

Variações de alta frequência da duração do dia

Marcelo Carvalho dos Santos

Department of Surveying Engineering
University of New Brunswick, Canada *

RESUMO

Valores diários da duração do dia, compreendendo um período de 3 anos (1988. 0 -1991. 0), fornecidos pelo Serviço Internacional de Rotação da Terra — IERS (International Earth Rotation Service), foram analisados através do método de Análise Espectral por mínimos quadrados. O IERS surgiu em 1987, em substituição ao Serviço Internacional do Movimento do Pólo — IPMS ("International Pole Motion Service") e ao Serviço do Bureau Internacional da Hora—BIH. Seus resultados se baseiam em determinações de VLBI ("Very-Long Baseline Interferometry"), LLR ("Lunar Laser Ranging") e SLR ("Satellite Laser Ranging"), permitindo, deste modo, uma detecção mais consistente das variações de alta frequência da duração do dia. A análise espectral realizada mostra claramente as variações sazonais, bem como aquelas de maiores frequências. As possíveis causas geofísicas destas variações são apresentadas, com o intuito de complementar o artigo.

ABSTRACT

Spectral Analysis by least squares was employed to analyse 3 years (1988. 0 to 1991. 0) of daily values of the Length of Day. The data set was obtained from the International Earth Rotation Service—IERS, and is based on VLBI, LLR and SLR observations. The accuracy level of IERS solution allows more consistent detection of high frequency variations in length of day. The result of the spectral analysis carried out shows both seasonal and high frequency variations. The probable geophysical causes of these variations are also presented.

1. INTRODUÇÃO

A rotação irregular da terra pode ser apontada como uma consequência de sua não rigidez, bem como da acção de forças de natureza geofísica, meteorológica e gravitacional. De fato, pode-se considerar a Terra como composta por partes que são líquidas (os oceanos, a distribuição global de água do manto líquido), deformavelmente sólidas (a crosta e as partes interiores da Terra) ou gasosa (a atmosfera). Interações entre elas, bem como entre a Terra e outros corpos celestes,

perturbam sua rotação, resultando num movimento rotacional que difere daquele idealizado para um corpo rígido.

A não uniforme rotação terrestre pode ser expressa por meio dos Parâmetros de Rotação da Terra. Eles podem ser divididos em componentes do movimento do pólo e da duração do dia, e correspondem, respectivamente, às duas coordenadas (X_p , Y_p), que definem a posição do eixo de rotação da Terra num referencial terrestre com respeito ao pólo terrestre convencional (CIO), e ao valor do ângulo em torno do eixo de rotação (UT1). Estes parâmetros mostram variações espaciais e temporais, em diferentes frequências, sendo elas, secular, de longa periodicidade, anual, sazonais, ou mesmo de mais altas frequências.

