

ANÁLISE DA IONOSFERA USANDO DADOS DE RECEPTORES GPS DURANTE UM PERÍODO DE ALTA ATIVIDADE SOLAR E COMPARAÇÃO COM DADOS DE DIGISSONDAS

Marcelo Tomio Matsuoka¹, Paulo de Oliveira Camargo² e Inez Staciarini Batista³

Recebido em 24 abril, 2009 / Aceito em 17 setembro, 2009
Received on April 24, 2009 / Accepted on September 17, 2009

ABSTRACT. The use of GPS (Global Positioning System) in studies of the Earth's atmosphere has increased significantly in recent years. In this paper, the behavior of Earth's upper atmosphere, called the ionosphere has been studied over a period of high solar activity (year 2001) using data from dual-frequency GPS receivers located in the Brazilian region, belonging to RBMC (Brazilian Network of Continuous Monitoring). Using the GPS data the ionospheric TEC (Total Electron Content) was calculated. Additionally, data of critical frequency of F2 layer were included in the study, derived from Digisondes located in São Luís/MA (3°S; 44°W) and Cachoeira Paulista/SP (22°S; 45°W), Brazil, for comparison purposes. In general, the results showed higher values of TEC during the equinoxes and lower during the winter months. Regarding the daily variation, the lowest TEC values were observed at around 4-6 HL and higher values occurred in the afternoon, with values slightly higher in São Luís. The second peak of the equatorial anomaly was observed at Cachoeira Paulista during the equinoxes and summer months. In most case, the comparison between critical frequency and TEC showed high linear correlation, especially in São Luís.

Keywords: ionosphere, GPS, TEC, digisonde, ionosphere critical frequency.

RESUMO. Cada vez mais é crescente o uso do GPS (*Global Positioning System*) em estudos da atmosfera terrestre. Neste artigo, a atmosfera superior da Terra, denominada ionosfera, foi estudada durante um período de alta atividade solar (ano de 2001) usando dados de receptores GPS de dupla frequência localizados na região brasileira, pertencentes à RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo). A partir dos dados GPS foram calculados os valores de TEC (*Total Electron Content* – Conteúdo Total de Elétrons) da ionosfera. Adicionalmente foram incluídos no estudo dados de frequência crítica da camada F2 advinda de Digissondas localizadas em São Luís/MA (3°S; 44°W) e Cachoeira Paulista/SP (22°S; 45°W), para fins de comparação. De uma forma geral, os resultados mostraram maiores valores de TEC durante os meses próximos aos equinócios e menores durante os meses de inverno. Quanto à variação diária do TEC, os menores valores foram verificados por volta das 4-6 HL (Hora Local) e os maiores durante o período da tarde, com valores um pouco maiores para São Luís. O segundo pico da anomalia equatorial foi verificado em Cachoeira Paulista nos meses próximos aos equinócios e verão. Na maioria dos meses, uma alta correlação linear foi verificada quando realizada a comparação entre os valores de frequência crítica da camada F2 e os de TEC, principalmente para São Luís.

Palavras-chave: ionosfera, GPS, TEC, digissonda, frequência crítica da ionosfera.

¹Laboratório de Pesquisas em Geodésia – LAGEO / Instituto de Geociências / Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Av. Bento Gonçalves, 9500, Cx. Postal 15001, 91501-970 Porto Alegre, RS, Brasil – E-mail: tomio.matsuoka@ufrgs.br

²Programa de Graduação em Ciências Cartográficas – Universidade Estadual Paulista, Rua Roberto Simonsen, 305, 19060-900 Presidente Prudente, SP, Brasil – E-mail: paulo@fct.unesp.br

³Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Av. dos Astronautas, 1758, 12201-970 São José dos Campos, SP, Brasil – E-mail: inez@dae.inpe.br

INTRODUÇÃO

A região da atmosfera superior, constituída principalmente por elétrons livres, que afetam a propagação de ondas de rádio é denominada de ionosfera. Ela está compreendida entre aproximadamente 50 km até 1000 km de altura e a principal fonte de produção de elétrons livres é a radiação solar nos espectros do extremo ultravioleta (EUV) e raios-X (Davies, 1990; Kirchhoff, 1991; McNamara, 1991). Uma onda eletromagnética que atravessa a ionosfera tem a velocidade e direção de propagação alterada, o que caracteriza a ionosfera como um meio dispersivo, onde a velocidade de propagação da onda é uma função do índice de refração do meio (Fedrizzi, 2003).

A ionosfera é uma das principais fontes de erro sistemático no posicionamento com GPS (*Global Positioning System*). O erro devido à ionosfera nas observáveis GPS (medidas de distância satélite-receptor) é diretamente proporcional ao TEC (*Total Electron Content* – Conteúdo Total de Elétrons) presente na trajetória satélite-receptor e inversamente proporcional ao quadrado da frequência do sinal. O conhecimento e o monitoramento da ionosfera na região de interesse são de grande importância para os usuários dos sistemas GPS e de comunicação, principalmente na região equatorial e de latitudes baixas, onde a ionosfera possui um comportamento mais complexo em comparação às outras regiões da Terra.

O estudo do comportamento da ionosfera é tradicionalmente realizado através de equipamentos como a ionossonda/digissonda, o radar de espalhamento incoerente, entre outros (Kirchhoff, 1991). Nos últimos dez anos dados de receptores GPS de dupla frequência têm sido amplamente utilizados para o estudo da ionosfera. Como exemplo de serviços gratuitos dessa natureza pode-se citar os mapas de TEC produzidos e disponibilizados regularmente pelo IGS (*International GNSS Service*) desde 1998 (Feltens & Schaer, 1998; IGSCB, 2009). No Brasil diversas pesquisas nesta linha já foram desenvolvidas nos últimos dez anos (Camargo, 1999; Fedrizzi, 1999; Camargo et al., 2000; Fonseca Junior, 2002; Matsuoka & Camargo, 2003, 2004; Rodrigues, 2003; Veronez, 2004; Aguiar & Camargo, 2006, 2007).

