
ANÁLISE DE SÉRIES TEMPORAIS DE COORDENADAS GNSS

HELOÍSA ALVES DA SILVA²

JOÃO FRANCISCO GALERA MONICO¹

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

¹ Departamento de Engenharia Cartográfica, P. Prudente, SP

² Programa de Pós Graduação em Ciências Cartográficas - PPGCC

heloh2o@gmail.com

galera@fct.unesp.br

RESUMO - O GNSS, em especial o GPS, é uma das tecnologias mais utilizadas na realização de posicionamento geodésico. No processamento de dados GNSS, tanto o modelo funcional quanto o estocástico são de fundamental importância e atualmente diversas pesquisas são realizadas para melhorar esses modelos objetivando a obtenção de coordenadas mais acuradas. No entanto, ainda ficam remanescentes diversos efeitos não-modelados (ruídos) nas séries de coordenadas GNSS. Tais ruídos podem ser caracterizados a partir das componentes das séries temporais, podendo estar presente componentes como *white noise*, *flicker noise* e/ou *random walk*. Nesse artigo serão apresentadas algumas metodologias para a caracterização de ruídos contidos nas séries temporais de coordenadas GNSS.

ABSTRACT – The GNSS, in special the GPS, is one of the most used technology to accomplish geodetic positioning. In the GNSS processing both functional and stochastic model are fundamental and currently there are several researches to improve these models aiming to obtain more accurate coordinates. However, some non-modeled effects (noises) remain in the time series of the GNSS coordinates. These noises can be characterized from the time series and can be 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.

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 realizadas.

2 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). Do ponto de vista da Estatística, o mecanismo gerador da série temporal é considerado como um processo estocástico e a série temporal observada uma de suas realizações possíveis. Assim, os conceitos de processos estocásticos e séries temporais (não determinísticas) são análogos, respectivamente, aos conceitos de população e de amostra na Estatística Elementar (PEREIRA; PAIS; SALES, 1986).

Uma das suposições com relação à série temporal é que essa seja estacionária (se desenvolve aleatoriamente no tempo em torno de uma média constante). Porém, a maioria das séries temporais apresenta alguma forma de não-estacionariedade, por exemplo, tendência. Como a maioria dos procedimentos de análise de séries temporais supõe que estas sejam estacionárias, é necessário transformar os dados originais caso estes se comportem de uma forma não-estacionária (MORETTIN; TOLOI, 2004). 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):

$$Z_t = T_t + S_t + a_t \quad (1)$$

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):

$$Z_t = F(t) + a_t, \quad t = 1, \dots, N \quad (2)$$

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). Atualmente, há diversas ferramentas disponíveis que possibilitam a análise de séries temporais, podendo-se citar os softwares AlavVar (<http://www.alamath.com>), MiniTab (MINITAB, 2005), TSOFT (<http://seismologie.oma.be/TSOFT/tsoft.html>) e Wavelets (<http://atoc.colorado.edu/research/wavelets/>). Esses softwares permitem a aplicação da análise das séries a partir de diferentes modelos, tanto no domínio temporal (ex. função de autocorrelação, Allan variance) quanto no domínio de frequências (ex. análise de Fourier, análise espectral) ou em ambos os domínios (ex. análise de *wavelets*).

2.1 Séries temporais de coordenadas GNSS

As séries temporais de coordenadas GNSS são compostas de ruídos, tais como: *white-noise*, *flicker noise* e *random walk*. A caracterização desses ruídos pode ser obtida, por exemplo, através do método de Allan variance ou do método de estimação de máxima verossimilhança (MLE) (ZHANG et al., 1997; WILLIAMS, 2004) ou do método de estimação das componentes de variâncias da MVC das observações baseado no princípio dos mínimos quadrados (AMIRI-SIMKOOEI, 2007; AMIRI-SIMKOOEI; TIBERIUS; TEUNISSEN, 2008). A vantagem de se utilizar o método baseado no princípio dos mínimos quadrados está associada com a análise de qualidade do ajustamento.