* P. O. Box 4400 Fredericton, N. B. ,E3B 5A3 Canada

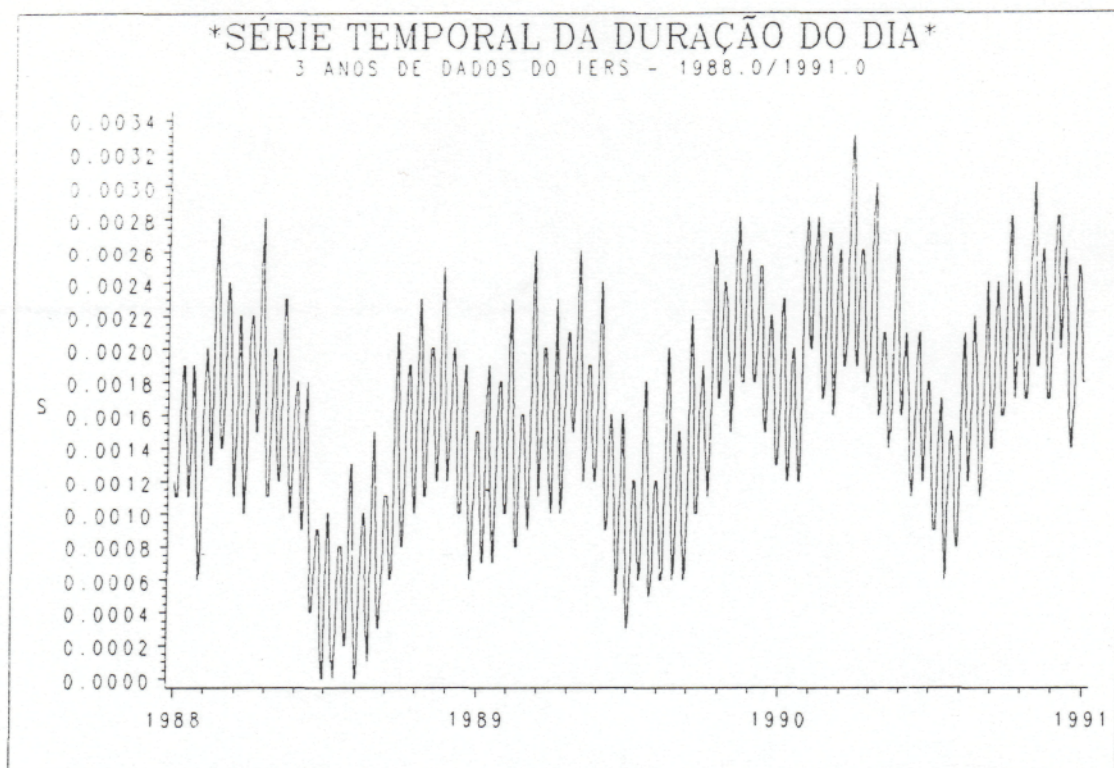


Figura 1



Figura 2

A rotação da Terra vem sendo observada de modo sistemático e contínuo desde o final do século XIX. Inicialmente, através do Serviço Internacional da Latitude — ILS ("International Latitude Service"), que se encarregava da determinação da latitude astronômica de cinco observatórios situados em diferentes lugares, mas todos sobre o paralelo de latitude 39° 08' N. Em 1962, o ILS foi reorganizado dando origem ao Serviço Internacional do Movimento do Pólo — IPMS ("International Polar Motion Service"), que incorporou novos observatórios junto a novos instrumentos astrométricos. Em paralelo, desde 1955, o Bureau International de l'Heure (BIH) passou a proporcionar outro serviço de rotação terrestre, baseado em observações oriundas de um grupo de observatórios que incluía as cinco estações do ILS e algumas do IPMS. Esta duplicidade de serviços levou ao estabelecimento do Serviço Internacional de Rotação da Terra ("International Earth Rotation Service" — IERS) em substituição do IPMS e do serviço de rotação terrestre do BIH. O IERS começou a operar em 1988 [Moritz & Mueller, 1987].

As técnicas astrométricas clássicas empregues inicialmente ganharam, mais recentemente, a companhia de técnicas extra-terrestres. Desde 1967, resultados obtidos através do Sistema Transit passaram a ser incluídos regularmente nos parâmetros publicados pelo BIH [Moritz & Muller, 1987]. Experiências com o Sistema de Posicionamento Global — GPS ("Global Positioning System") têm sido reportadas (Santos, 1990). Contudo, nos últimos 15 anos, as técnicas extra-terrestres que têm gerado séries temporais do movimento do pólo e variação do dia, de maior qualidade, têm sido LLR ("Lunar Laser Ranging"), SLR ("Satellite Laser Ranging") e VLBI ("Very-Long Baseline Interferometry") (Wahr, 1988). A tabela I apresenta recentes resultados na determinação das componentes do movimento do pólo e UT1, para cada uma das três técnicas mencionadas [Luo *et al*, 1987; Carter & Robertson, 1986; Robertson *et al*, 1985; Robertson *et al*, 1983; Langley *et al*, 1981b]. As precisões e resolução temporal relatadas, tornam estas técnicas apropriadas para a investigação das irregularidades de curto período da rotação terrestre. Os parâmetros de Rotação Terrestre publicados pelo IERS baseiam-se em observações de VLBI, LLR e SLR [IERS, 1989].