Valendo-se da propriedade dispersiva da ionosfera (o efeito resultante depende da frequência do sinal) pode-se determinar o TEC a partir dos dados coletados com receptores GPS de dupla frequência, para estudar a ionosfera. Com o advento e modernização continuada de redes de estações GPS ativas, cujos dados são disponibilizados gratuitamente aos usuários, os interessados no tema em questão podem ter acesso a um grande volume de dados. No caso brasileiro pode-se citar a RBMC (Rede

Brasileira de Monitoramento Contínuo), implantada há mais de uma década, a qual, juntamente com a RIBaC (Rede INCRA de Bases Comunitárias), constituem a principal fonte de dados, que são disponibilizados gratuitamente pelo IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) e INCRA (Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária).

Neste artigo apresenta-se um estudo do comportamento do TEC na região brasileira equatorial e de latitudes baixas em período de alta atividade solar do ciclo 23 (ano de 2001) usando dados de estações GPS ativas e, os resultados são também comparados com informações de frequência crítica da camada F2 advindas de digissondas localizadas em São Luís/MA e Cachoeira Paulista/SP.

TÉCNICAS DE OBSERVAÇÃO DA IONOSFERA

Ionossonda/digissonda

A ionossonda é o instrumento mais antigo e ainda amplamente usado para a medida de parâmetros ionosféricos (Liu, 2004). Trata-se de um sistema transmissor-receptor que emite pulsos de energia eletromagnética de frequência variável, em seqüência, tipicamente de 1 a 25 MHz (Kirchhoff, 1991). Os sinais emitidos nas diversas frequências, normalmente na vertical, são refletidos pela ionosfera e, em função do tempo decorrido entre transmissão e recepção, obtém-se as chamadas curvas de alturas “virtuais” da ionosfera em função da frequência, que são chamados de ionogramas (Kirchhoff, 1991). As alturas de reflexão dos sinais em função da frequência registradas nos ionogramas são ditas “virtuais”, pois não correspondem às alturas reais em que os sinais foram refletidos. Isto porque as alturas virtuais são obtidas adotando-se a velocidade de propagação dos sinais emitidos igual à velocidade da luz no vácuo. Porém, sabe-se que na ionosfera a velocidade de grupo é menor do que a velocidade da luz no vácuo, devido à presença de elétrons livres. Desta forma, as alturas mostradas nos ionogramas são um pouco maiores do que as alturas reais de reflexão (Liu, 2004).

Um grande número de informações pode ser obtido da análise de um ionograma, sendo essas informações conhecidas como parâmetros ionosféricos (Yamashita, 1999). Dentre os parâmetros ionosféricos obtidos está a frequência crítica das camadas ionosféricas (E, F1, F2), da qual se obtém também a densidade máxima de elétrons das mesmas camadas. Dos ionogramas também são obtidos perfis de densidade de elétrons.

A frequência máxima de uma onda eletromagnética que faz com que esta seja refletida em uma determinada camada ionosférica é denominada de frequência crítica da camada em

questão, e é simbolizada por foE, foF1 e foF2 em referência às camadas da ionosfera (McNamara, 1991). Ou seja, há frequências críticas para todas as camadas da ionosfera. Uma onda com frequência maior que a frequência crítica de uma camada faz com que ela consiga penetrar nesta camada.

O quadrado da frequência crítica é linearmente proporcional à densidade máxima de elétrons da camada considerada, que é usualmente denotada por NmE, NmF1 e NmF2, em referência à densidade máxima de elétrons das camadas ionosféricas E, F1 e F2, respectivamente (Komjathy, 1997). Citando um exemplo numérico, supondo a densidade máxima de elétrons típica para a camada F2 (NmF2) de 10^{12} el/m³, a correspondente frequência crítica (foF2) será de aproximadamente 9 MHz, ou seja, tem-se a seguinte relação (McNamara, 1991):

$$f_oF_2 = 9 \times 10^{-6} (NmF_2)^{1/2}. \quad (1)$$

Ionossondas digitais são equipamentos dotados de maior capacitação diagnóstica da ionosfera devido à tecnologia mais desenvolvida. A digissonda é um instrumento mais moderno e sofisticado do que a ionossonda convencional e fornece, além do perfil de densidade de elétrons, as velocidades de deriva do plasma ionosférico (Yamashita, 1999).

Para um maior aprofundamento sobre ionossondas e as formulações e relações matemáticas envolvidas para a obtenção de parâmetros ionosféricos, pode-se consultar, por exemplo, Davies (1990), Kirchoff (1991) e McNamara (1991). Para maiores detalhes sobre digissondas pode-se consultar, por exemplo, Reinisch et al. (2008).

Sinais GPS

Aproveitando-se da propriedade dispersiva da ionosfera, os sinais GPS operando em duas frequências diferentes podem ser usados para determinar a integral da densidade de elétrons, ou seja, o TEC. O TEC pode ser obtido por uma combinação linear baseada na diferença entre as observações de pseudodistância e/ou fase obtidas de ambas as frequências (L_1 e L_2).

