



OBSERVAÇÕES DO CONTEÚDO ELETRÔNICO TOTAL COM DADOS DO GPS

M. Fedrizzi, I.J. Kantor, E.R. de Paula

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE, São José dos Campos, SP

ABSTRACT

Um método para a obtenção do Conteúdo Eletrônico Total (CET), a partir das observáveis do "Global Positioning System" (GPS) é apresentado. A maior parte dos dados disponíveis de CET, no setor sul-americano, foi obtida através de medidas de rotação Faraday, que não contêm a contribuição dos elétrons situados acima de 2.000 km de altura. Todavia, valores de CET que incluem o conteúdo eletrônico plasmasférico, podem ser obtidos através dos dados de satélites GPS. O método utiliza-se da característica dispersiva do meio ionosférico para determinar o conteúdo eletrônico total a partir da diferença entre medidas de código e fase simultâneas, nas duas frequências dos sinais transmitidos pelos satélites GPS. Medidas do CET foram obtidas através deste método para estações receptoras, pertencentes à rede IGS, situadas nas regiões da América do Sul e península Antártica. Os resultados permitiram efetuar um estudo da variação diurna, latitudinal e sazonal do CET, nestas regiões, para uma época de baixa atividade solar, em condições ionosféricas magneticamente calmas. Uma análise dos dados em condições ionosféricas magneticamente calmas e perturbadas mostra o potencial do estudo do efeito das tempestades magnéticas e irregularidades ionosféricas a partir da utilização de dados do GPS.

INTRODUÇÃO

A ionosfera, região da atmosfera superior que se estende desde, aproximadamente, 50 km até 1.000 km de altura, é caracterizada pela alta condutividade, devido ao número elevado de íons e elétrons livres que a compõe. Conseqüentemente, uma onda eletromagnética que atravessa esta camada, tem a velocidade e direção de propagação alteradas. Esta propriedade caracteriza a ionosfera como um meio dispersivo, onde a velocidade de propagação da onda é uma função do índice de refração do meio, permitindo determinar o atraso na modulação de grupo do sinal. Esta medida é diretamente proporcional ao número de elétrons presentes na trajetória de propagação do sinal, definido pelo Conteúdo Eletrônico Total (CET).

O CET é um parâmetro importante a ser medido na ionosfera e, por ser altamente dependente da radiação solar, apresenta variações diurnas, sazonais e geográficas, assim como variações relacionadas ao nível de atividade solar e tempestades magnéticas. Até o presente momento, a maior parte dos dados disponíveis de CET, no setor sul-americano, foi obtida através de medidas de rotação Faraday, que utiliza ondas de rádio transmitidas por satélites, nas frequências entre 40 e 400 MHz. Todavia, estas medidas não contêm as contribuições do CET para alturas superiores a 2.000 km, devido à diminuição com a altura dos valores do campo magnético terrestre e densidade eletrônica.

Os satélites utilizados nas medidas de CET, através da técnica de rotação Faraday, estão praticamente desativados. Atualmente, o conteúdo eletrônico total vem sendo determinado a partir de medidas do "Global Positioning System" (GPS), um sistema de navegação que permite determinar a posição e velocidade de objetos situados em qualquer ponto sobre ou próximo à superfície terrestre, em relação à um sistema de referência. Os sinais transmitidos pelos satélites são gerados coerentemente a partir da frequência fundamental de 10,23 MHz e transmitidos nas frequências de 1.575,42 MHz e 1.227,60 MHz. A combinação destes sinais permite determinar o atraso de grupo da portadora modulada e, conseqüentemente, obter a medida do CET.

A utilização de dados do GPS na determinação das medidas de conteúdo eletrônico total proporcionou um aumento na cobertura de dados, devido ao grande número de receptores distribuídos globalmente. Entretanto, no hemisfério Sul os dados de CET ainda são escassos e os modelos existentes não representam corretamente esta região. Desta forma, espera-se que este trabalho venha contribuir para a ampliação da base de dados do CET, no setor sul-americano.