2. O CONJUNTO DE DADOS DO IERS

A finalidade deste trabalho foi detectar as variações anual, sazonais e de alta frequência da duração do dia. Por Duração do Dia entende-se a diferença entre a duração do dia determinada por observações astronômicas (ou geodésicas extra-terrestre) e 86 400 segundos do Tempo Atômico Internacional [IERS, 1989]. Para tal, foi utilizado um conjunto de dados oriundo do IERS, que compreende um período de três anos (1 de Janeiro de 1988 a 1 de Janeiro de 1991). O conjunto de dados é constituído por valores diários de duração do dia (em segundos) e do dia Juliano modificado da observação. Os valores fornecidos pelo IERS se baseiam em observações de VLBI, SLR e LLR, efetuadas por centros coordenadores. A figura 1 mostra a série temporal da duração do dia.

TÉCNICA	Xp, Yp	UT1	RESOLUÇÃO TEMPORAL
LLR	0,"006	0,5 ms	1 dia
SLR	0,"001-2	0,1-0,2 ms	3-5 dias
VLBI	0,"001	0,1 ms	1 dia/1 hora

TABELA 1

PRECISÃO E RESOLUÇÃO TEMPORAL NA DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE ROTAÇÃO TERRESTRE

O conjunto de dados em questão possui características importantes para a análise espectral efetuada, tais como, os dados são igualmente espaçados, contínuos, relacionam-se a um mesmo "datum", e possuem uma tendência (de crescimento) linear (fato este que pode ser apreciado na figura 1).

3. ANÁLISE ESPECTRAL POR MÍNIMOS QUADRADOS

Consideremos uma série temporal $f(t)$ que pode ser, total ou parcialmente, modelada por funções trigonométricas com várias frequências ω_i , e amplitudes α_i , β_i , $i=1, 2, \dots, m$,

$$f(t) = \sum_{i=1}^m (\alpha_i \cos \omega_i t_j + \beta_i \sin \omega_i t_j) \quad (1)$$

Pretende-se obter os valores de ω_i , α_i , β_i . Se as frequências são conhecidas a priori, trata-se de um problema de regressão linear e os coeficientes α_i , β_i podem ser determinados. Caso contrário, se as frequências estão contidas dentro das funções trigonométricas como parâmetros, temos um problema não linear, cuja solução pode existir ou não. Existindo solução, seria necessário um cálculo extremamente trabalhoso para sua obtenção, pelo que seria necessário ter uma boa aproximação das frequências ω_i , o que normalmente não é o caso [Vanicek & Krakiwsky, 1986]. A busca de uma solução para as frequências incógnitas ω_i se constitui no problema da Análise Espectral.

Um método usualmente utilizado quando se lida com séries temporais contendo «ruídos sistemáticos» consiste na remoção preliminar da «função ruído» por meio de ajuste por mínimos quadrados para determinar a sua amplitude, e posterior aplicação da análise de Fourier na série restante para determinar o seu espectro. Esta técnica degrada consideravelmente o espectro próximo da frequência da função ruído removida [Taylor & Hamilton, 1972]. Na alternativa proposta por Vanicek (1971), na utilização da Análise Espectral usando mínimos quadrados, os «ruídos sistemáticos» podem ser eliminados sem o necessário conhecimento das magnitudes das componentes do ruído. Por outras palavras, o espectro resul-

