

ANÁLISE DE SÉRIES TEMPORAIS DE COORDENADAS GNSS SOB EFEITOS DE CINTILAÇÃO IONOSFÉRICA

HELOÍSA ALVES DA SILVA²
JOÃO FRANCISCO GALERA MONICO^{1,2}
HAROLDO ANTONIO MARQUES³

Universidade Estadual Paulista - Unesp
Faculdade de Ciências e Tecnologia - FCT

¹Departamento de Cartografia, Presidente Prudente - SP

²Programa de Pós Graduação em Ciências Cartográficas - PPGCC
heloh2o@gmail.com; galera@fct.unesp.br

Universidade Federal de Pernambuco - UFPE
Centro de Tecnologia e Geociências - CTG

³Departamento de Engenharia Cartográfica, Recife, PE
haroldoh2o@gmail.com

RESUMO - O GNSS, em especial o GPS, é uma das tecnologias mais utilizadas para realizar posicionamento geodésico. As observáveis GNSS estão sujeitas a diversos erros e a ionosfera é a maior fonte desses erros que afetam os sinais GNSS. A camada ionosférica é composta por elétrons e íons e a variação na densidade de elétrons pode causar a cintilação ionosférica, a qual provoca variações na amplitude, fase, e do ângulo de polarização do sinal de GNSS. Estes efeitos podem ser mitigados por meio de modelagem estocástica no processamento GNSS. No entanto, alguns efeitos não-modelados (ruídos) permanecem na série temporal das coordenadas GNSS. Estes ruídos podem ser caracterizados a partir da série temporal e pode apresentar componentes, tais como ruído branco, *flicker noise* e/ou *random walk*. Neste trabalho, serão apresentadas algumas metodologias para a caracterização do ruído da série temporal das coordenadas GNSS considerando os efeitos de cintilação da ionosfera no GNSS.

Palavras chave: Stochastic modelling, GNSS time series, GNSS positioning.

ABSTRACT - The GNSS, in special the GPS, is one of the most used technology to accomplish geodetic positioning. The GNSS observables are subject to several errors and the ionosphere is the largest source of these errors affecting the GNSS signals. The ionospheric layers are composed by electrons and ions and the variation in the electron density may cause the so called ionospheric scintillation, which provoke the variations in the amplitude, phase, polarization and the angle of the GNSS signal. These effects may be mitigated by stochastic modelling in the GNSS processing. However, some non-modeled effects (noises) remain in the GNSS coordinates time series. These noises can be characterized from the time series and can present components such as white noise, flicker noise and/or random walk. In this paper, it will be presented some methodologies for the noise characterization in the GNSS coordinates time series taking account ionospheric scintillation effects on the GNSS.

Key words: Stochastic modelling, GNSS time series, GNSS positioning.

1 INTRODUÇÃO

O GNSS (*Global Navigation Satellite System*) é uma das tecnologias mais utilizadas no posicionamento geodésico. Para que o posicionamento tenha uma alta acurácia (ordem milimétrica), com resultados confiáveis e realísticos, tanto o modelo funcional quanto o estocástico devem ser bem estabelecidos no ajustamento dos dados GNSS. No caso da modelagem funcional, esta já está bem

estabelecida por diversos autores (TEUNISSEN; KLEUSBERGER, 1998; LEICK, 2004; MONICO, 2008, entre outros). Já com relação à modelagem estocástica no posicionamento GNSS, esta vem sendo tema de diversas pesquisas (CONKER et al., 2002; AQUINO et al., 2009; SILVA, 2009; SILVA et al., 2010; AMIRI-SIMKOOEI; TIBERIUS; TEUNISSEN, 2008).

Mesmo que a modelagem estocástica das observações seja a mais adequada possível, ainda podem

restar alguns efeitos, os quais não foram modelados adequadamente e ficarão inclusos nas séries temporais das coordenadas GNSS. A caracterização desses ruídos pode ser baseada nas componentes das séries temporais, podendo estar presente componentes como *white noise*, *flicker noise* e/ou *random walk* (ZHANG et al., 1997). Para a determinação dessas componentes pode-se utilizar diversos métodos, dentre eles a análise de potência espectral, método de Allan *variance* (variância de Allan) (GAMBIS, 2002) e o MMQ (Método dos Mínimos Quadrados) (AMIRI-SIMKOOEI; TIBERIUS; TEUNISSEN, 2008).