Ao realizar a estimativa pelo MMQ das componentes de variâncias da MVC das observações, o modelo estocástico das séries temporais se torna mais realístico, já que são considerados os diversos ruídos contidos na mesma. No caso das séries temporais de coordenadas GNSS, é realizada tanto a estimação de parâmetros no modelo funcional quanto no modelo estocástico, em ambos utilizando o MMQ (AMIRI-SIMKOOEI, 2007). Nesse artigo será dado enfoque à caracterização dos ruídos a partir do método de variância de Allan.

2.2 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 fórmula clássica do desvio-padrão é dada pela raiz quadrada da variância clássica, a qual é expressa por (GAMBIS, 2002):

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (x_i - x)^2 \quad (3)$$

onde, n é o número de dados, x_i é o valor do dado i e x é a média.

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):

$$\sigma_y^2(\tau) = \left\langle \sigma_y^2(N, T, \tau) \right\rangle = \frac{1}{N} \frac{\sum_{t=1}^N (y_{i+1} - y_i)^2}{2} \quad (4)$$

onde:

y_i – valor médio;

N – número de dados;

T – intervalo amostral;

τ – intervalo da média;

$\langle \rangle$ – 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):

$$S_x(\omega) = \omega^\alpha \quad (5)$$

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 ($(-\alpha - 1)/2$)
<i>Random Walk</i>	-2	0,5
<i>Flicker</i>	-1	0
<i>White Noise</i>	0	-0,5
<i>Super Flicker</i>	1	-1
<i>Super White</i>	2	-1,5

Há uma única relação entre a AVAR ($\sigma_y^2(\tau)$) e a função de Densidade Espectral do processo aleatório intrínseco, a qual é dada por (EL-SHEIMY; HOU; NIU, 2008):

$$\sigma_y^2(\tau) = 4 \int_0^\infty d\omega S_\Omega(f) \frac{\text{sen}^4(\pi f \tau)}{(\pi f \tau)^2} \quad (6)$$

onde $S_\Omega(f)$ é a PSD (*Power Spectral Density*) do processo aleatório $\Omega(\tau)$.

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

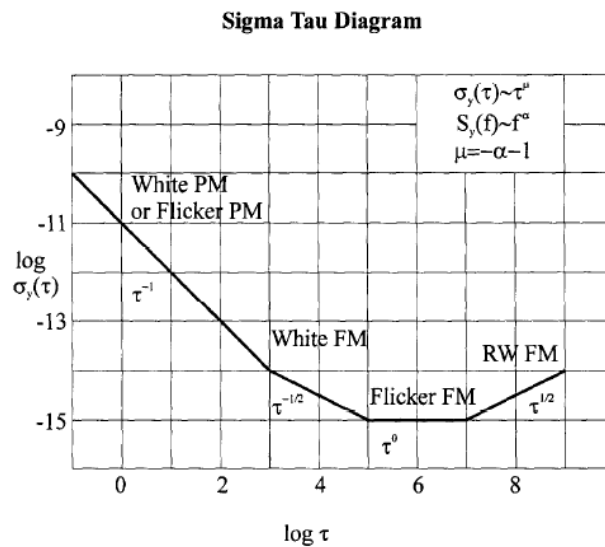


Figura 1- Representação log-log do desvio-padrão de Allan.
Fonte: Gambis (2002).

3 ANÁLISE DE SÉRIES TEMPORAIS

Como análises iniciais, foram utilizadas as coordenadas (X, Y, Z) disponibilizadas pelo SIRGAS-CON (<http://www.sirgas.org>). No caso, são disponibilizadas soluções de coordenadas semanalmente. Nesse artigo foram utilizados dados da estação BRAZ durante o período dos anos de 2000 a 2010. A Figura 2 mostra as séries temporais das discrepâncias das coordenadas cartesianas em relação à média transformadas para o sistema geodésico local (DE, DN, DU):

