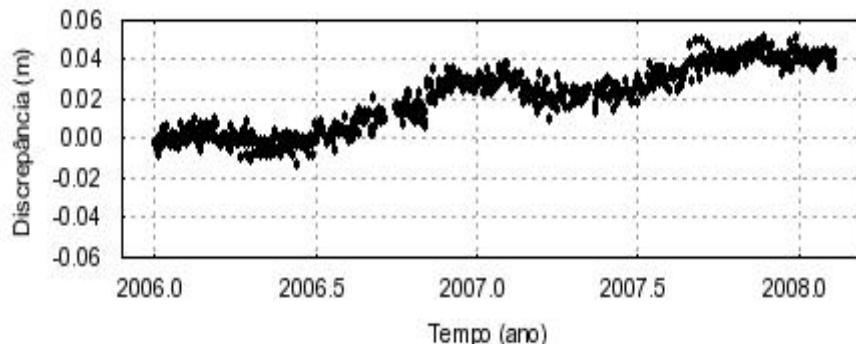
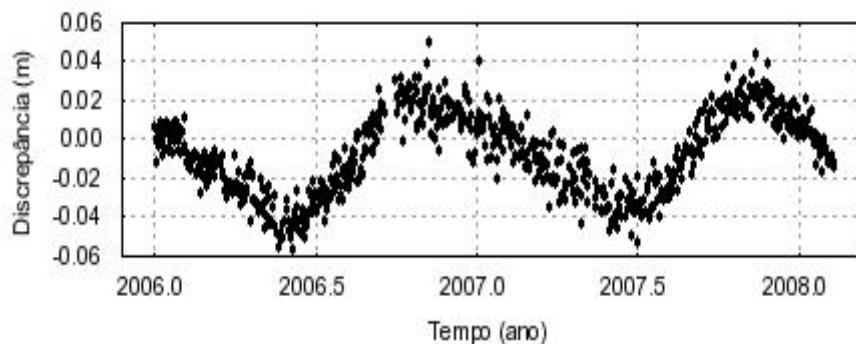


Figura 3. Série temporal da componente Vertical.



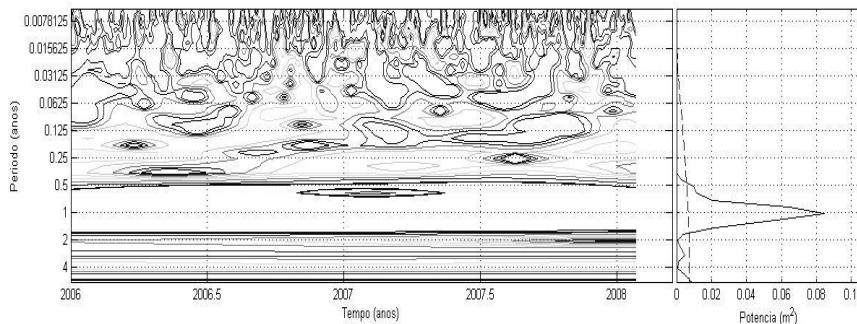
Verifica-se que a componente Leste praticamente não apresenta efeitos periódicos. O mesmo não pode ser afirmado a respeito da componente Norte que, além de apresentar uma tendência linear, um efeito sazonal também pode ser notado. Contudo, o maior efeito sazonal está praticamente concentrado na componente Vertical, fato também apresentado em Amiri-Simkooei, Tiberius, Teunissen (2007) e Amiri-Simkooei (2008). Dessa forma, a componente Vertical será analisada primeiramente por apresentar o maior efeito.

4.1.1 Remoção dos Efeitos de Tendência e Sazonais para a Componente Vertical

A remoção do efeito de tendência e das componentes sazonais das séries temporais foi realizada mediante um ajuste pelo MMQ usando os dois primeiros termos do lado direito do modelo matemático apresentado na Equação 2 (seção 2.2). Em relação às componentes sazonais, considerou-se presente na série um efeito de período anual e semi-anual, da mesma forma como apresentado em Amiri-Simkooei, Tiberius e Teunissen (2007) e Nikolaidis (2002).

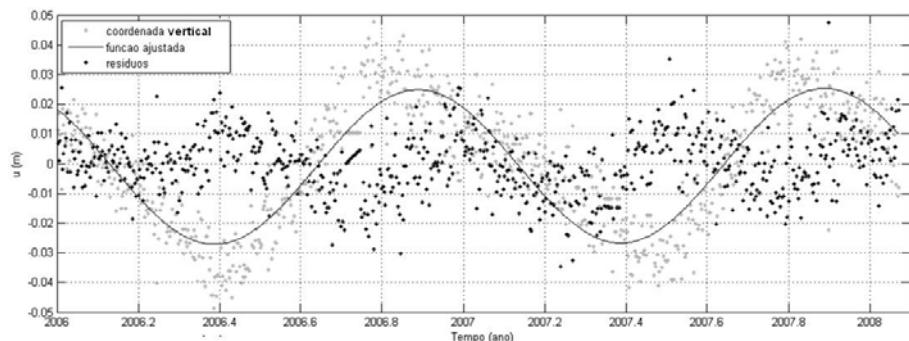
A análise de *wavelets* é uma ferramenta ideal para decompor a série temporal e, a partir do espectro de *wavelets*, obter informações sobre a periodicidade da mesma. Dessa forma, na Figura 4 é apresentado o espectro de *wavelets* correspondente à componente Vertical.