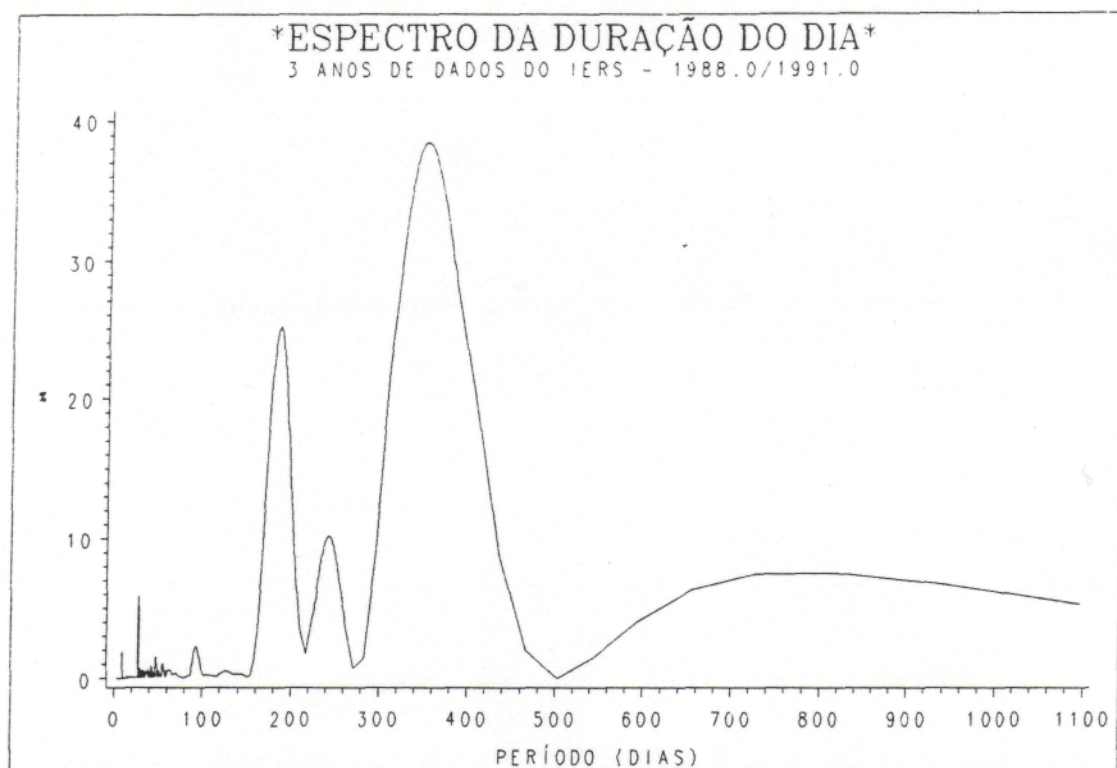


Figura 3

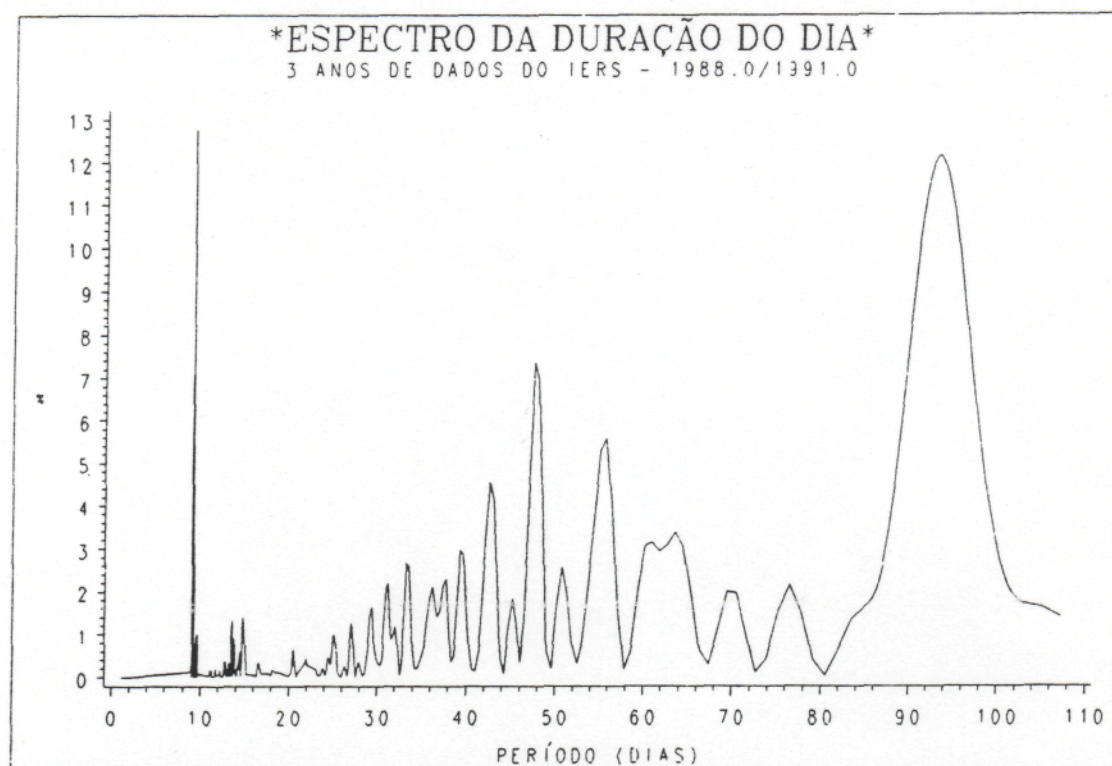


Figura 4

tante é insensível a qualquer ruído sistemático ou aleatório. O método de Análise Espectral em questão possui, adicionalmente, as seguintes características: não desloca os picos do espectro que caíam próximos aos ruídos sistemáticos; distorce a amplitude do pico menos do que o método da análise convencional; tende a intensificar os lobos laterais; permite que sejam usados dados desigualmente espaçados, descontínuos, e com «datum» variável [Taylor & Hamilton, 1972].

O programa utilizado [Wells *et al.*, 1985] permite que as componentes conhecidas da série temporal sejam removidas do espectro resultante. Tais componentes são: mudança de «datum» (um exemplo de mudança de «datum»: a mudança de posição de um marégrafo durante observações do nível do mar), tendência linear, períodos «forçados», ou quaisquer outros componentes especificados pelo utilizador (por exemplo, tendência quadrática ou exponencial). No caso em questão não houve mudança de «datum» e não foram especificados outros tipos de componentes. Apenas tendência linear e períodos forçados foram utilizados.

O procedimento adoptado foi o seguinte. Inicialmente, foi obtido o espectro da variação do dia sem considerar nenhum período forçado. Entretanto, a tendência linear claramente visível na série temporal foi incluída neste primeiro