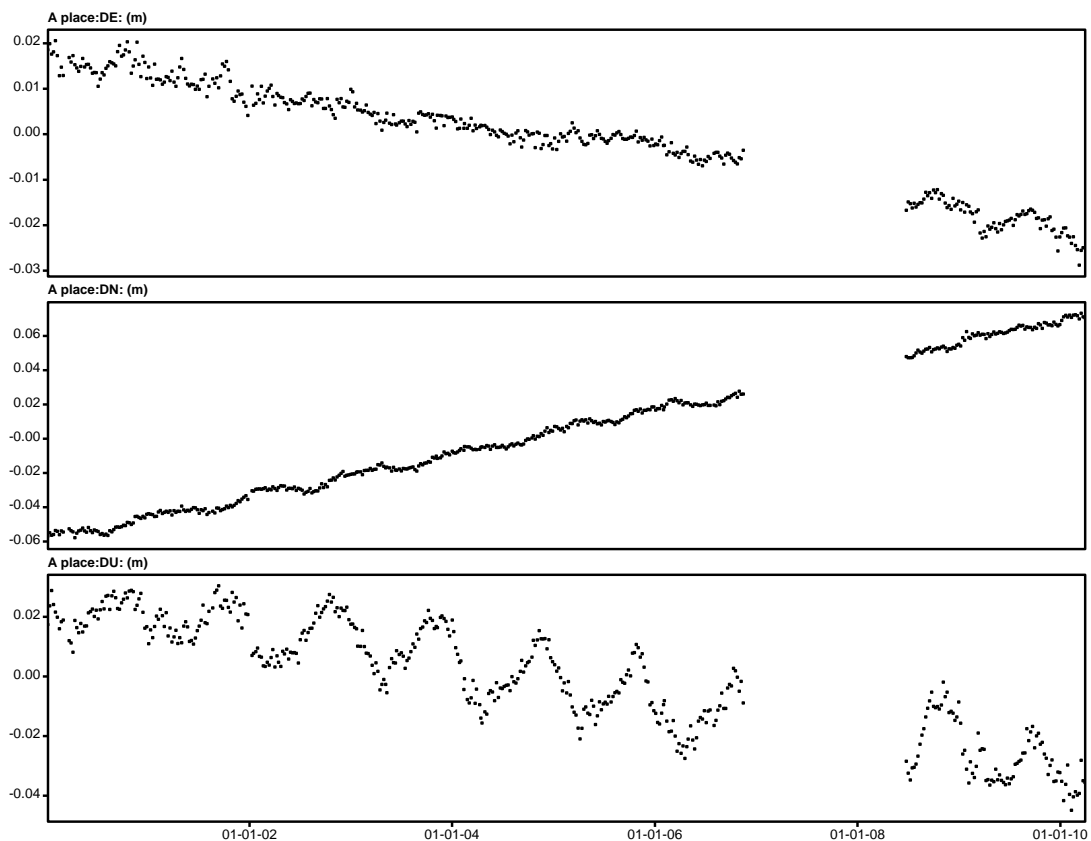


Figura 2 – Séries temporais das componentes DE, DN e DU.

Foram realizadas análises de tendências nas séries temporais, sendo estas apresentadas para cada componente na Figura 3.