Figura 4. Espectro de *wavelets* para a componente Vertical.

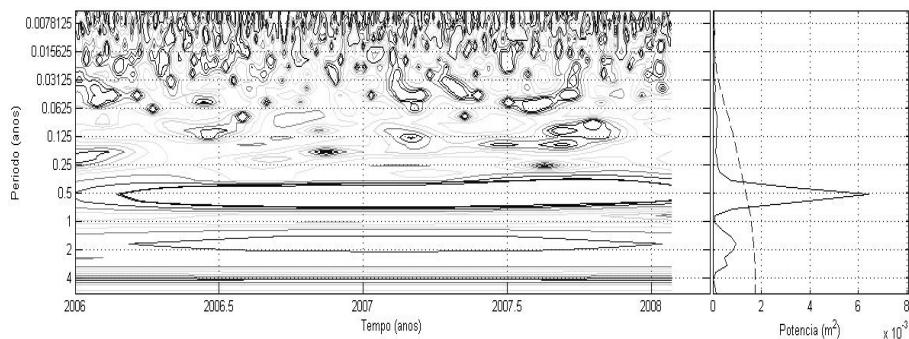


Na Figura 4 nota-se um efeito de sazonal com período de um ano, que está presente em toda a série. Tendo por base o período apresentado no espectro, foi removido esse efeito anual utilizando o ajuste da curva da Equação 3 com a constante m sendo definida igual a 1. Na Figura 5 é apresentada a nova curva, como também os resíduos do ajuste, representando as medidas sem o efeito anual.

Figura 5. Série temporal da componente Vertical e curva ajustada.

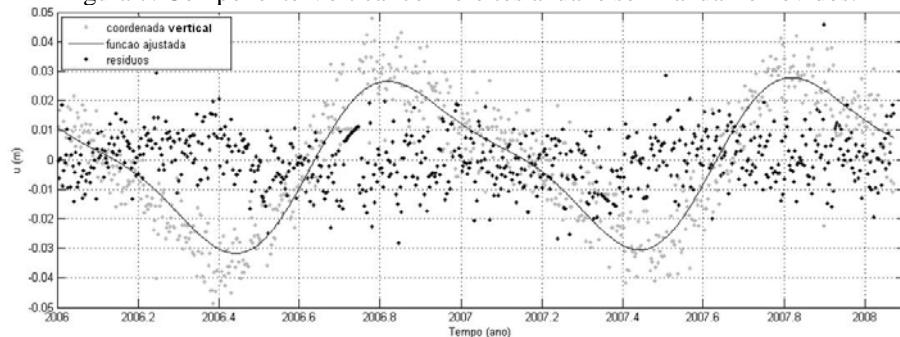


Analizando a Figura 5, nota-se que nos resíduos ainda permanece um efeito periódico de menor magnitude que o anual. A Figura 6 apresenta o espectro de *wavelets* da série temporal dos resíduos apresentados na Figura 5, ou seja, da componente Vertical com o efeito anual removido.

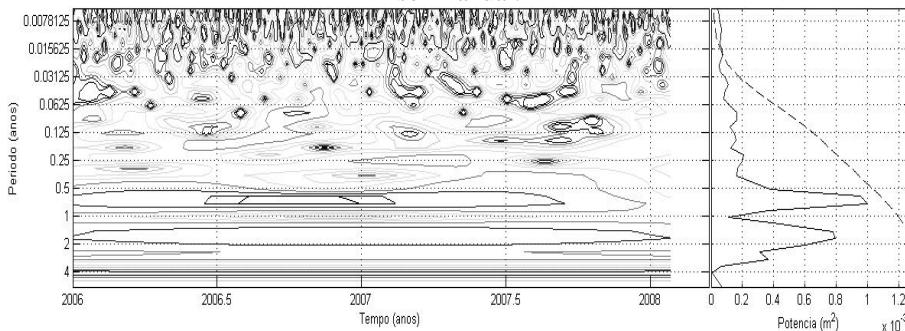
Figura 6. Espectro de *wavelets* para a componente Vertical com efeito anual removido.