Na FCT/UNESP está sendo desenvolvida uma tese na qual aborda investigações relacionadas à modelagem estocástica das observações GNSS e também investigações relacionadas às séries temporais de coordenadas GNSS. Nesse artigo serão apresentados conceitos relacionados às séries temporais com aplicação nas séries de coordenadas GNSS. Serão apresentadas também algumas metodologias envolvidas na caracterização dos ruídos nas séries temporais de coordenadas GNSS, bem como algumas análises considerando os efeitos de cintilação ionosférica.

2 CINTILAÇÃO IONOSFÉRICA

As cintilações ionosféricas ocorrem devido a pequenas irregularidades na camada da ionosfera provocando variações de amplitude, de fase, de polarização e no ângulo do sinal GNSS (DAVIES, 1990; CONKER et al., 2002).

Os efeitos de cintilação ionosférica são mais fortes nas regiões equatoriais e altas latitudes.

Nas regiões equatoriais estes efeitos são relacionados à anomalia equatorial com intensidade maior no pico local da anomalia. Em períodos de alta atividade solar, entretanto a anomalia pode apresentar um pico próximo às 21 horas local. Além disso, bolhas ionosféricas são formadas nesta região logo após o pôr-do-sol. Pequenas irregularidades nessas bolhas são formadas, tornando-se uma fonte de intensa cintilação. A magnitude e a frequência dessas cintilações são correlacionadas com o ciclo solar.

Em regiões de altas latitudes, a ocorrência de cintilações ionosféricas está, normalmente, relacionada com as tempestades geomagnéticas.

No Brasil foram instalados receptores GNSS a partir do projeto CIGALA (*Concept for Ionospheric Scintillation Mitigation for Professional GNSS in Latin America* - <http://www.galileoic.org/la/?q=node/322>) que são capazes de coletar dados com informações de cintilação ionosférica.

Um dos indicadores de cintilação ionosférica é o índice de amplitude S4. Os níveis de cintilação são classificados em três categorias (TIWARI et al., 2011):

- 1) Forte cintilação: quando $S4 \geq 1,0$;
- 2) Moderada cintilação: quando $0,5 \leq S4 \leq 1,0$;
- 3) Fraca cintilação: quando $S4 \leq 0,5$.

A mitigação da cintilação ionosférica pode ser realizada através de uma modelagem estocástica adequada (SILVA, 2009). Uma das formas investigadas é baseada em Conker et al. (2002).

3 SÉRIES TEMPORAIS

Uma série temporal é uma sequência ordenada de observações, embora a ordenação seja normalmente através do tempo, ela também pode ser realizada através de outras dimensões, tais como o espaço (WEI, 2006). Nesse caso, as séries temporais podem ser descritas por leis probabilísticas, sendo assim objeto de estudo da teoria dos processos estocásticos (PEREIRA; PAIS; SALES, 1986).

Uma série temporal, com observações $\{Z_t, t=1, \dots, N\}$, pode ser decomposta como a soma de três componentes não-observáveis (MORETTIN; TOLOI, 2004):

$$Z_t = T_t + S_t + a_t \quad (4)$$

sendo, T_t é a tendência, S_t é a sazonalidade e a_t é a componente aleatória com média zero e variância constante (σ_a^2).

As tendências e as sazonalidades de uma série temporal podem ser obtidas, a partir do ajuste de funções lineares, quadráticas, exponenciais ou trigonométricas, podendo tal estimativa ser realizada a partir do MMQ (ROSA, 2008).

Uma forma de analisar uma série temporal (Z_t) é escrevê-la na forma de um sinal ($f(t)$) e um ruído (a_t), como a seguir (MORETTIN; TOLOI, 2004):

$$Z_t = F(t) + a_t, \quad t=1, \dots, N \quad (5)$$

Existem diversas formas de identificar o tipo de ruído de uma determinada série temporal. Dentre elas pode-se citar a análise a partir do método de variância de Allan (ALLAN; BARNES, 1981; EL-SHEIMY; HOU; NIU, 2008), ou a partir da estimação das variâncias desses ruídos, através, por exemplo, do MMQ (AMIRI-SIMKOOEI, 2007).

4 VARIÂNCIA DE ALLAN

Cada tipo de ruído tem uma característica única e pode ser identificado através de diferentes técnicas. Uma dessas técnicas é a denominada variância de Allan (AVAR), cuja análise é realizada no domínio do tempo e foi proposta por David Allan na década de 1960, a qual consiste numa alteração na fórmula clássica de desvio-padrão, atuando como um filtro para muitos componentes de ruídos (GAMBIS, 2002).