Atualmente, um número cada vez mais crescente de redes GPS equipadas com receptores de dupla frequência de escala local, regional e global têm sido implantadas. Muitas dessas redes têm seus dados disponibilizados publicamente (acesso livre) na internet e via ftp, como por exemplo, a rede global IGS (*International GNSS Service*) (<ftp://cddis.gsc.nasa.gov.br>) e a brasileira RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo) (<http://www.ibge.gov.br>). A acessibilidade e disponibilidade das observações provenientes de redes GPS contribuem para a

formação de uma base de dados sólida para a derivação de conjuntos de dados de TEC em âmbito local, regional e global (Liu, 2004).

Determinação do TEC com GPS

O principal parâmetro que descreve o efeito da ionosfera nos sinais GPS é o TEC. Este parâmetro ionosférico é normalmente apresentado em unidades de TEC (*TECU – TEC Unit*), onde 1 TECU corresponde a 1×10^{16} elétrons/m², sendo que 1 TECU corresponde a um erro na distância medida na portadora L_1 , de 0,16 m e L_2 de 0,27 m (Camargo, 1999).

O TEC pode ser obtido utilizando dados de um receptor de dupla frequência a partir de uma combinação linear entre as observáveis de pseudodistância em L_1 e L_2 ou utilizando as observáveis de fase da portadora em ambas as frequências. Nessas combinações lineares para a obtenção do TEC, os erros que contaminam as observáveis em ambas as frequências da mesma maneira são eliminados, tais como: a refração troposférica, o não sincronismo do relógio do satélite e do receptor, o erro das efemérides e a distância geométrica entre o satélite e receptor. Porém, alguns erros não são correlacionados entre as frequências e, portanto, não são eliminados na combinação linear, influenciando na determinação do TEC. São eles: o atraso instrumental interfrequência do satélite e do receptor; os efeitos de multicaminho e o ruído do receptor.

Para minimizar a influência do atraso instrumental interfrequência do satélite no cálculo do TEC podem ser utilizados os valores fornecidos nas mensagens de navegação transmitidas pelos satélites GPS. Outra opção é utilizar os valores disponibilizados gratuitamente nos arquivos IONEX do IGS. O atraso instrumental interfrequência do receptor pode ser obtido por processos de calibração (Sardón & Zarraoa, 1997) ou por técnicas de modelagem que utilizam dados de receptores GPS de dupla frequência (Komjathy, 1997; Camargo, 1999). Nesta última técnica, também se estima o atraso instrumental interfrequência dos satélites. O atraso instrumental de alguns receptores da rede IGS também é fornecido nos arquivos IONEX do IGS. O efeito de multicaminho pode ser minimizado evitando-se obstáculos próximos à antena e utilizando antenas do tipo *choke ring*, bem como, evitando-se observações de satélites com baixo ângulo de elevação; o ruído do receptor pode ser minimizado utilizando-se receptores que possuam componentes eletrônicos de baixo ruído.

O TEC na direção do satélite (s) ao receptor (r) pode ser obtido utilizando as pseudodistâncias (P_{1r}^s, P_{2r}^s), advindas dos códigos P nas portadoras L_1 e L_2 , a partir da seguinte

combinação linear:

$$TEC_r^s = \frac{f_1^2 f_2^2}{40,3(f_1^2 - f_2^2)} \times [(P_{2r}^s - P_{1r}^s) - \varepsilon_{p21}] \quad (el/m^2), \quad (2)$$

onde f_1 e f_2 representam as frequências das portadoras em L_1 e L_2 respectivamente. O termo ε_{p21} representa a diferença entre L_2 e L_1 dos demais erros sistemáticos não eliminados na combinação linear entre as pseudodistâncias e os erros aleatórios. Estão presentes neste termo o atraso instrumental interferência do satélite e do receptor, os efeitos do multicaminho e os efeitos do ruído do receptor. A desvantagem da utilização das observações de pseudodistâncias é que as medidas do TEC são consideravelmente ruidosas (Jakowski, 1996).

No caso de se utilizar a combinação linear entre as medidas de fase ($\varphi_{1r}^s, \varphi_{2r}^s$), a equação utilizada é:

$$TEC_r^s = \frac{f_1^2 f_2^2}{40,3(f_1^2 - f_2^2)} \times [(\lambda_1 \varphi_{1r}^s - \lambda_2 \varphi_{2r}^s) - (\lambda_1 N_{1r}^s - \lambda_2 N_{2r}^s) - \varepsilon_{\varphi 12}] \quad (el/m^2) \quad (3)$$

onde λ_1 e λ_2 são o comprimento de onda em L_1 e L_2 , respectivamente. O termo $\varepsilon_{\varphi 12}$ representa a diferença entre L_1 e L_2 dos demais erros sistemáticos não eliminados na combinação linear entre as fases e os erros aleatórios. Estão presentes neste termo o atraso instrumental interferência do satélite e do receptor, os efeitos do multicaminho e os efeitos do ruído do receptor. O TEC calculado, tendo como observável a fase da portadora, é influenciado pelas ambigüidades inteiras (N_{1r}^s e N_{2r}^s). A ambigüidade é diferente para cada satélite, para cada passagem do mesmo satélite, e a cada vez que ocorrerem perdas de sinal.

A imprecisão no cálculo do TEC devida à ambigüidade faz com que muitos trabalhos encontrados na literatura denominem o TEC advindo das observações da fase (Eq. 3) como “TEC relativo” (Skone, 1998; Rodrigues, 2003; Liu, 2004), e o advindo da pseudodistância (Eq. 2) como “TEC absoluto” devido à inexistência do termo relativo à ambigüidade. Porém, os valores de TEC calculados pela pseudodistância são aproximadamente 10 vezes ou mais ruidosos do que os obtidos pela fase da portadora (Skone, 1998).