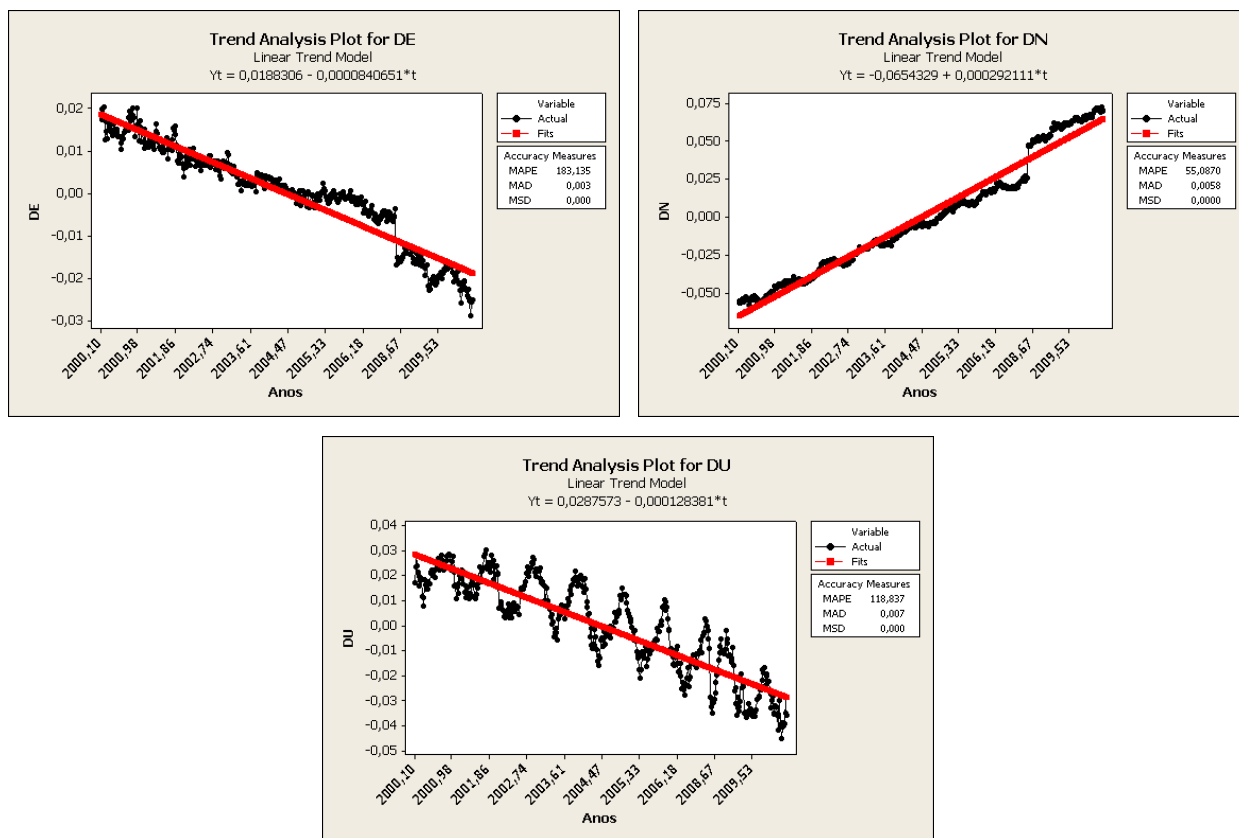


Figura 3 – Análise de tendência em cada componente (DE, DN, DU).

Na Figura 3, verifica-se que há uma tendência em todas as componentes. Pode-se observar também que há certa sazonalidade, principalmente na componente DU. Tais tendências e sazonalidade podem ser removidas (MORETTIN; TOLOI, 2004). No caso desse trabalho foram utilizados os dados sem realizar essas remoções.

Os resíduos correspondentes a cada componente são apresentados nas Figuras 4 a 6.