DETERMINAÇÃO DO CET A PARTIR DAS OBSERVÁVEIS DO GPS

As pseudo-distâncias obtidas a partir do código e fase de batimento da portadora podem ser representadas, respectivamente, pelas expressões (Komjathy, 1997; Kantor et al., 1998)

$$\rho_i = R + c\Delta\delta + \Delta_i^{iono} + \Delta^{Trop} + d_{\rho,i}^r + d_{\rho,i}^s + m_{\rho,i} + \varepsilon_{\rho,i}$$

e

$$\Phi_i = \lambda_i\phi_i = R + c\Delta\delta - \Delta_i^{iono} + \Delta^{Trop} + \lambda_i N_i + d_{\phi,i}^r + d_{\phi,i}^s + m_{\phi,i} + \varepsilon_{\phi,i}$$

onde $i=1,2$ representa as portadoras de frequência L1 e L2, ρ_i é a observável de pseudo-distância na frequência L_i

(em unidades de distância), R é a distância geométrica satélite-receptor, c corresponde à velocidade da luz no vácuo, $\Delta\delta$ representa os erros dos relógios dos satélites e receptores, $\Delta_i^{iono} = 40,3 \text{ CET}/f_i^2$ e Δ^{Trop} são, respectivamente, os efeitos da ionosfera e troposfera sobre as pseudo-distâncias (CET é o Conteúdo Eletrônico Total e f é a frequência da portadora L_i), d_i^r e d_i^s são os atrasos diferenciais dos receptores e satélites, m_i refere-se ao efeito do múltiplo caminho, ε_i representa o ruído do receptor, Φ_i é a fase de batimento da portadora (em unidades de distância), ϕ_i é a fase de batimento da portadora (em ciclos), λ_i é o comprimento de onda da portadora L_i e N_i representa o termo da ambigüidade.

O CET pode ser obtido a partir de uma combinação linear entre as pseudo-distâncias, nas portadoras L1 e L2, o que resulta em

$$\text{CET}_\rho = S \{(\rho_2 - \rho_1) - d_\rho - m_\rho - \varepsilon_\rho\}$$

onde $S = 9,52 \times 10^{16} \text{ [el/m}^3\text{]}$ e $d_\rho = d_\rho^r + d_\rho^s$. De forma similar, obtém-se para as medidas de fase de batimento da portadora

$$\text{CET}_\phi = S \{(\Phi_1 - \Phi_2) - (\lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2) - d_\phi - m_\phi - \varepsilon_\phi\}$$

onde $d_\phi = d_\phi^r + d_\phi^s$. A medida do CET_ρ é consideravelmente afetada pelo ruído, ao contrário do conteúdo eletrônico obtido a partir da fase da portadora, CET_ϕ . Este último contém o termo da ambigüidade, que representa o número inteiro e desconhecido de ciclos ocorridos ao longo da trajetória de propagação do sinal e, portanto, não representa o valor real do conteúdo eletrônico. Entretanto, a partir da combinação de CET_ρ e CET_ϕ , é possível obter uma medida representativa do conteúdo eletrônico, com uma considerável redução no nível de ruído (Fraile-Ordóñez, 1995). Este resultado é uma consequência do "nivelamento" das medidas de fase sobre as pseudo-distâncias (Figura 1), para uma determinada seqüência de dados que não contenha descontinuidades nas medidas de fase (*cycle slips*). O CET nivelado, então, é dado por

$$\text{CET}_L = S \{(\Phi_1 - \Phi_2) - \langle (\Phi_1 - \Phi_2) - (\rho_2 - \rho_1) \rangle - d_\rho - m_\rho - \varepsilon_\phi\}$$

Para obter os atrasos diferenciais instrumentais e efetuar um mapeamento do conteúdo eletrônico total, a medida do CET_L , para um instante t e dada por $T^{rs}(t)$, entre um determinado satélite s e um receptor r , pode ser modelada pela equação

$$T^{rs}(t) = M(E) I(\theta, \gamma, t) + d^s + d^r$$

onde $M(E)$ é uma função de mapeamento para a elevação E , $I(\theta, \gamma, t)$ é um modelo ionosférico do CET, θ , γ e t são, respectivamente, latitude, longitude e instante da medida. O método da similitude (Kantor et al., 1998), ainda em estudo, será descrito no momento oportuno.