Uma alternativa é utilizar como observável no cálculo do TEC a pseudodistância filtrada pela fase da portadora. Com isto diminui-se consideravelmente o ruído da pseudodistância e, também, não se tem a influência da ambigüidade da fase. Neste

caso a combinação linear utilizada para a obtenção do TEC é a mesma da pseudodistância, apresentada na Equação (2). A formulação matemática empregada para a obtenção da pseudodistância filtrada pela fase pode ser obtida em Hatch (1982), Jin (1996).

A precisão do TEC obtido com a pseudodistância filtrada pela fase é melhor do que 0,5 TECU, após alguns instantes de aplicação do algoritmo de filtragem, com a vantagem de não precisar solucionar a ambigüidade (Matsuoka, 2007). A desvantagem é que a cada perda de sinal, o algoritmo de filtragem deve ser iniciado. Mais detalhes podem se encontrados em Matsuoka (2007).

Nas Equações (2) e (3) o TEC é dado ao longo da direção entre o satélite e o receptor (TEC_r^s). Para fins de padronização e modelagem, usa-se o TEC na direção vertical (zenital) (VTEC – Vertical TEC) no ponto ionosférico que pode ser obtido a partir da multiplicação entre o TEC_r^s e a função de mapeamento geométrica padrão ($\cos(z')$):

$$VTEC = \cos(z') TEC_r^s, \quad (4)$$

onde o valor de z' , que representa o ângulo zenital do caminho do sinal sobre o ponto ionosférico localizado em uma camada de altura média (h_m), é obtido de acordo com a seguinte expressão (Hofmann-Wellenhof et al., 2001):

$$\text{sen } z' = \frac{r_m}{r_m + h_m} \text{sen } z \quad (5)$$

onde r_m é o raio médio da Terra ($r_m \cong 6371$ km), h_m representa a altura média do pico do perfil vertical da densidade de elétrons da ionosfera, que geralmente varia entre 300 e 450 km, e z é o ângulo zenital do satélite ($z = 90^\circ - el$, onde “el” é o ângulo de elevação do satélite). A Figura 1 ilustra as quantidades envolvidas na Equação (5).

Os valores do TEC calculados são obtidos para um ponto na camada ionosférica, denominado de ponto ionosférico. O ponto ionosférico é a intersecção entre o vetor satélite/receptor e a simples camada que representa a ionosfera.

A localização do ponto ionosférico pode ser calculada em função da latitude e da longitude geográfica da estação (receptor), do azimute e do ângulo de elevação do satélite. Desta forma, a latitude e longitude geográfica do ponto ionosférico são calculadas da seguinte forma (El-Gizawy, 2003):

$$\varphi_{PI} = \text{sen}^{-1} [\text{sen } \varphi_r \cos \psi + \cos \varphi_r \text{sen } \psi \cos Az], \quad (6)$$

$$\lambda_{PI} = \lambda_r + \text{sen}^{-1} \left(\frac{\text{sen } \psi \text{sen } Az}{\cos \varphi_{PI}} \right), \quad (7)$$

sendo:

$$\psi = \frac{\pi}{2} - el - \text{sen}^{-1} \left(\frac{r_m}{r_m + h_m} \cos(el) \right), \quad (8)$$

onde:

- ϕ_{PI} e λ_{PI} = latitude e longitude do ponto ionosférico;
- ϕ_r e λ_r = latitude e longitude da estação (receptor);
- el = ângulo de elevação do satélite;
- Az = azimute do satélite;
- r_m = raio médio da Terra; e
- h_m = altura média do pico da camada ionosférica.

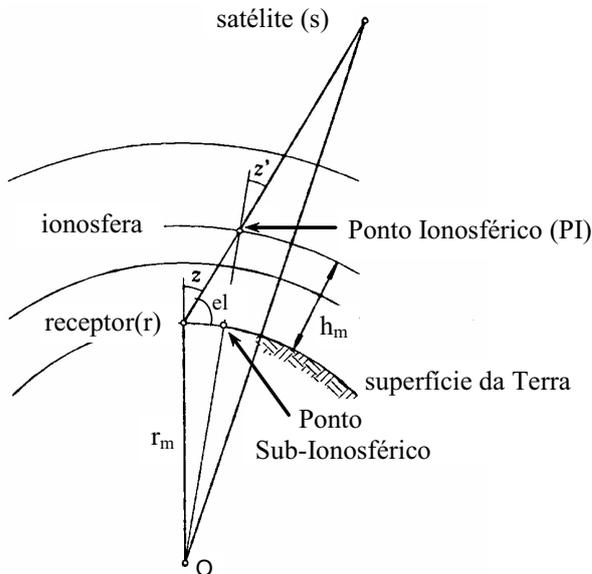


Figura 1 – Geometria da trajetória do sinal GPS na ionosfera. Fonte: Adaptada de Hofmann-Wellenof et al. (2001).

EXPERIMENTOS E RESULTADOS OBTIDOS

O estudo que será apresentado teve como objetivo verificar o comportamento da ionosfera em período de alta atividade solar usando dados GPS e também comparar com resultados advindos de digissondas.

Para realização do estudo foi desenvolvido um aplicativo computacional em Fortran Lahey 95 que calcula os valores do TEC na direção vertical (VTEC), bem como suas respectivas posições (latitude e longitude geográfica dos pontos ionosféricos), utilizando dados GPS de vários receptores de dupla frequência no formato RINEX (*Receiver INdependent EXchange format*). Os valores calculados são organizados em arquivos horários (abrangendo

valores de VTEC calculados em todas as estações no período de 30 minutos antes e 30 após o instante considerado como referência), compondo, um total de 24 arquivos por dia.