Na Figura 6 constata-se uma considerável redução do espectro de potências, revelando outras características do sinal que estavam “ocultas” devido à grande magnitude do efeito anual, agora removido. Nota-se que um efeito semi-anual está presente na série e para removê-lo foi utilizado o procedimento de ajuste da curva da Equação 3 com a constante m sendo definida igual a 2. O mesmo procedimento adotado para remoção do efeito anual, porém com mais um período a ser removido, o semi-anual, foi adotado. Como resultado, obteve-se a série apresentada na Figura 7.

Figura 7. Componente Vertical com efeitos anual e semi-anual removidos.

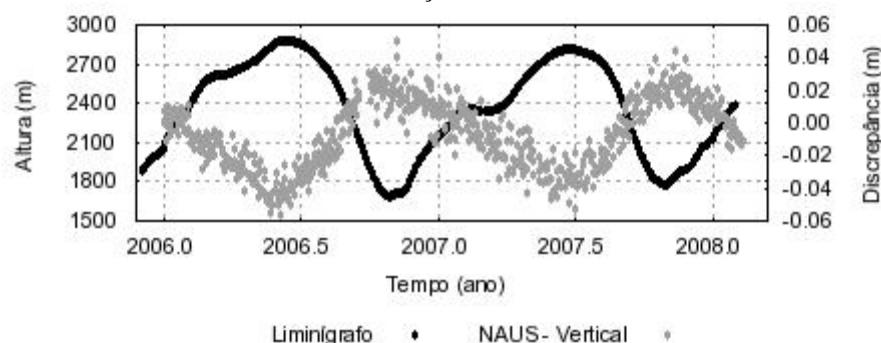


Com a remoção dos efeitos anual e semi-anual presente na série da componente Vertical, foi aplicado novamente a análise de *wavelets* que gerou o espectro apresentado na Figura 8. Outras características periódicas de menor potência que ainda ficaram presentes no sinal foram reveladas.

Figura 8. Espectro de *wavelets* para a componente Vertical sem os efeitos anual e semi-anual.

Considerando a localização dessa estação, numa região com um sistema de rios e afluentes que durante o ano afetam a região com as enchentes e vazantes, os resultados mostram-se semelhantes àquele apresentado em Bevis et al. (2005), onde os resultados referentes à componente vertical apresentaram-se anti-correlacionados com as medidas do limnógrafo instalado em Manaus (AM), fato também constatado neste trabalho. Tal constatação pode ser observada na Figura 9, gerada a partir dos dados limnográficos obtidos em <http://hidroweb.ana.gov.br>, para a estação Manaus (Identificador 14990000) instalada na bacia do Rio Amazonas, na cidade de Manaus.

Figura 9. Série temporal do limnígrafo na região de Manaus (Estação MANAUS) (em preto) e série temporal da estação GPS NAUS (em cinza), mostrando que o efeito de carga na região é inversamente correlacionado à variação da altura na estação GPS.

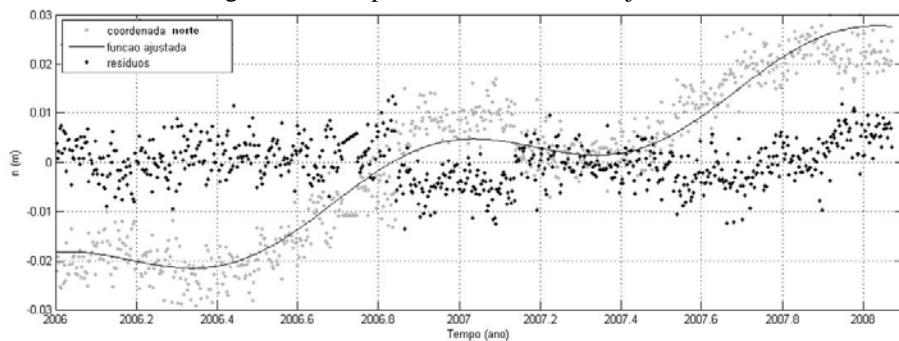


Contudo, apesar de parte dos efeitos sazonais serem devidos ao efeito causado pela carga provocada pelas enchentes, ainda permanecem, na série temporal, outros efeitos que requerem um estudo mais detalhado a fim de identificar a causa desses harmônicos residuais.