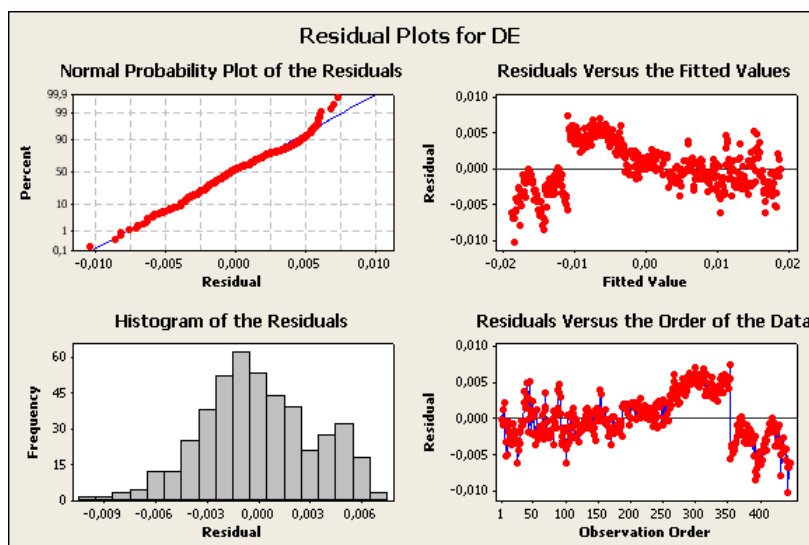


Figura 4 – Resíduos para a componente DE.

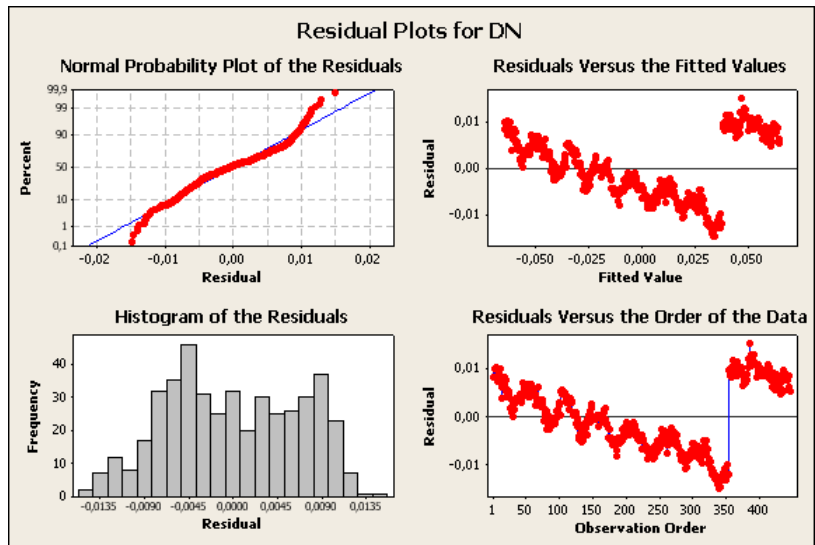


Figura 5 – Resíduos para a componente DN.

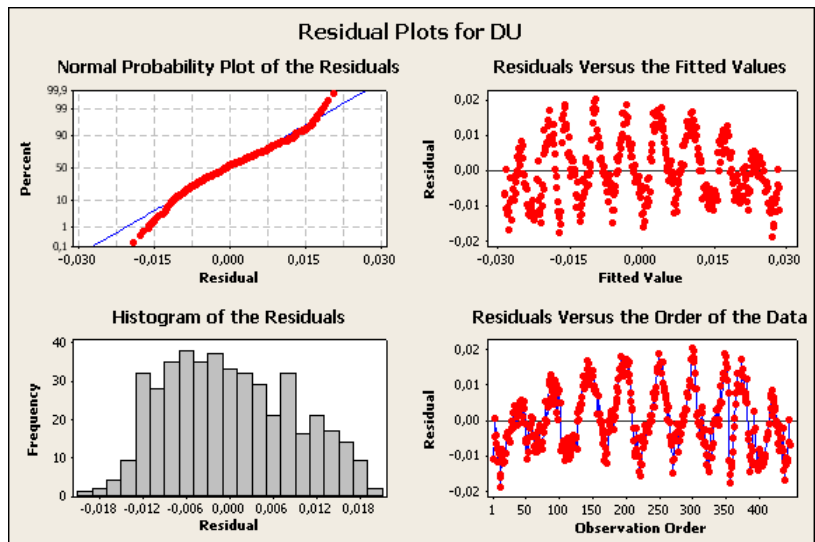


Figura 6 – Resíduos para a componente DU.