processamento. O espectro resultante é apresentado na figura 2. Seguidamente, adotou-se o procedimento de eliminação dos picos mais proeminentes do espectro, considerados, de agora em diante, como componentes de período forçado. O primeiro pico retirado do espectro foi o correspondente à oscilação de 13 dias, e cujo espectro resultante é apresentado na figura 3. Outros picos foram posteriormente retirados. A figura 4 representa o espectro resultante sem a influência das oscilações (picos nos espectros anteriores) bi-anual, anual, de oito meses, semi-anual, de 27 e 14 dias.

A tabela 2 apresenta as amplitudes e as fases dos componentes periódicos removidos (além da componente de 9,5 dias, que não foi removida do espectro). As amplitudes estão expressas em milisegundos e as fases em graus, contadas desde o início do período. O desvio padrão das amplitudes e fases, também incluídas na tabela, foram estimadas internamente pelo programa utilizado.

4. INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

A figura 2 apresenta o espectro da duração do dia. Este espectro é dominado por alguns picos de grande poder espectral. Destacam-se as variações anual, semi-anual, de oito meses, bem como variações de alta frequência como as de 13 e 27 dias. As variações bi-anual e de três meses foram também detectadas. As flutuações que ocorrem no período entre 40 e 60 dias podem também ser apreciadas.