Para o cálculo do VTEC foram utilizados os dados GPS da RBMC e da rede IGS da América do Sul abrangendo cinco dias de cada mês do ano de 2001. Os cinco dias de cada mês foram escolhidos com base na atividade geomagnética e correspondem aos cinco dias com menor atividade de cada mês, todos sem influência de tempestades geomagnéticas. As estações GPS da RBMC e do IGS que participaram dos experimentos são mostradas na Figura 2. Os dados da RBMC foram obtidos no *site* do IBGE (<http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/rbmc/rbmc.shtm?c=7>) e os da rede IGS no *site* oficial do IGS (<http://igscb.jpl.nasa.gov>), ambos com disponibilidade gratuita.

Para os mesmos dias dos dados GPS, foram utilizadas no estudo as informações de foF2 (frequência crítica da camada F₂) obtidas de medidas das Digissondas instaladas em São Luís ($\cong 3^\circ\text{S}$; 44°W) e Cachoeira Paulista ($\cong 22^\circ\text{S}$; 45°W), que estão localizadas em regiões próximas do equador geomagnético e do pico (crista) da anomalia equatorial de ionização, respectivamente.

No processamento dos dados GPS para a obtenção dos valores de VTEC foram utilizadas as pseudodistâncias filtradas pelas fases, e na função de mapeamento geométrica padrão (Eq. 4) adotou-se h_m igual a 400 km. Só foram consideradas as observações coletadas com ângulo de elevação maior do que 20° . Os valores do VTEC calculados foram corrigidos da influência do atraso instrumental interfrequência dos satélites e dos receptores. Os valores do atraso instrumental interfrequência dos satélites foram obtidos dos arquivos IONEX produzidos pelo IGS (<ftp://cddisa.gsfc.nasa.gov/gps/products/ionex>). Os atrasos instrumentais interfrequências de cada receptor foram determinados utilizando preliminarmente o aplicativo computacional Mod_Ion (Camargo, 1999) desenvolvido na FCT/UNESP. A partir dos arquivos gerados com o CALTEC foram elaborados mapas regionais do VTEC com o objetivo de analisar e estudar o comportamento da variação espacial, horária e mensal do VTEC na região brasileira.

Os mapas horários do VTEC para cada dia, num total de 5 dias por mês, foram gerados no aplicativo computacional *Golden Software Surfer 7.0*, e o método de interpolação utilizado para a geração da grade (*grid*) foi a krigagem linear (Isaaks & Srivastava, 1989).

Para cada mês foram feitos mapas horários baseados na média dos valores de VTEC dos 5 dias de cada mês. O produto final é um conjunto de mapas horários médios de VTEC para cada

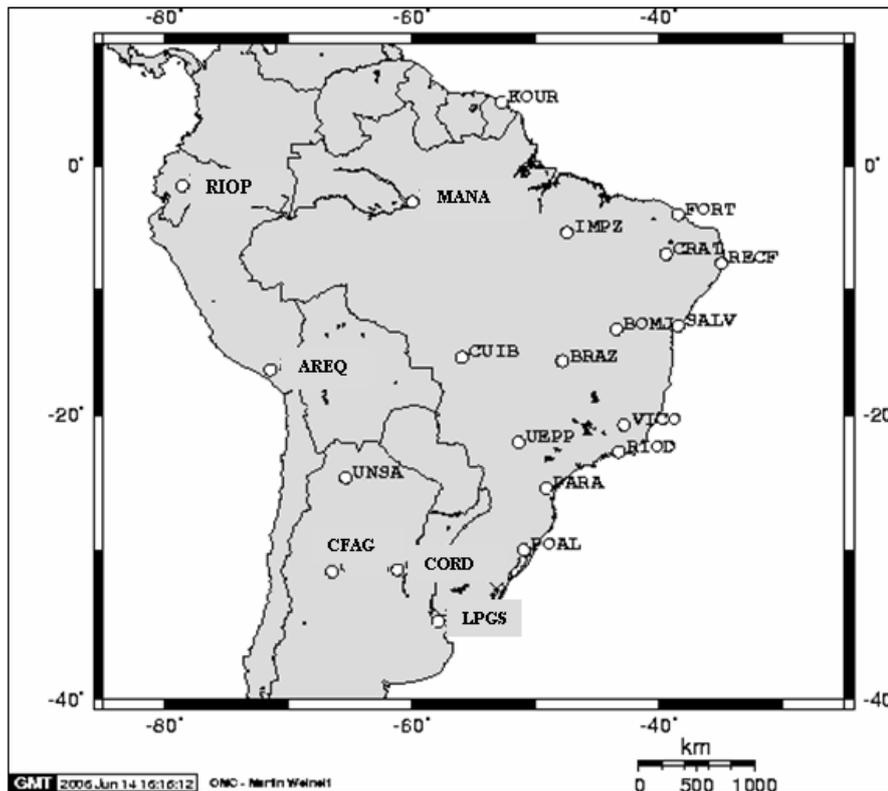


Figura 2 – Estações da RBMC e do IGS que participaram do experimento para a obtenção de mapas de VTEC.

mês de 2001, correspondendo a 24 mapas horários de VTEC por mês e um total de 288 mapas médios de todo o ano de 2001.

Todos os mapas horários médios mensais de VTEC produzidos estão apresentados em Matsuoka (2007, p. 136-159). Eles mostram o comportamento do VTEC condizente com a teoria sobre o assunto. Resumidamente, para todos os meses, verificou-se que o VTEC atinge valores mínimos em toda a região brasileira no período entre 7-9 UT (4-6 HL) e valores máximos próximo às 17-19 UT (14-16 HL). Um destacado segundo máximo nos valores de VTEC foi observado na região de baixas latitudes (crista sul da anomalia equatorial) após o pôr do Sol nos meses próximos aos equinócios de outono e primavera, com destaque aos meses de outubro (principalmente) e março, caracterizando a anomalia equatorial noturna (mais detalhes em Matsuoka, 2007).