A expressão exata para AVAR é rigorosamente dada para um conjunto de dados infinito. Entretanto, o

conjunto de dados é praticamente finito e a AVAR pode ser expressa por (GAMBIS, 2002):

$$\sigma_y^2(\tau) = \left\langle \sigma_y^2(N, T, \tau) \right\rangle = \frac{1}{N} \frac{\sum_{t=1}^N (y_{t+1} - y_t)^2}{2} \quad (6)$$

onde, y_i é o valor médio, N é o número de dados, T é o intervalo amostral, τ é o intervalo da média e $\langle \rangle$ representam o valor esperado.

O gráfico da AVAR é normalmente construído numa escala log-log. Um modelo comum no domínio da frequência para o espectro $S_x(\omega)$ de uma série temporal de baixa frequência é a lei de potência (HECKERT; FILLIBEN, 2003):

$$S_x(\omega) = \omega^\alpha \quad (7)$$

onde α é o índice espectral.

Há uma relação (*one-to-one*) entre o ângulo do gráfico de log-log da potência espectral (α) e o ângulo de inclinação do gráfico log-log da AVAR (Tabela 3).

Tabela 1 - Relação entre o gráfico de potência espectral e o gráfico de Allan variance.

Tipo de ruído	Ângulo de inclinação do gráfico de log-log da potência espectral (α)	Ângulo de inclinação do gráfico de log-log da variância de Allan ($(-\alpha - 1)/2$)
Random Walk	-2	0,5
Flicker	-1	0
White Noise	0	-0,5
Super Flicker	1	-1
Super White	2	-1,5

A Figura 1 mostra a caracterização de ruídos a partir da representação log-log do desvio-padrão de Allan (\sqrt{AVAR}):

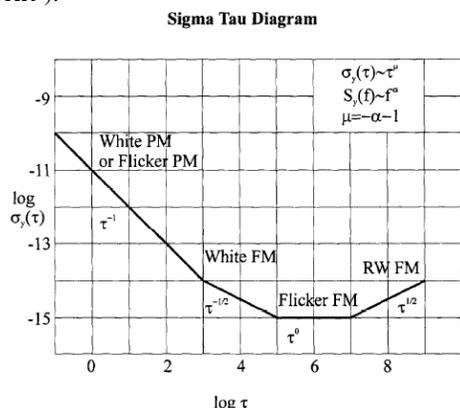


Figura 1- Representação log-log do desvio-padrão de Allan.

Fonte: Gambis (2002).

5 RESULTADOS E ANÁLISES

Nesse artigo foram processados os dados GPS da estação PRU2, pertencente à rede CIGALA (Figura 2).

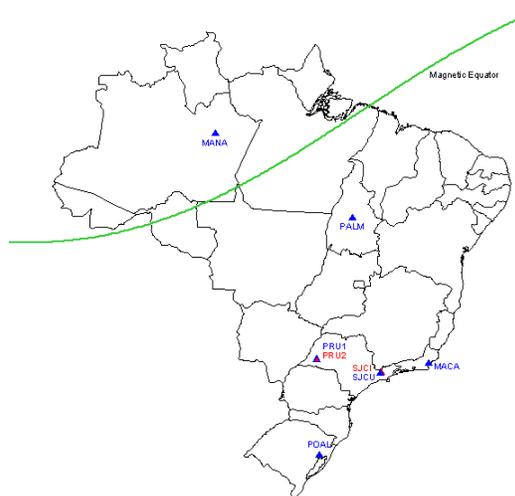


Figura 2 - Localização das estações da rede CIGALA.

Foram processados dados correspondendo ao período de 21 a 22 de agosto de 2011 e ao período de 20 a 21 de novembro de 2011. Os dados foram processados no software RT_PPP, desenvolvido na FCT/UNESP (MARQUES, 2012). Ambos os processamentos foram realizados utilizando o código e a fase nas portadoras L1 e L2 no modo cinemático. Além disso, foi utilizada uma máscara de elevação de 10°, aplicada a estimativa da troposfera e realizada a combinação linear *ion-free*.

Os dados referentes ao primeiro período (21 a 22 de agosto de 2011) estavam sob moderada cintilação ionosférica, conforme pode ser visto na Figura 3:

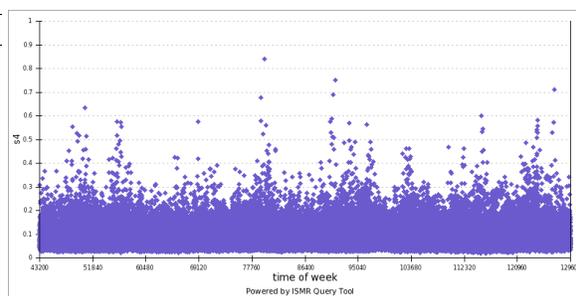


Figura 3 - Índices S4 (L1) para satélites com ângulo de elevação > 10°- 21 a 27 de agosto de 2011.