SELEÇÃO E AQUISIÇÃO DOS DADOS

As observáveis do GPS utilizadas neste trabalho, no formato RINEX (*Receiver Independent EXchange*), e as efemérides precisas, no formato SP3 (*Standard Product #3*), foram obtidas através do CDDIS (*Crustal Dynamics Data System*). As estações receptoras analisadas pertencem à rede IGS (*International GPS Service*), e estão localizadas na região sul-americana: Arequipa, Bogotá, Fortaleza, Kourou, La Plata, O'Higgins e Santiago. Os dados pertencentes à estação de Brasília não eram suficientes para o estudo proposto e, portanto, não foram analisados. Considerando que a disponibilidade de dados simultâneos para estas estações ocorreu a partir de meados de 1995, o estudo do comportamento do CET poderia ser efetuado apenas para um período de baixa atividade solar. Desta forma, foram selecionados alguns dias magneticamente calmos e perturbados (Tabela 1), de acordo com a classificação de Wrenn et al. (1987), para os níveis de atividade magnética: muito quieto ($K_p=0$ a 1), quieto ($K_p=1$ a 2⁻), normal ($K_p=2^+$ a 3⁺), perturbado ($K_p=3^+$ a 4⁺) e muito perturbado ($K_p=4^+$ a 9). A variação do índice DST

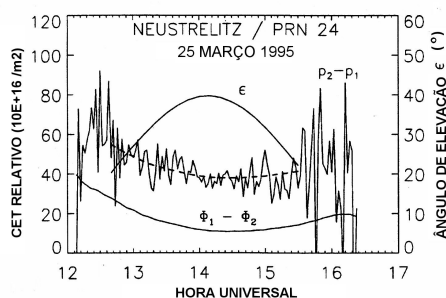


Figura 1 - Pseudo-distâncias diferenciais ($\tilde{n}_2 - \tilde{n}_1$) e portadoras de fase diferenciais ($\Phi_1 - \Phi_2$), durante a passagem do satélite PRN 24 sobre Neustrelitz, em 25 de março de 1995. FONTE: Jakowski (1996).

(*Disturbance Storm-Time*), foi analisada para os dias perturbados, verificando-se que, apesar da fraca intensidade, a tempestade mais apropriada para um estudo ocorreu entre os dias 09/12 e 10/12 de 1996.

Tabela 1 - Nível de Atividade Magnética para os Dias Analisados, no Ano de 1996.

Mês	Condição Magnética	
	Dias Calmos	Dias Perturbados
Março	02 e 07	21
Junho	12, 13 e 14	–
Dezembro	06, 26 e 28	9 e 10

RESULTADOS

A variação do CET vertical em relação à hora universal não é muito apropriada para uma análise da variação temporal deste parâmetro. Considerando que, para um sistema de coordenadas fixo em relação ao sol, o comportamento da ionosfera tem pouca variação, a longitude geomagnética e a hora universal foram combinadas para fornecer a variação do CET vertical em função da hora local de cada estação. Os dados de CET vertical, compreendidos entre $\pm 20^\circ$ (ao norte e ao sul) relativos à latitude geomagnética de cada estação receptora, no ponto sub-ionosférico, foram agrupados em intervalos de 30 minutos e 5° de latitude geomagnética e, posteriormente, foram obtidos valores médios para estes intervalos de hora e latitude. O resultado deste procedimento é apresentado na Figura 2, onde um dos picos da anomalia equatorial (ou anomalia de Appleton) pode ser observado, entre as latitudes geomagnéticas de 5° e 10° N, próximo à estação de Kourou.

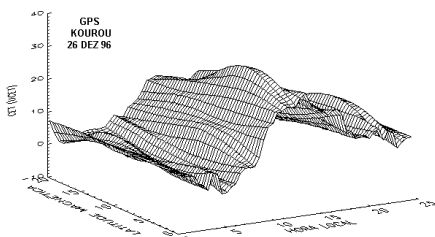


Figura 2 - CET vertical obtido a partir das observáveis do GPS, para a estação de Kourou.

A variação sazonal para a estação de Fortaleza é apresentada na Figura 3, onde \bar{R} representa a média do número de manchas solares para cada mês analisado. Uma média da variação do CET vertical, em função da hora local, foi obtida para 2 dias calmos do equinócio de março, 3 dias calmos para o solstício de verão e 3 dias calmos para o inverno. Em geral, os resultados obtidos

concordam com os resultados apresentados por Titheridge (1973), os quais podem ser observados na Figura 4. As diferenças no valor absoluto do CET vertical entre os resultados, podem ser explicadas em função das diferentes latitudes do hemisfério Sul escolhidas para a obtenção do conteúdo eletrônico e devido ao fato do método de rotação Faraday não incluir o conteúdo eletrônico plasmasférico. Além disso, deve-se considerar que o atraso instrumental diferencial do receptor, na estação de Fortaleza não foi completamente eliminado, o que poderia explicar os valores negativos de CET vertical para esta estação.