4.1.2 Remoção dos Efeitos de Tendência e Sazonais para a Componente Norte

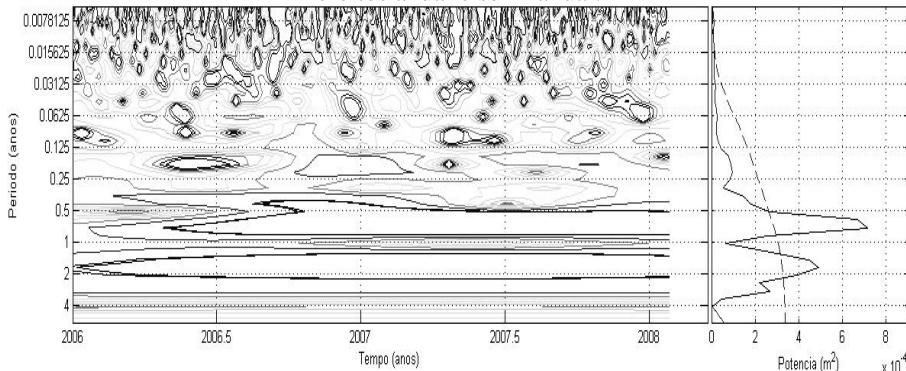
Procedimentos semelhantes aos apresentados na seção 4.1.1 foram utilizados para remover a tendência e sazonalidade presentes na série referente à componente Norte. Na série apresentada na Figura 10 nota-se que a tendência é o efeito dominante sobre o sinal. Essa característica está relacionada ao efeito do movimento da placa litosférica sul-americana que apresenta a maior velocidade no sentido norte-sul.

Figura 10. Componente Norte e curva ajustada.



A Figura 10 também apresenta os resíduos após a remoção do efeito sazonal de período anual e semi-anual como também da tendência. A análise por *wavelets* foi realizada e o espectro relacionado é apresentado na Figura 11.

Figura 11. Espectro de *wavelets* para a série da componente Norte corrigida dos efeitos anual e semi-anual.

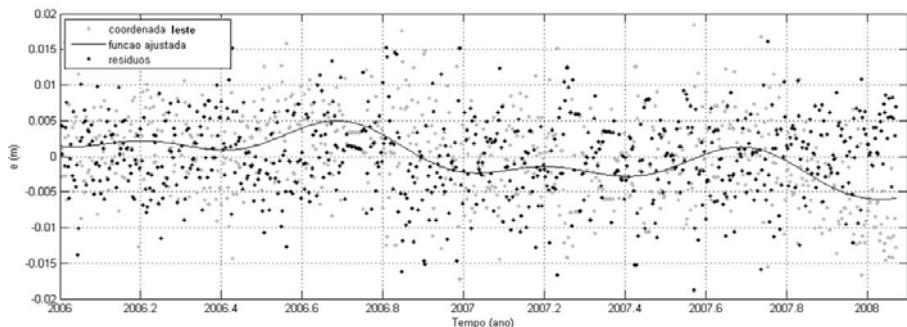


Com a remoção dos efeitos citados, nota-se que surgem dois picos, sendo um deles próximo a 2 anos e outro com período inferior a 1 ano, porém maior que meio ano. Essas freqüências são devido a períodos presentes no sinal com magnitude muito pequena, como pode ser notada pela suas potências, que aparecem assim que os efeitos de grande intensidade são removidos. O mesmo fato também pode ser notado na Figura 8, cuja hipótese está relacionada ao procedimento de remoção dos efeitos anuais e semi-anuais, gerando harmônicos residuais.

4.1.3 Remoção dos Efeitos de Tendência e Sazonais para a Componente Leste

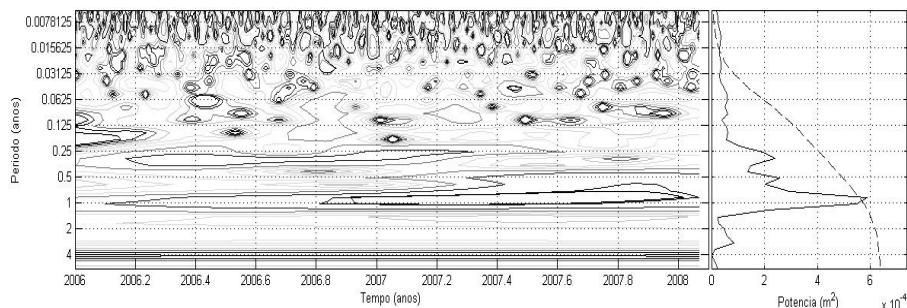
Na série referente à componente Leste, apresentada na Figura 12, os efeitos anual e semi-anual foram removidos, apesar de essa série apresentar um comportamento aparentemente estacionário, como pode ser notado pela série original na mesma figura.

Figura 12. Componente Leste e curva ajustada com efeitos anuais e semi-anuais removidos.



Na figura 13 é apresentado o espectro de *wavelets* da série original, onde a presença de efeitos sazonais, revelada pelos vários picos de freqüências, é evidenciada por uma anual e outra semi-anual, sendo essa última de energia relativamente menor que o efeito anual.