Para o presente estudo foram extraídos dos mapas médios mensais de VTEC os respectivos valores referentes às posições das Digissondas de São Luís ($\cong 3^{\circ}\text{S}$; 44°W) e Cachoeira Paulista ($\cong 22^{\circ}\text{S}$; 45°W), para fins de comparação. As Figuras 3 e 4 apresentam os valores médios mensais de VTEC, variando em função da Hora Local (HL), para São Luís (SL) e Cachoeira Paulista (CP).

Observando as Figuras 3 e 4, as análises realizadas anteriormente novamente são evidenciadas (horas diárias de valores máximos e mínimos mensais). Comparando o comportamento do VTEC em SL com o de CP nota-se, no período da tarde, maiores valores de VTEC em SL do que em CP, ou seja, maiores valores na região mais próxima do equador geomagnético. Com destaque, observa-se a presença da anomalia equatorial noturna, mostrando valores maiores de VTEC em CP do que em SL no período após o pôr do Sol, evidenciando a variação latitudinal de VTEC na região brasileira nesse período.

Os gráficos de VTEC (Figs. 3 e 4) mostram que esse parâmetro apresenta um comportamento menos irregular e uma menor variação mensal em SL do que em CP. Em todos os meses praticamente a mesma curva diária dos valores de VTEC em SL é observada, mudando somente a magnitude, com maiores valores nos meses próximos aos equinócios e menores nos próximos ao solstício de inverno. Já em CP a curva dos gráficos de VTEC apresenta maior variabilidade de um mês para outro, resultado principalmente do comportamento no período noturno, em decorrência da formação do segundo pico da anomalia equatorial noturna em alguns meses.

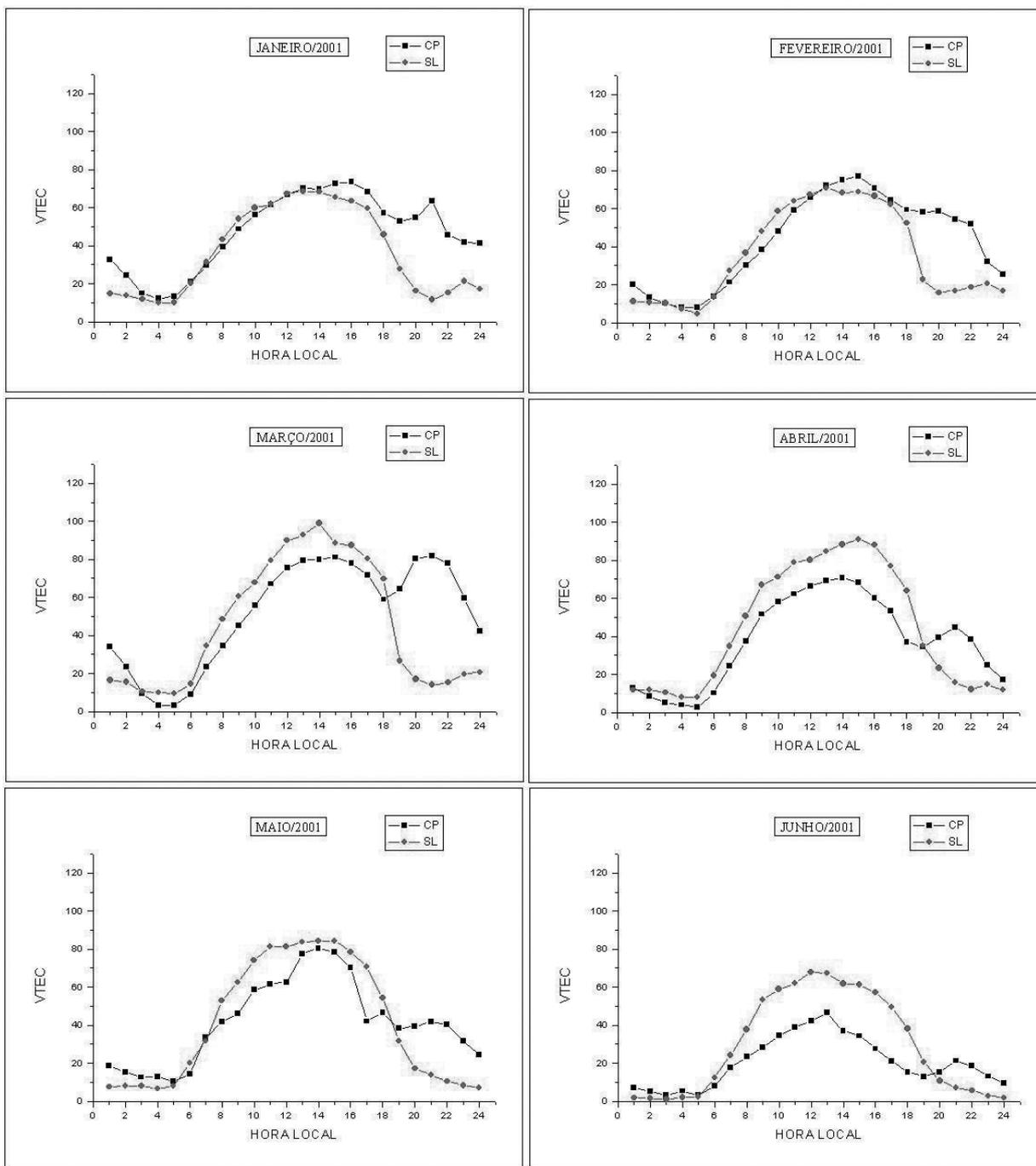


Figura 3 – Valores médios mensais de VTEC para Cachoeira Paulista (CP) e São Luís (SL) – janeiro a junho de 2001.