O efeito das tempestades magnéticas sobre o conteúdo eletrônico total foi analisado para uma tempestade magnética considerada fraca, dentro do período de dados selecionados para este trabalho, ocorrida entre os dias 9 e 10 de dezembro de 1996.

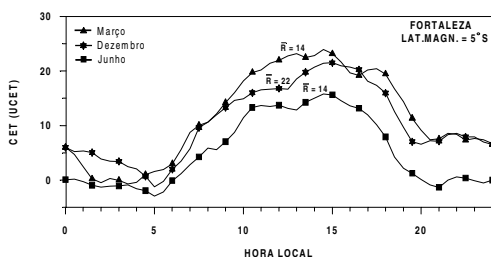


Figura 3 - Variação sazonal do CET vertical, para Fortaleza, no ano de 1996.

De acordo com a Figura 5, após o início da tempestade, em torno das 20:00 horas do dia 09/12/96, houve um aumento no valor do CET vertical para as estações de O'Higgins, La Plata, Santiago e Fortaleza, seguido por um decréscimo pouco antes do início da fase de recuperação. Estas variações são relativas à média do CET vertical para alguns dias calmos (Tabela 1). A estação de Kourou apresentou um aumento do CET vertical, no início do dia 10 de dezembro, que pode estar associado à ocorrência da tempestade. As estações de Arequipa, e Bogotá, no entanto, não apresentaram efeitos durante as fases inicial e principal desta tempestade. Não houve uma recuperação da tempestade propriamente dita mas, provavelmente, um conjunto de sucessivas e pequenas perturbações que provocaram um aumento do conteúdo eletrônico para todas as estações, com exceção de O'Higgins, a partir das 09:00 horas do dia 10 de dezembro. Este resultado demonstra a potencialidade do estudo do efeito das tempestades magnéticas sobre os valores do conteúdo eletrônico total, a partir de dados do GPS.

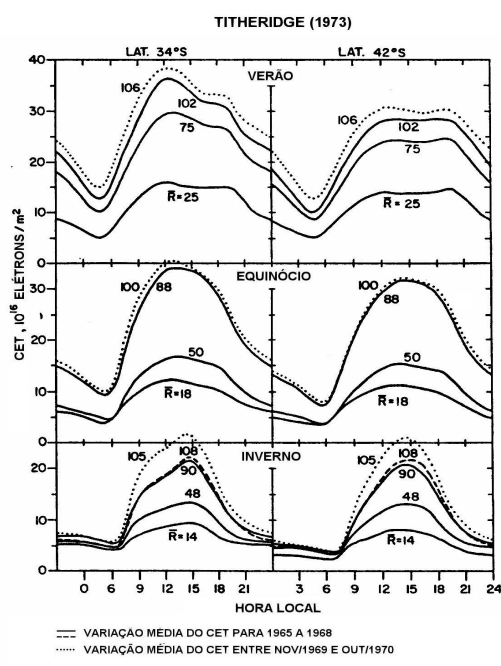


Figura 4 - Variação diurna do conteúdo eletrônico, em diferentes estágios do ciclo solar.