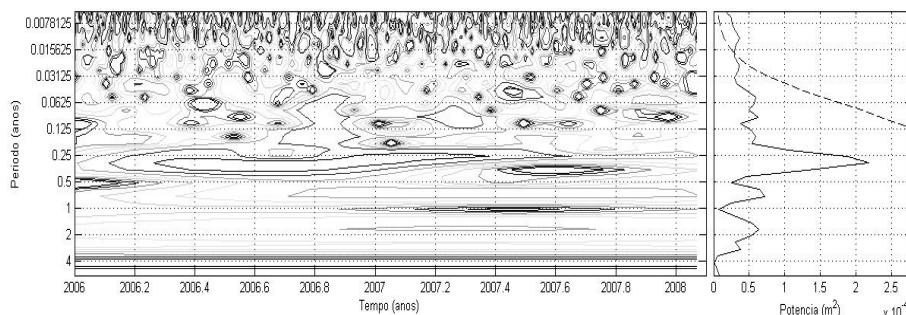
Figura 13. Espectro de *wavelets* para a componente Leste.



Após a remoção dos efeitos, o espectro da Figura 14 revela que a componente Leste também possui efeitos residuais mesmo após os efeitos de maior intensidade terem sido removidos.

Diferentemente das componentes vertical e norte, a componente leste, depois de removidos os efeitos considerados nos experimentos, nota-se ainda a presença de um pico no espectro, porém em uma freqüência diferente das anteriores. Já era de se esperar uma redução acentuada dos períodos anual e semi-anual em todas as três componentes, mostrando que a metodologia empregada apresenta resultados muito bons relacionado à detecção e remoção dos efeitos sazonais.

Figura 14. Espectro de *wavelets* para a componente leste removido os efeitos anual e semi-anual.



4.2. Análise dos Efeitos Sazonais na Estação Fortaleza (BRFT)

O outro experimento realizado utilizou os dados coletados pela estação BRFT. Uma diferença técnica dessa estação para NAUS é que a mesma possui em operação um receptor GPS de fabricante diferente e está localizada próximo ao litoral.

Outra particularidade dessa estação é que a mesma é provida de padrão de tempo atômico externo para o receptor. Espera-se que resultados pouco ruidosos sejam obtidos no que se refere ao erro do relógio do receptor, sendo possível detectar com mais clareza outros efeitos na série temporal dessa estação.

Nas Figuras 15, 16 e 17 são apresentadas as séries temporais referentes às coordenadas locais Vertical, Norte e Leste, obtidas para a estação BRFT. Elas apresentam algumas características diferentes daquelas da estação NAUS.

Figura 15. Série temporal da componente Leste.

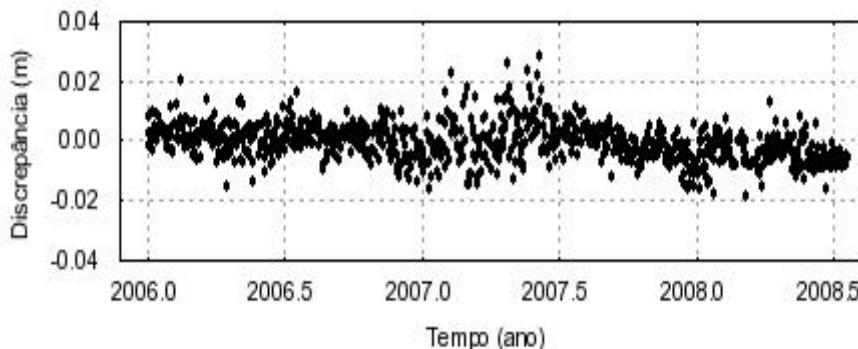


Figura 16. Série temporal da componente Norte.

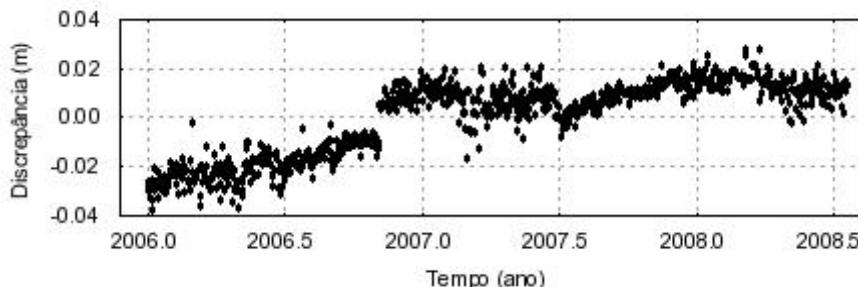
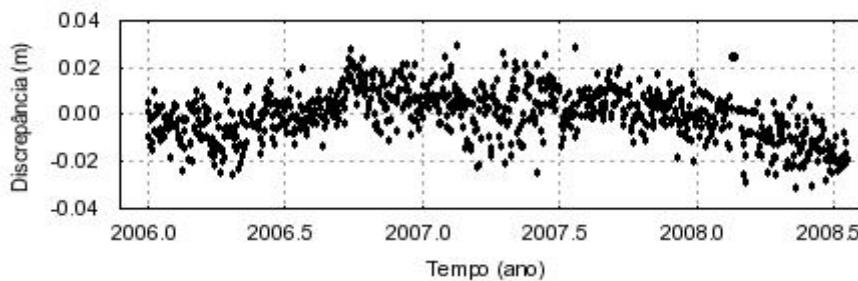
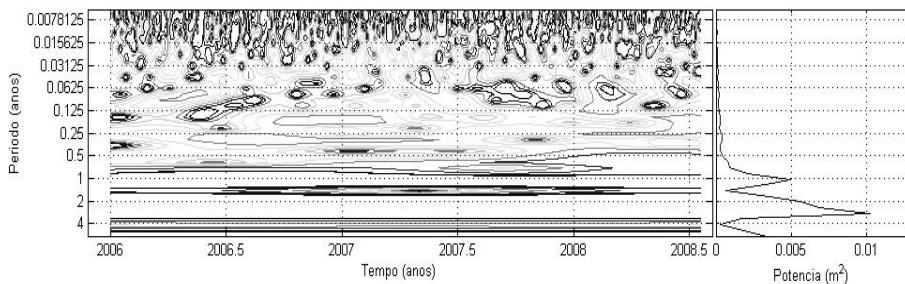