A Figura 4 mostra a série temporal dos erros no SGL (Sistema Geodésico Local):

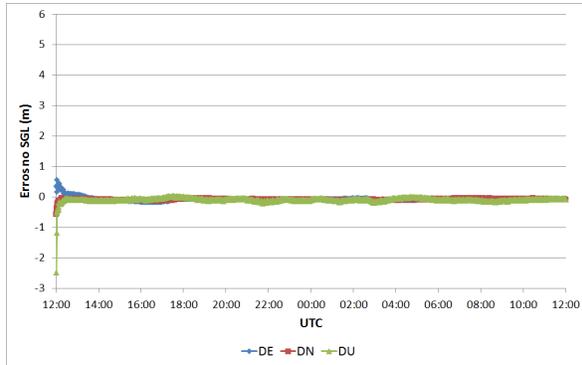


Figura 4 - Erros no SGL (21 a 22 de agosto de 2011).

Ao analisar as Figuras 3 e 4 verifica-se que o resultado do processamento de dados sob moderada cintilação não foram influenciados por esse efeito, sendo os erros no SGL da ordem centimétrica.

Os dados referentes ao período de 20 a 21 de novembro de 2011 estavam sob forte efeito de cintilação ionosférica, como pode ser visualizado na Figura 5:

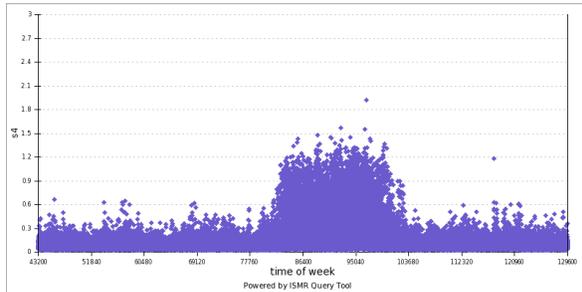


Figura 5 - Índices S4 (L1) para satélites com ângulo de elevação > 10° - 20 a 26 de novembro de 2011.

A série temporal dos erros no SGL é apresentada na Figura 6:

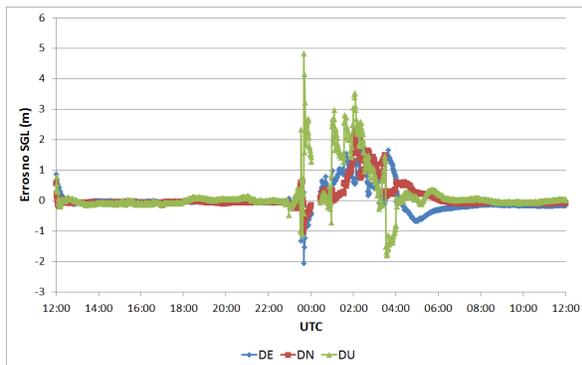


Figura 6 - Erros no SGL (21 a 22 de novembro de 2011).

A partir das Figuras 5 e 6 verifica-se que os efeitos de cintilação ionosférica influenciaram nos resultados do processamento. Nas épocas em que há os efeitos de cintilação há uma degradação nos erros em DE, DN e DU, atingindo valores de até 5 metros.

As séries temporais de cada uma das componentes do SGL (DE, DN e DU) foram analisadas através da construção dos gráficos do desvio-padrão de Allan (ADEV) e do desvio-padrão modificado de Allan (MDEV) (GAMBIS, 2002; ALLAN; BARNES, 1981), a partir dos quais se podem caracterizar os ruídos contidos nas séries.

Os gráficos de desvio-padrão de Allan para o primeiro período são apresentados nas Figuras 7 a 9:

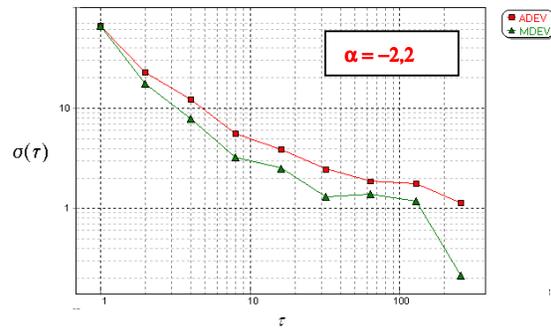


Figura 7 - Desvio-padrão de Allan para a componente DE (21 a 22 de agosto de 2011).