Foram realizadas outras análises dos dados através do software AlanVar. No caso, foi calculada a densidade espectral de potência (PSD) para cada uma das componentes, as quais podem ser visualizadas na Figura 7:

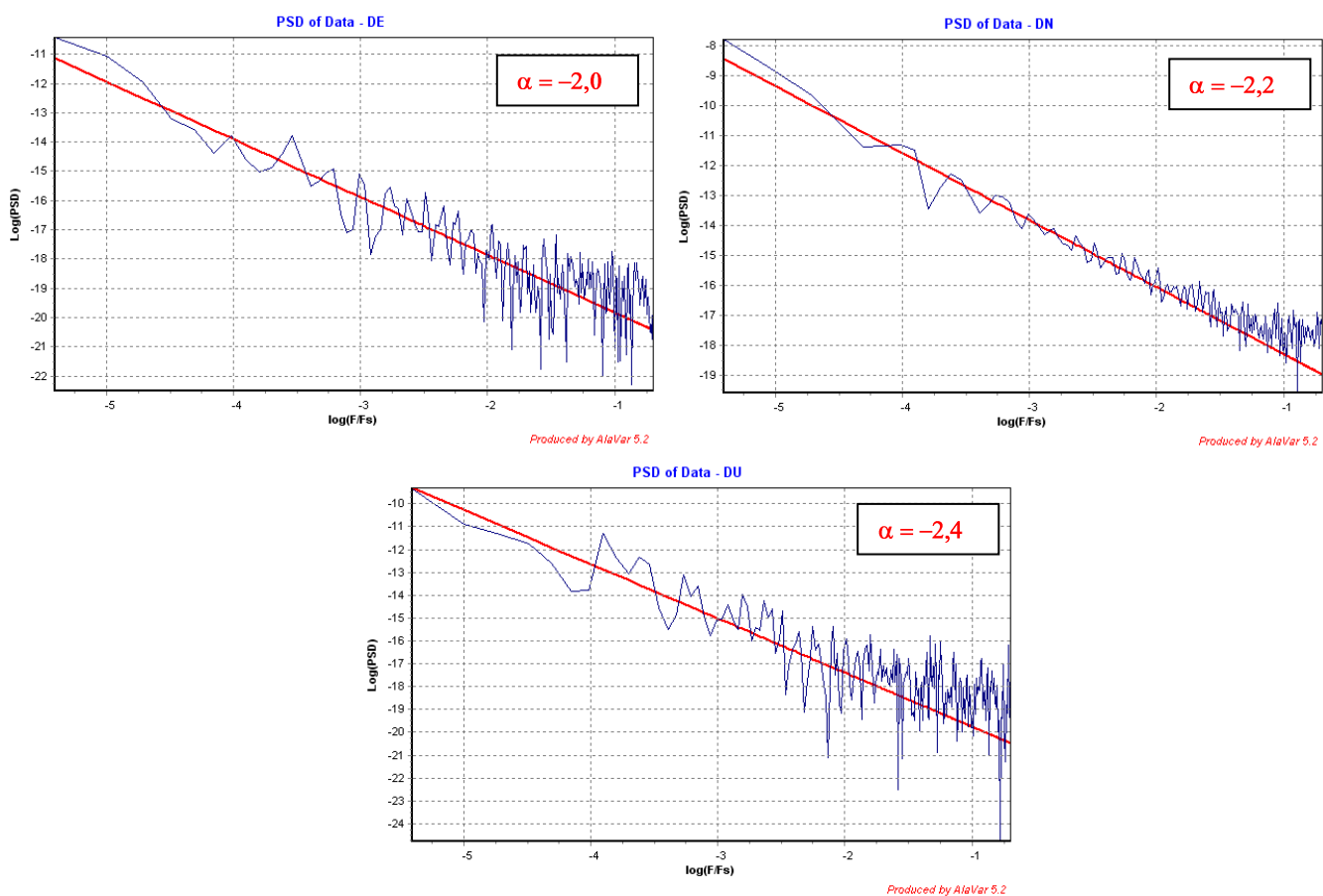


Figura 7 – Densidade espectral de potência (PSD) – componentes DE, DN e DU.