Algumas das variações periódicas da duração do dia mencionadas acima podem ser apreciadas na figura 1. Nesta figura pode-se constatar de antemão que os intervalos consecutivos entre os picos da série temporal correspondem a um período de pouco mais de 13 dias, e o intervalo entre dois

	AMPLITUDE	FASE
Bi-anual (730,50 d)	0,158 ± 0,009	223,49 ± 0,00
Anual (365,25 d)	0,373 ± 0,009	74,06 ± 0,00
8 meses (242,10 d)	0,870 ± 0,009	2,41 ± 0,00
Semianual (182,63 d)	0,328 ± 0,008	304,77 ± 0,00
27,55 d	0,153 ± 0,008	180,98 ± 0,00
13,66 d	0,496 ± 0,008	51,95 ± 0,00
9,50 d	0,825 ± 0,008	165,29 ± 0,00

TABELA 2

AMPLITUDE E FASE DOS COMPONENTES PERIÓDICOS DE ANÁLISE ESPECTRAL EFETUADA

picos alternados a um período de 27 dias. Pode-se notar, também, claramente, as variações anual e semi-anual.

A figura 3 apresenta o espectro da duração do dia após o período correspondente a variação da duração do dia de 13 dias ter sido removida. O resultado é um acréscimo no poder espectral dos outros períodos.

A figura 4 apresenta o espectro após a remoção dos períodos correspondentes às variações bi-anual, anual, de oito meses, semi-anual, de 27 e 13 dias, ampliando-se a escala do gráfico de modo a se conseguir uma melhor visualização do espectro restante, no que diz respeito às frequências. O espectro agora é dominado pelas variações de nove dias, e de cerca de três meses, bem como variações irregulares, com predominância entre 40-60 dias.

As causas geofísicas para as variações detectadas parecem ter origem meteorológica e nas marés. As marés contribuem com os termos de período correspondente a 730,5, 365,25, 182,63, 27,55, 13,66 e 9,5 dias [Melchior, 1983; Yoder *et al.*, 1981]. A ação das marés provocada pela lua é a fonte da maior parte das amplitudes observadas mensal e quinzenalmente, ao passo que a ação conjunta da lua e do sol é apreciável nas periodicidades anuais e semi-anuais [Christou, 1990]. As variações sazonais da duração do dia parecem também ter causas meteorológicas, atribuídas a padrões de circulação atmosférica. Cerca de 70% das variações sazonais (anuais e semi-anuais) devidas a processos atmosféricos está associada à ação dos ventos, cuja ação na terra sólida se traduz em torques. A pressão atmosférica global também contribui nas variações sazonais da duração do dia modificando o pólo do momento de inércia atmosférico. As variações de alta frequência (40-60 dias) evidenciam forte correlação com variações do momento angular atmosférico [Langley *et al.*,

1981b]. Outras flutuações de alta frequência e baixo poder espectral parecem ser nada mais que ruídos oriundos das observações e «ruídos meteorológicos» [Lambeck, 1988]. Alguns autores, como Chao [1989], conectam fenômenos meteorológicos regionais, como o El Niño, a variações sazonais da duração do dia.

Outras causas para a variação da duração do dia são especuladas, como por exemplo, variações associadas com mudanças na circulação oceânica [Christou, 1990].

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As variações na duração do dia são manifestações da grande complexidade, resultantes das interações entre as forças que influenciam a rotação da Terra. Nas últimas décadas, novos conjuntos de dados geofísicos têm permitido uma melhor compreensão destas forças, e do grau com que elas contribuem nas irregularidades da rotação terrestre observadas.

O advento das técnicas geodésicas extra-terrestres têm possibilitado as mais precisas determinações dos parâmetros

de rotação terrestres, o que resulta na possibilidade de detecção de variações de alta frequência, como exemplificado neste artigo.

O método de Análise Espectral utilizado, se apresenta como poderosa ferramenta para este tipo de análise. As suas vantagens e características foram descritas durante o artigo.

Através da análise espectral feita, pode-se constatar que as variações da duração do dia, sazonais e de alta frequência, são (possivelmente) provocadas pela ação das marés e de forças meteorológicas, existindo clara correlação entre estas e as frequências representadas no espectro.

6. AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Richard Langley da Universidade de New Brunswick, Canadá, pela obtenção dos dados junto ao IERS e valiosos comentários. Ao Eng.^o Virgílio Brito Mendes, ora em estudos de doutoramento na mesma instituição, pela sua leitura crítica deste artigo. Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, CNPq.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CARTER, W. E.; ROBERTSON, D. S. «Accurate Earth Orientation Time Series from VLBI observations». *Earth Rotation: Solved and Unsolved Problems*, A. Cazenave, ed, D. Reidel Publ. Co, Dordrecht, 1986.
- CHAO, B. F. «Length-of-Day Variations caused by El Niño/Southern Oscillation and the Quasi-Biennial Oscillation». *Science*, 243:923-925, 1989.
- CHRISTOU, N. T. «On the space-time ocean current variability and its effects on the length-of-day». *Technical Report*, n.º 148, Department of Surveying Engineering, University of New Brunswick, Canadá, 1990.
- IERS. «Annual Report». *International Earth Rotation Service Annual Report for 1988*, Paris, 1989.
- LAMBECK, K. «The Earth's variable rotation: some geophysical causes». *The Earth's Rotation and Reference Frames for Geodesy and Geodynamics*, A. K. Babcock e G. A. Wilkins, ed., IAU, 1-20, 1988.
- LANGLEY, R. B.; KING, R. W.; SHAPINO, I. I.; CARTER, W. E. «Earth Rotation from Lunar Laser Ranging». *Journal of Geophysical Research*, 86:11913-11918, 1981a.
- LANGLEY, R. B.; KING, R. W.; SHAPINO, I. I.; ROSEN, R. D.; SALTEIN, D. A. «Atmospheric Angular Momentum and the Length of the Day: a common fluctuation with a period near 50 days». *Nature*, 294:730-733, 1981b.
- LUO, S.; ZHENG, D.; ROBERTSON, D. S.; CARTER, W. E. «Short period variations in the length of day. Atmospheric Angular Momentum and Tidal Components». *Journal of geophysical Research*, 92:11657-11661, 1987.
- MELCHIOR, P. «The Tide of the Planet Earth», 2nd ed. *Pergamen Press*, Oxford, 1983.
- MORITZ, H.; MUELLER, I. I. «Earth Rotation: Theory and Observation». Ungar, New York, 1987.
- ROBERTSON, D. S.; CARTER, W. E.; CAMPBELL, J. A.; SCHUH, H. «Daily Earth Rotation Determinations from IRIS Very Long Baseline Interferometry». *Nature*, 316:424-427, 1985.
- ROBERTSON, D. S.; CARTER, W. E.; SCHUTZ, R. J.; TAPLEY, B. D.; KING, R. W.; LANGLEY, R. B.; MORGAN, P. J.; SHAPINO, I. I. «Comparison of Earth Rotation as inferred from Radio Interferometric, Laser Ranging and Astrometric observations». *Nature*, 302:509-511, 1983.
- SANTOS, M. C. «NAVSTAR/GPS: Aspectos Teóricos e Aplicações Geofísicas». *Publicação Especial*, n.º 7, Observatório Nacional, Rio de Janeiro, Brasil, 1990.
- TAYLOR, J.; HAMILTON, S. «Some Tests on the Vanicek method of Spectral Analysis». *Astrophysics and Space Science*, 17:357-367, 1972.
- VANICEK, P.; KRAKIWSKI, E. «Geodesy: the Concept», 2nd Edition. North Holland, Amsterdam, 1986.
- VANICEK, P. «Further developments and properties of the Spectral Analysis by Least Squares». *Astrophysics and Space Science*, 12:10-73, 1971.
- WAHR, J. M. «The Earth's Rotation». *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, 16:231-248, 1988.
- WELLS, D. E.; VANICEK, P.; PAGIATAKIS, S. «Least Squares Spectral Analysis Revisited». *Technical Report*, n.º 84, Department of Surveying Engineering, University of New Brunswick, Canada, 1985.