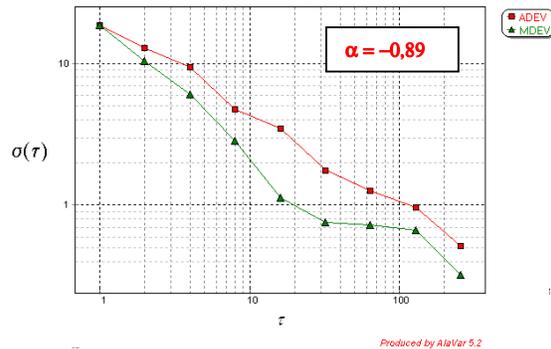


Figura 8 - Desvio-padrão de Allan para a componente DN (21 a 22 de agosto de 2011).

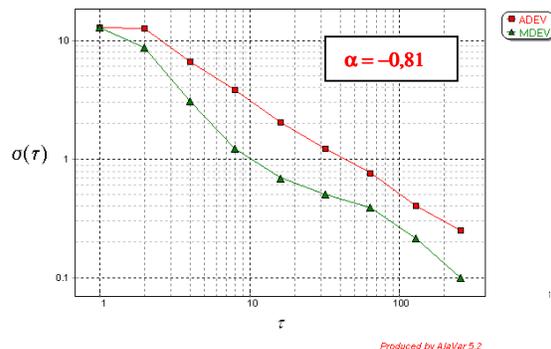


Figura 9 - Desvio-padrão de Allan para a componente DU (21 a 22 de agosto de 2011).

No período de 21 a 22 de agosto de 2011, a partir das Figuras 7 a 9 e da Tabela 1 pode-se caracterizar os ruídos, conforme mostra a Tabela 2:

Tabela 2 - Caracterização dos ruídos (21 a 22 de agosto de 2011).

Componentes	α	Tipo de ruído
DE	-2,2	Random walk
DN	-0,89	Flicker
DU	-0,81	Flicker

Os gráficos de desvio-padrão de Allan para o período de 20 a 21 de novembro de 2011 são apresentados nas Figuras 7 a 9:

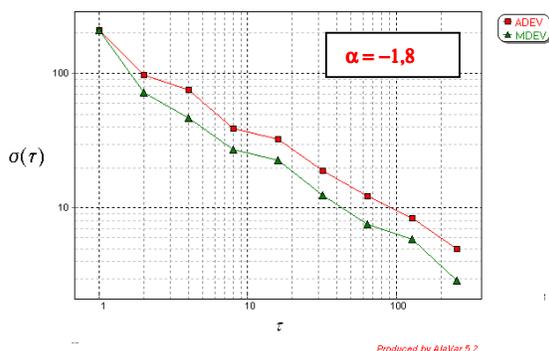


Figura 10 - Desvio-padrão de Allan para a componente DE (20 a 21 de novembro de 2011).

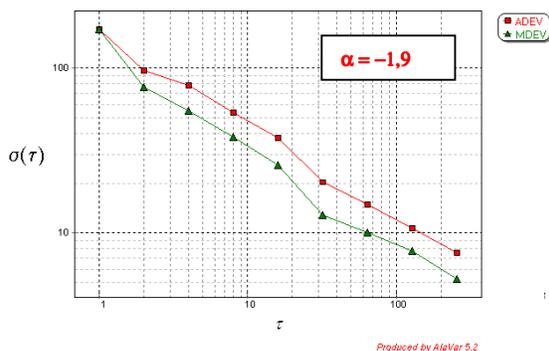


Figura 11 - Desvio-padrão de Allan para a componente DN (20 a 21 de novembro de 2011).

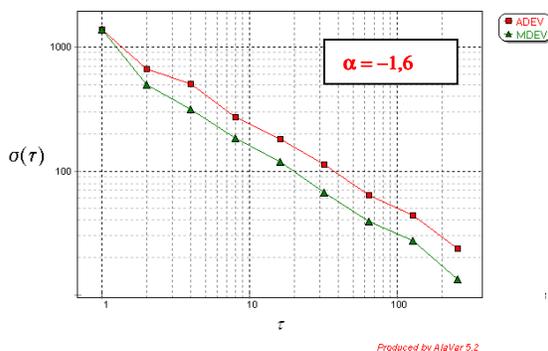


Figura 12 - Desvio-padrão de Allan para a componente DU (20 a 21 de novembro de 2011).