Ao analisar a Figura 7, que mostra a inclinação da PSD, verifica-se que o ângulo é igual a -2,0, -2,2 e -2,4 para DE, DN e DU, respectivamente. Nesse caso, observa-se que o espectro de cada uma das componentes das séries se aproxima do *Random Walk* (ver Tabela 2).

É interessante verificar também os gráficos do desvio-padrão de Allan (ADEV) e do desvio-padrão modificado de Allan (MDEV) (GAMBIS, 2002; ALLAN; BARNES, 1981) para cada uma das componentes, os quais são apresentados na Figura 8.

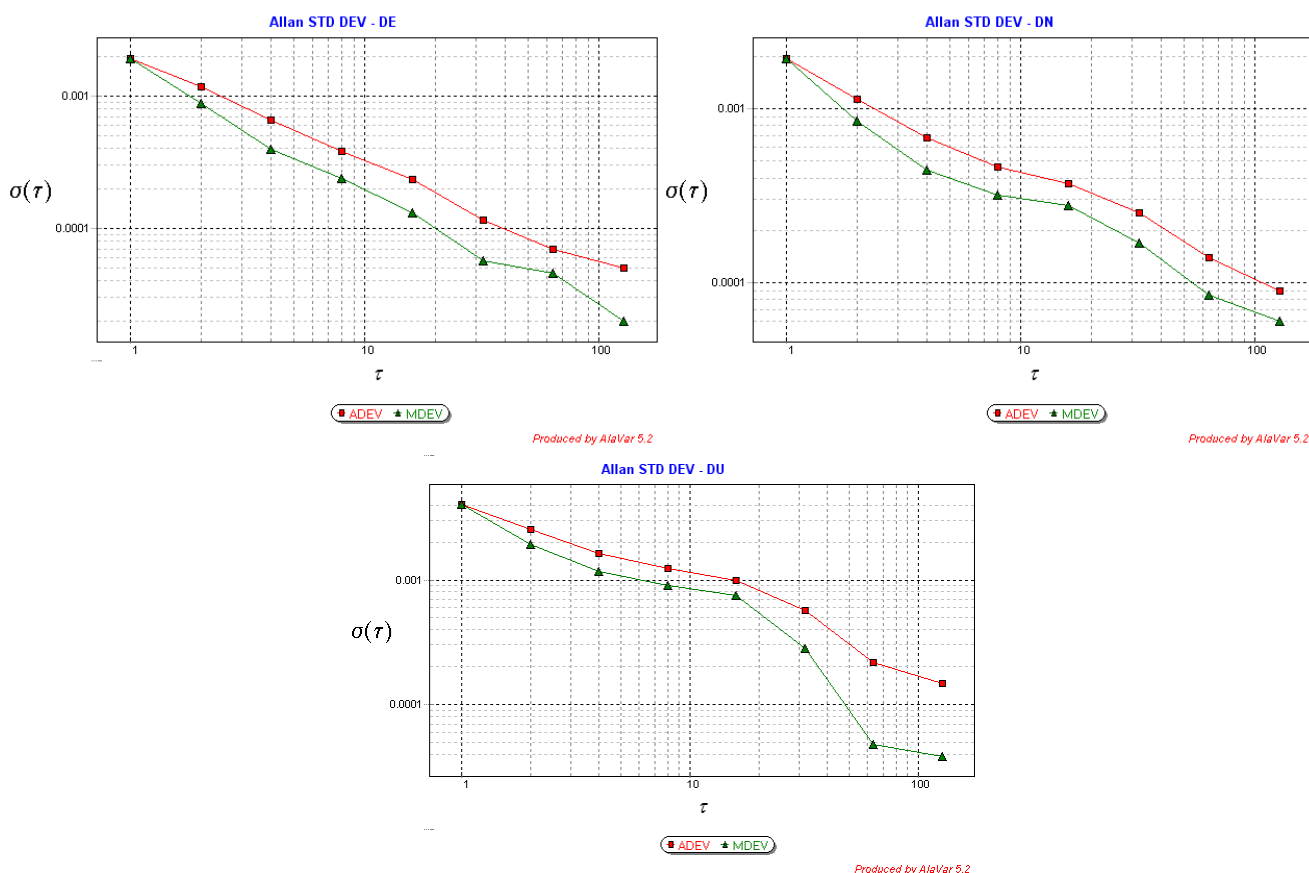


Figura 8 – Desvio-padrão de Allan para cada uma das componentes (DE, DN, DU).