Figura 17. Série temporal da componente Vertical.



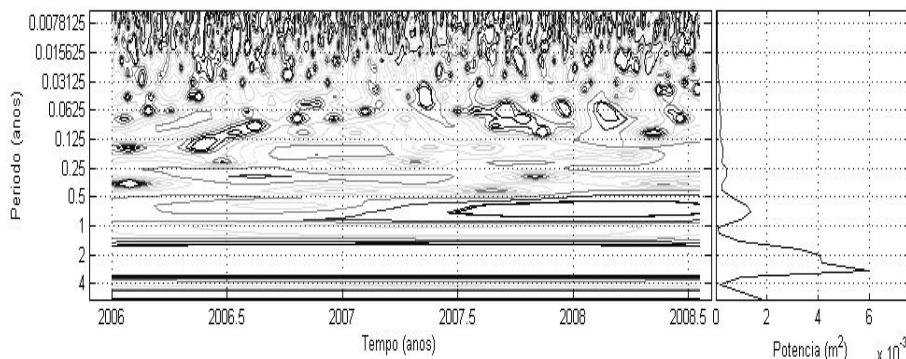
4.2.1 Remoção dos Efeitos de Tendência e Sazonais para a Componente Vertical

Assim como nos experimentos anteriores, o espectro de *wavelets* para cada etapa de remoção foi gerado, revelando algumas características bem particulares para essa estação. Na Figura 18 é apresentado o espectro de *wavelets* para a componente Vertical. Procedimento similar foi aplicado para as duas outras componentes e não será apresentado.

Figura 18. Espectro de *wavelets* para a componente vertical da estação BRFT.

Na Figura 18, os picos apresentados no espectro de potências são semelhantes aos apresentados no experimento anterior. Contudo, nota-se a presença de um pico mais acentuado, comparado ao do efeito anual. A presença do efeito semi-anual não pode ser detectada, mesmo com a remoção do efeito anual, resultado esse apresentado na Figura 19. Mesmo com a remoção do efeito anual, a presença de um pico, com energia relativamente alta, faz com que outros efeitos não sejam realçados no espectro de potências.

Figura 19. Espectro de *wavelets* e potência para a componente Vertical com o efeito anual removido.

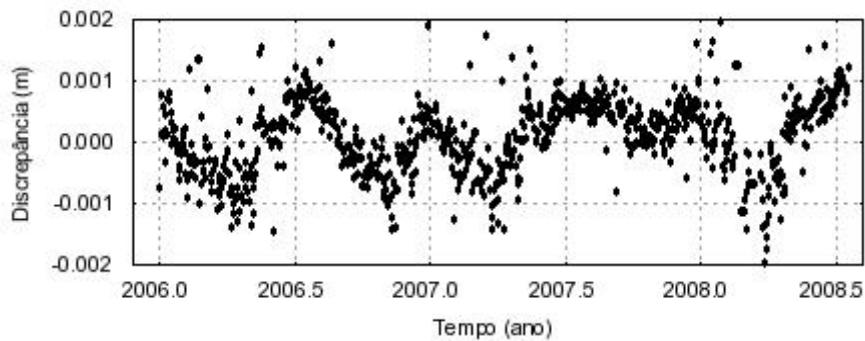


Uma análise adicional realizada para os dados dessa estação foi a análise dos efeitos de segunda ordem da ionosfera.