O comportamento da curva de VTEC de SL é parecido com o que normalmente é visto em modelos ionosféricos e que teoricamente representam melhor o comportamento do VTEC para as regiões geográficas da ionosfera de latitudes médias. Desta forma, observa-se que a região próxima ao equador geo-

magnético apresenta um comportamento da curva de VTEC similar ao da região de latitudes médias, diferindo na amplitude da curva, com maiores valores na região próxima ao equador. Isto evidencia o porquê de alguns pesquisadores subdividirem a região equatorial, discriminando duas regiões: a próxima ao

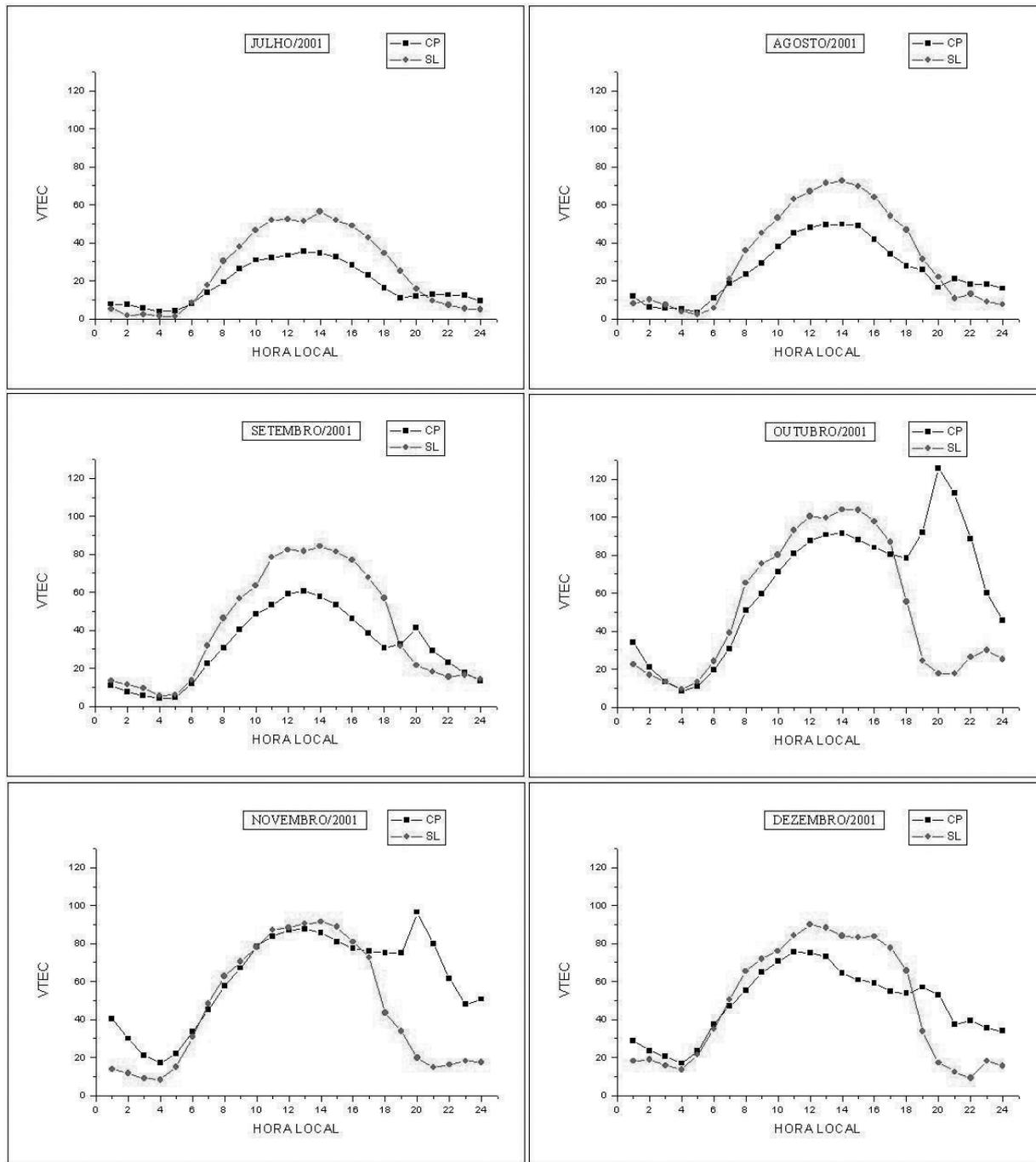


Figura 4 – Valores médios mensais de VTEC para Cachoeira Paulista (CP) e São Luís (SL) – julho a dezembro de 2001.

equador e a de latitudes baixas, onde normalmente ocorre o segundo pico da anomalia equatorial.