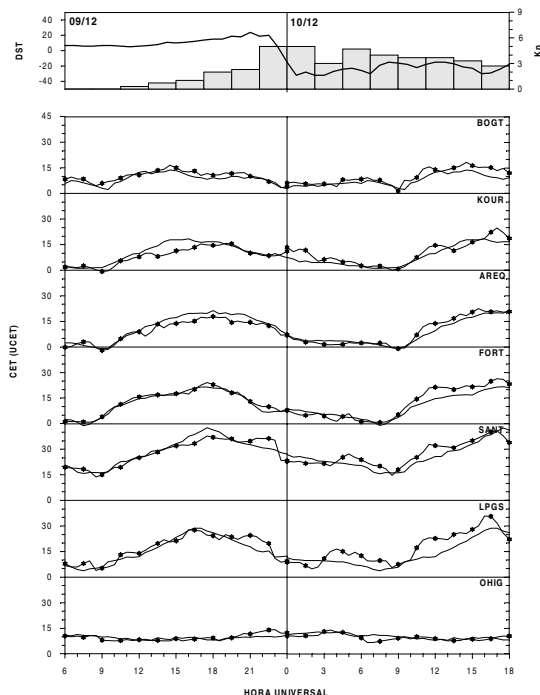


Figura 5 - Variação diurna do CET vertical para a média dos dias calmos (-----) e para os dias perturbados (-----), em dezembro de 1996.

CONCLUSÕES

Este trabalho marca o início da determinação do CET vertical a partir de dados do GPS, no INPE. Entretanto, já existem vários estudos relacionados a este assunto e um número crescente de trabalhos vem surgindo. Este fato deve-se a um aumento na utilização do GPS, principalmente no hemisfério Norte, onde a quantidade de estações receptoras é consideravelmente maior do que no hemisfério Sul.

Uma análise dos resultados obtidos demonstrou que o comportamento sazonal do conteúdo eletrônico, para um período de baixa atividade solar concorda, aproximadamente, com os valores de CET vertical encontrados por Titheridge (1973), através do método de rotação Faraday. As diferenças observadas nos valores do conteúdo eletrônico estão, provavelmente, relacionadas à contribuição do conteúdo eletrônico plasmasférico nas medidas obtidas a partir das observáveis do GPS, à influência do atraso instrumental diferencial dos satélites e receptores do GPS e às diferenças nas latitudes magnéticas das estações analisadas. Algumas vezes, devido à órbita dos satélites GPS, o número de dados existentes ao longo de uma determinada longitude não é suficiente para uma boa representação da variação latitudinal do conteúdo eletrônico. Entretanto, apesar do método utilizado na suavização de superfícies não representar corretamente algumas áreas onde não existem dados, foi possível observar a presença dos picos da anomalia equatorial. Os dados do GPS também permitiram observar as variações do CET durante as tempestades magnéticas. Todavia, um estudo mais aprofundado neste assunto exige que uma quantidade maior de dados seja analisada.

Em resumo, o método utilizado na determinação do CET vertical a partir das observáveis do GPS, desenvolvido neste trabalho, apresentou resultados coerentes. Vários estudos poderão ser desenvolvidos a partir desta metodologia, sejam relacionados ao estudo da ionosfera ou ao posicionamento geodésico, onde é necessária a correção dos efeitos da ionosfera.

REFERÊNCIAS

Fraille-Ordóñez, J. M. *Ionospheric total electron content determination from dual frequency GPS measurements for real-time applications in satellite navigation*. SPN, 3/1995.

Jakowski, N. *TEC monitoring by using satellite positioning systems*. In: Kohl, H. et al. ed. *Modern ionospheric science*. Katlenburg-Lindau, European Geophysical Society, 1996. p. 371-390.

Kantor, I. J.; Fedrizzi, M.; Paula, E. R. *Total electron content from GPS measurements over the Brazilian region*. *Latin American Conference on Space Geophysics*, 5., San Jose, Costa Rica, Oct., 1998.

Komjathy, A. *Global ionospheric total electron content mapping using the Global Positioning System*. (Ph. D. dissertation) - University of New Brunswick, New Brunswick, September, 1997. 248 p. (Technical Report No. 188).

Titheridge, J. E. *The electron content of the southern mid-latitude ionosphere*. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, v. 35, p. 981-1002, 1973.

Wrenn, G. L.; Rodger, A. S.; Rishbeth, H. *Geomagnetic storms in the Antarctic F-region: I. Diurnal and seasonal patterns for main phase effects*. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, v. 49, p. 901-913, 1987.

AGRADECIMENTOS

Ao International GPS Service (IGS) pela eficiência e atenção concedidas no período de aquisição dos dados, ao Dr. Steven Musman, da National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) e Dr. Attila Komjathy, da University of New Brunswick, pelo apoio e esclarecimentos, e aos pesquisadores Dr. João Francisco Galera Monico e Paulo de Oliveira Camargo (UNESP), pelas informações e contribuições para o desenvolvimento deste trabalho.