4.2.2 Remoção dos Efeitos de Segunda Ordem Relacionados à Ionosfera da Componente Vertical

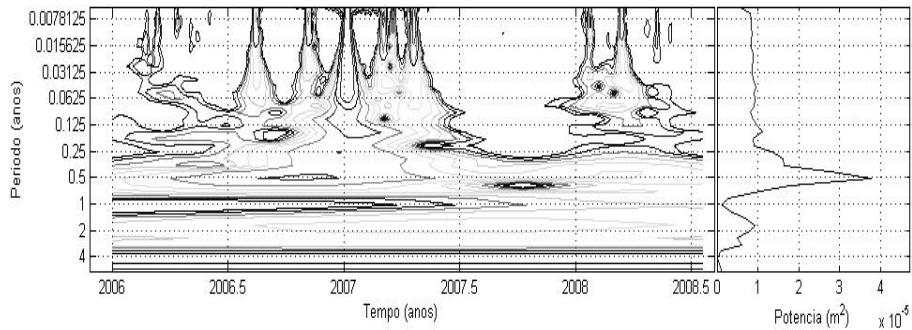
A fim de investigar a influência dos efeitos de segunda ordem relacionados à ionosfera foi realizada a correção dos dados da estação BRFT, utilizando o *software* RINEX_HO (MARQUES, MONICO E AQUINO, 2009) que corrige tal efeito diretamente nos arquivos de observação, reescrevendo-os. Os dados corrigidos foram processados, obtendo-se novos resultados que foram transformados para componentes no sistema local (E, N e U). A partir da diferença entre as séries temporais para a componente Vertical corrigida e não corrigida do dito efeito foi realizada a análise por *wavelets*. Optou-se por realizar essa análise sobre as diferenças calculadas, pois visualmente o efeito da correção é praticamente imperceptível. A Figura 20 apresenta as diferenças calculadas entre a série Vertical não corrigida e a corrigida dos efeitos de segunda ordem da ionosfera.

Figura 20. Série temporal resultante das diferenças entre as séries temporais da componente Vertical obtida de dados não corrigidos e corrigidos dos efeitos de 2ª ordem da ionosfera.



Na Figura 201 é apresentado o espectro de *wavelets* para a série temporal de diferenças na componente vertical. O efeito residual apresentado no espectro, além do pico mais relevante, indica um efeito com período semi-anual. Nota-se que um segundo efeito periódico de aproximadamente 2 anos, de menor potência é realçado no espectro.

Figura 21. Espectro de *wavelets* para a diferença entre as séries temporais da componente Vertical corrigida e não corrigida dos efeitos de segunda ordem da ionosfera.



Da Figura 21 pode-se notar que os efeitos de ordem superior à primeira, relacionados à ionosfera, manifestam um período semi-anual relativamente acentuado. Pode-se afirmar, dessa forma, que os efeitos semi-anuais presentes nas

séries temporais que não são corrigidas dos efeitos de segunda e terceira ordem da ionosfera, venha apresentar influências de até 2 mm, o que mostra que a correção desse efeito é necessária quando se deseja alta precisão.

5. CONSIDERAÇÕES E CONCLUSÕES

Nessa pesquisa foi apresentada uma proposta metodológica para modelagem das séries temporais de coordenadas estimadas com GNSS, em especial GPS. A série temporal foi gerada a partir dos resultados obtidos pelo método de posicionamento PPP. Foram utilizadas duas técnicas integradas: *wavelets* e estimativa pelo MMQ. Enquanto a primeira proporciona a freqüência ou período com que determinado fenômeno ocorre, bem como sua localização no tempo, a segunda permite estimar os parâmetros que descrevem a série temporal no que diz respeito à amplitude dos efeitos sazonais, possibilitando sua remoção com base nas freqüências injuncionadas, obtida pela análise de *wavelets*. A integração dessas duas ferramentas matemáticas parece ser uma ótima solução para investigações dessa natureza.

Nesta pesquisa foram realizados experimentos com dados reais, obtidos de duas estações GPS de monitoramento contínuo instaladas no território brasileiro. A amostra envolvendo apenas duas estações não pode ser considerada representativa do território nacional, devido à heterogeneidade de clima, condições geográfica etc. de um país continental como o Brasil. Mas mesmo assim os resultados obtidos dos experimentos auxiliam a identificar efeitos similares podem ser encontrados nas estações da RBMC instaladas pelo país.

Com os resultados obtidos a partir da integração das técnicas de *wavelets* e MMQ foi possível verificar a presença de efeitos sazonais de período anual e semi-anual nas séries temporais de coordenadas das duas estações da RBMC analisadas. Além disso, constatou-se que o maior efeito sazonal está praticamente concentrado na componente Vertical. Tal efeito deteriora as coordenadas das estações de referência (base) a ser utilizada num posicionamento relativo, e consequentemente, as coordenadas determinadas a partir dessa estação. Nesse método considera-se que os erros comuns são praticamente eliminados quando efetuadas as duplas diferenças entre as observações e estações envolvidas no processamento, desde que as linhas de base sejam relativamente curtas. Mas efeito de natureza sazonal em sua maioria não é cancelado.