A caracterização dos ruídos para o segundo período é mostrada na Tabela 3:

Tabela 3 - Caracterização dos ruídos (21 a 22 de agosto de 2011).

Componentes	α	Tipo de ruído
DE	-1,8	Random walk
DN	-1,9	Random walk
DU	-1,6	Random walk

Ao analisar as Figuras 7 a 9 e a Tabela 2, verifica-se que a série temporal das coordenadas GNSS sob moderada cintilação ionosférica pode conter diferentes tipos de ruídos. Já em dados sob forte de cintilação, verifica-se que prevaleceu o ruído *random walk* (Figuras 10 a 12 e Tabela 3).

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesse artigo são apresentadas algumas análises das séries temporais de coordenadas GNSS sob efeitos de cintilação ionosférica. É realizada, além de uma análise entre os índices de cintilação e os resultados do processamento GNSS, a caracterização dos ruídos dessas séries.

No caso, foram processados dados de uma estação da rede CIGALA (PRU2) sob moderada cintilação (21 a 22 de agosto de 2011) e forte cintilação (20 a 21 de novembro de 2011). Verificou-se que os resultados dos processamentos são muito influenciados pelos efeitos de cintilação ionosférica quando os dados sob forte influência destes, sendo os erros no SGL atingindo a ordem métrica.

Pode-se verificar também que na caracterização dos ruídos de uma série temporal, esta pode conter diferentes tipos ruídos. Com relação a essa etapa na análise de séries temporais mais investigações devem ser realizadas.

AGRADECIMENTOS

Os autores deste artigo agradecem à FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) pelo auxílio financeiro para o desenvolvimento do projeto (Processo: 2011/01196-0).

REFERÊNCIAS

ALLAN, D. W.; BARNES, J. A modified “Allan variance” with increased oscillator characterization ability. **Proceedings**. 35th Ann. Freq. Control Symposium, Ft. Monmouth, 1981.

AMIRI-SIMKOOEI, A. R. **Least-squares variance component estimation theory and GPS applications**. Ph.D. Thesis. Delft: Netherlands Geodetic Commission, 2007. 208p.

CONKER, R. S.; EL-ARINI, B.; HEGARTY, C. J.; HSIAO, T. Modeling the effects of ionospheric scintillation on GPS/Satellite-Based augmentation system availability. **Radio Science**. vol. 37, n. 0, 2002.

DAVIES, K. Ionospheric radio. England: Short Run Press LTd., 1990, 580p.

EL-SHEIMY, N.; HOU, H.; NIU, X. Analysis and modeling of inertial sensors using Allan variance. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**. v. 57, n. 1, 2008.

GAMBIS, D. Allan variance in Earth rotation time series analysis. **Advances in Space Research**, 2002, v.30, n.2, p. 207-212.

HECKERT, N. A.; FILLIBEN, JAMES J. NIST Handbook 148: **DATAPLOT Reference Manual**, Volume I: Commands. National Institute of Standards and Technology Handbook Series, June 2003.

MORETIN, P. A.; TOLOI, C. M. C. **Análise de séries temporais**. São Paulo: Edgard Blücher, 2004. 535p.

PEREIRA, B. B.; PAIS, M. B. Z.; SALES, P. R. H. **Análise espectral de séries temporais**: uma introdução para Engenharia, Economia e Estatística. Rio de Janeiro: Arte Final Leasing Editorial; Eletrobrás S.A., 1986. 108p.

ROSA, G. P. S. **Análise de séries temporais de coordenadas estimadas com GPS**: uma proposta metodológica para eliminação dos efeitos sazonais. 2008. 106f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente. 2008.

SILVA, H. A. **Avaliação de modelos estocásticos no posicionamento gnss**. 2009. 108f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) - Faculdade de Ciências e

Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente. 2009.

TIWARI, R.; SKONE, S.; TIWARI, S.; STRANGWAYS, H. J. 3WBMod Assisted PLL GPS Software Receiver for Mitigating Scintillation Affect in High Latitude Region. **IEEE**, 2011. Disponível em: <<http://www.ursi.org/proceedings/procGA11/ursi/FG-4.pdf>>. Acesso em: mai. 2012.

WEI, W. W. S. **Time series analysis**: univariate and multivariate methods. Boston: Pearson Education: Addison-Wesley, 2006. 614p.