Ao analisar a Figura 8 verifica-se que a inclinação do gráfico de log-log tem valores bem diferentes em cada período. Nesse caso, poder-se, então, ter diferentes tipos de ruídos, como exemplificado na Figura 1.

4 CONSIDERAÇÃO FINAIS

Nesse artigo é apresentada uma revisão sobre séries temporais e algumas formas de análise e caracterização de ruídos. São apresentadas também algumas análises iniciais com séries de coordenadas GNSS.

Com o objetivo de realizar algumas análises iniciais foram utilizadas as coordenadas cartesianas da estação BRAZ advindas de soluções semanais do SIRGAS-CON durante o período de 2000 a 2010. Ao analisar as discrepâncias com relação à média no SGL pode-se verificar a tendência e sazonalidade das séries temporais.

Ao analisar a densidade espectral de potência para cada componente (DE, DN e DU) verificou-se que as séries possuem um comportamento mais próximo do *random walk*. Já ao realizar análise baseada no cálculo da variância de Allan, verificou-se que as séries temporais de coordenadas GNSS podem conter diferentes tipos de ruídos e que se faz necessário uma investigação mais detalhada com relação à caracterização de ruídos nessas séries.

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.

AMIRI-SIMKOOEI, A. R.; TIBERIUS, C. C. J. M.; TEUNISSEN, P. J. G. Assessment of noise in GPS coordinate time series: methodology and results. **Journal of Geophysical Research**. vol. 112. 2008.

AQUINO, M.; MONICO, J. F. G.; DODSON, A.; MARQUES, H. A.; DE FRANCESCHI, G.; ALFONSI, L., ROMANO, V.; ANDREOTTI, M., 2009. Improving the GNSS Positioning Stochastic Model in the Presence of Ionospheric Scintillation. **Journal of Geodesy**, doi 10.1007/s00190-009-0313-6, 83(10), 953-966.

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.

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.

LEICK, A. **GPS satellite surveying**. 3rd ed. New York: John Wiley & Sons, 2004.435 p.

MINITAB. MINITAB QUALITY COMPANION. 2005: **MINITAB**: Statistical software. Disponível em: < <http://www.minitab.com> >. Acesso em: 2011.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo GNSS**: descrição, fundamentos e aplicações. 2. ed São Paulo: Unesp, 2008. 476p.

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.

SILVA, H. A.; CAMARGO, P. O.; MONICO, J. F. G; AQUINO, M.; MARQUES, H. A.; DE FRANCESCHI, G.; DODSON, A., 2010. Stochastic Modelling Considering Ionospheric Scintillation Effects on GNSS Relative and Point Positioning. **Advances in Space Research**: Special Issue Space Weather Advances, 45(9), 1113-1121.

TEUNISSEN, P. J. G.; KLEUSBERG, A. **GPS for geodesy**. 2. ed. New York: Springer-Verlag, 1998.

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

WILLIAMS, S. D. P. Error analysis of continuous GPS position time series. **Journal of Geophysical Research**. v. 109, 2004, n. B03412. DOI: 10.1029/2003JB002741.

ZHANG, J.; BOCK, Y.; JOHNSON, H; FANG, P.; WILLIAMS, S.; GENRICH, J.; WDOWINSKI, S.; BEHR, J. Southern California permanent GPS geodetic array: error analysis of daily position estimates and sites velocities. **Journal of Geophysical Research**. v. 102, 1997, n. B8, p. 18035-18055.