As situações que envolvam o posicionamento de alta precisão por GPS, querem seja PPP ou relativo apresentam resultados totalmente eivados dos efeitos sazonais. O não tratamento adequado de sua sazonalidade pode-se levar a conclusões incongruentes.

Cabe acrescentar ainda mais algumas recomendações para trabalhos futuros. Investigar mais profundamente as prováveis causas dos efeitos periódicos anual e semi-anual, bastante evidentes nas séries de coordenadas, principalmente na componente vertical; melhorar o processo de integração de *wavelets* e MMQ, de

forma a se tornar mais eficiente em termos operacionais; aplicar a metodologia nas demais estações da RBMC para esse efeitos sejam melhores descritos no interior do território brasileiro.

AGRADECIMENTOS

Os autores deste trabalho agradecem à CAPES pelo apoio em forma de bolsa de mestrado junto ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas da UNESP/FCT e a FAPESP pelo suporte via projeto Temático (Processo 2006/04008-2).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMIRI-SIMKOOEI, A.R. Noise in multivariate GPS position time-series. In: *Journal of Geodesy*, v. 112. 2008. 13p.
- AMIRI-SIMKOOEI, A.R., TIBERIUS, C.C.J.M, TEUNISSEN, P.J.G. Assessment of noise in GPS coordinate time series: Methodology and results. In: *Journal of Geophysical Research*, v.112. 2007. 19p.
- BEVIS, M.;ALSDORF, D.;KENDRICK, E.;FORTES, L. P.; FORSBERG, B.;SMALLEY Jr., R.; BECKER, J. Seasonal fluctuations in the mass of the Amazon River system and Earth's elastic response. *Journal of Geophysical Research*, v.32, L16308,doi:10.1029/2005GL023491, 2005.
- BRACEWELL, R. *Heaviside's Unit Step Function. In The Fourier Transform and Its Applications*, 3rd ed. New York: McGraw-Hill, pp. 61-65, 2000.
- CHATFIELD, C. *The analysis of time series: an introduction*. 3.ed. New York: Chapman and Hall, 1984. 286p.
- HOFMANN-WELLENHOF, B., LICHTENEGGER, H., COLINS, J. *GPS: Theory and practice*. 5.ed. Wien: Springer, 2001. 382 p.
- IGS. International GNSS Service: IGS Products. 2008. Disponível em: <<http://igscb.jpl.nasa.gov/components/prods.html>>. Acesso em 12 mai. 2008.
- INGLE, V. K. *Digital Signal Processing using MATLAB*. Pacific Grove: Brooks/Cole, 2000. 418 p.
- LEICK, A. *GPS satellite surveying*. 3.ed. United States: John Wiley, 2004. 435p.
- McCARTHY, D.D.; PETIT, G. *IERS Conventions (2003)*. IERS Technical Note 32, IERS Convention Center, Frankfurt. 127p. 2004.
- MARQUES, H.A.; MONICO, J. F. G.; AQUINO, M. Efeitos de segunda e terceira ordem da ionosfera no posicionamento GNSS no Brasil. *Revista Brasileira de Geofísica*. No prelo. 2009.
- MONICO, J.F.G. *Posicionamento pelo GNSS: Descrição, fundamentos e aplicações*. 2.ed. São Paulo: Unesp, 2008. 471p.
- PEREZ, J. A. S.; MONICO, J. F. G.; CHAVES, J. C. Velocity Field Estimation Using GPS Precise Point Positioning: The South American Plate Case. *Journal of Global Positioning Systems*. Vol. 2, No. 2, p. 90-99. 2003

- MONICO, J. F. G.. Posicionamento por ponto de alta precisão utilizando o GPS: uma solução para a geodinâmica. *Rev. Bras. Geof. [online]*. 2000, vol.18, n.1, pp. 39-48. ISSN 0102-261X. doi: 10.1590/S0102-261X2000000100004.
- NIKOLAIDIS, R. *Observation of geodetic an seismic deformation with the GlobalPositioning System*. Tese de doutorado. University of California, 2002. 249p.
- TORRENCE, C., COMPO, G.P., *A Practical Guide to Wavelet Analysis*. Program in Atmospheric and Oceanic Sciences, University of Colorado, Boulder, Colorado, 1998. 18 p. Disponível em <<http://atoc.colorado.edu/research/wavelets>>. Acesso em: 12 de maio 2008.
- WEISSTEIN, E.W. Heaviside Step Function. In: *MathWorld - A Wolfram Web Resource*. Disponível em <<http://mathworld.wolfram.com/HeavisideStepFunction.html>> . Acesso em 28/09/2008.

(Recebido em fevereiro de 2009. Aceito em junho de 2009).