Na seqüência, as Figuras 5 e 6 apresentam gráficos de valores médios mensais de foF2 obtidos das digissondas localizadas em CP e SL, operadas pelo INPE. A intenção é comparar a

variação do parâmetro ionosférico foF2 com a variação do VTEC nas regiões próximas ao equador e na de latitudes baixas, verificando uma possível relação entre os dados de VTEC e de foF2, ou seja, entre dois sensores de observação ionosférica: Digissondas e receptores GPS. É importante relembrar que o parâmetro foF2 é

diretamente proporcional à raiz quadrada da densidade máxima de elétrons da camada ionosférica F2. O TEC corresponde ao conteúdo total de elétrons presente em todo o caminho percorrido pelo sinal desde o satélite até o receptor, ou seja, inclui a densidade de elétrons de todas as camadas (D, E, F1 e F2) e, também, da Plasmasfera. Sabe-se também que, na maior parte do tempo, a camada com a maior contribuição aos valores de TEC seja a camada F2, e portanto, é interessante verificar a correlação entre os dois parâmetros ionosféricos, foF2 e VTEC.

Da mesma forma que na análise de VTEC, analisando os gráficos de foF2 mostrados nas Figuras 5 e 6 observa-se que os picos de foF2 são maiores nos meses próximos aos equinócios e menores nos meses próximos ao solstício de inverno. Em todos os meses os menores valores ocorrem nos horários próximos às 4-5 HL, e os maiores valores ocorrem no período da tarde. Quanto aos maiores valores, um segundo máximo ocorre após o pôr do Sol em CP, o que não é observado em SL, gerando uma grande diferença entre as duas localidades. Isto mostra a presença da anomalia equatorial que ocorre após o pôr do Sol, e que também foi identificada anteriormente nos gráficos de VTEC. Da mesma forma, este segundo máximo de foF2 em CP é bastante destacado nos meses próximos ao equinócio e, também, nos meses próximos ao solstício de verão. Por se tratar de um período de alta atividade do ciclo Solar 23, a presença desse segundo pico em CP é observada em todos os meses, porém, com menor intensidade nos meses próximos aos solstícios de inverno (veja, por exemplo, Batista & Abdu, 2004).

A densidade de elétrons da região F e o TEC são maiores nos meses de equinócio do que nos meses de solstício, por causa das variações na composição da atmosfera neutra. A densidade de elétrons na região F é proporcional à razão entre a concentração do oxigênio atômico ($[O]$) e a do nitrogênio molecular ($[N_2]$). Como a taxa $[O]/[N_2]$ é maior nos equinócios, a densidade de elétrons também é maior nestes períodos (Hargreaves, 1992). Densidades maiores nos equinócios, associadas ao vento meridional que favorece o desenvolvimento da anomalia equatorial (dirigido para os pólos, nos dois hemisférios) poderiam contribuir para as altas taxas de variação latitudinal observadas nos equinócios (Hargreaves, 1992).

Continuando a análise das Figuras 5 e 6, pode-se verificar que a curva de foF2 possui menor variação mensal em SL, reflexo da não ocorrência do segundo pico após o pôr do Sol. Basicamente em todos os meses observa-se em SL que, com o início da atividade solar diária por volta das 6-7 HL, os valores de foF2 começam a aumentar gradativamente, mantendo-se bastante estáveis durante o dia; após o pôr do Sol, os valores de foF2

começam a diminuir gradativamente. Em contrapartida, após o pôr do Sol em CP os valores de foF2 aumentam, principalmente nos meses próximos aos equinócios.

É interessante mencionar que nos dados de VTEC o desenvolvimento da anomalia equatorial de ionização (VTEC em CP maior que VTEC em SL) em geral só é evidente após as 18 HL, ao passo que os dados de foF2 em geral mostram o desenvolvimento da anomalia a partir de 12 HL. Duas hipóteses preliminares foram levantadas para explicar esse fato. Poderia ser uma indicação de que durante o dia as outras camadas da ionosfera, D, E e F1, e a Plasmasfera podem ter uma contribuição significativa próximo ao equador, a ponto de não se verificar valores menores de VTEC em SL em comparação a CP. A segunda hipótese é que a parte superior do perfil de densidade de elétrons tenha um decréscimo mais lento sobre a região equatorial, durante o dia, do que sobre a crista da anomalia. Isso representaria uma contribuição extra ao VTEC sobre a região equatorial. Porém, são apenas hipóteses preliminares, merecendo futuras investigações específicas sobre o tema.

Com o objetivo de avaliar a relação entre os dados médios mensais de foF2 e VTEC apresentados anteriormente, realizou-se análise de regressão linear. As Figuras 7, 8, 9 e 10 apresentam gráficos de dispersão entre os valores mensais de VTEC e o quadrado de foF2 para SL e CP, a reta ajustada e o coeficiente de correlação linear (r).

Analisando as Figuras 7 a 10 pode-se verificar de uma forma geral que a maioria dos meses apresentam altos valores de correlação linear entre os dados de foF2 e VTEC. Uma alta correlação linear em todos os meses é verificada principalmente em SL, com um valor médio do coeficiente de correlação linear de 0,93. Para CP uma menor correlação linear é verificada com valor médio de 0,74. Porém, verifica-se uma forte correlação linear, similar ao visto em SL, para os meses de fevereiro, março, abril, maio, junho, julho e agosto, que apresentaram valores maiores de r maiores do que 0,80. Para analisar o quanto da variabilidade dos valores médios mensais de VTEC pode ser explicada pela variabilidade dos valores médios mensais do quadrado de foF2 a partir do modelo de regressão linear ajustado para cada mês (Figs. 7 a 10), calculou-se os valores do coeficiente de determinação (r^2) (Tab. 1).

Analisando a Tabela 1, é possível verificar valores altos de r^2 em praticamente todos os meses para SL, com magnitudes maiores ou iguais a 0,90 para 8 meses do ano. Os menores valores para SL foram obtidos em janeiro (0,64) e fevereiro (0,67). Para CP foram obtidos menores valores quando comparados com SL (exceto para julho), sendo 0,60 o valor médio. Valores maiores

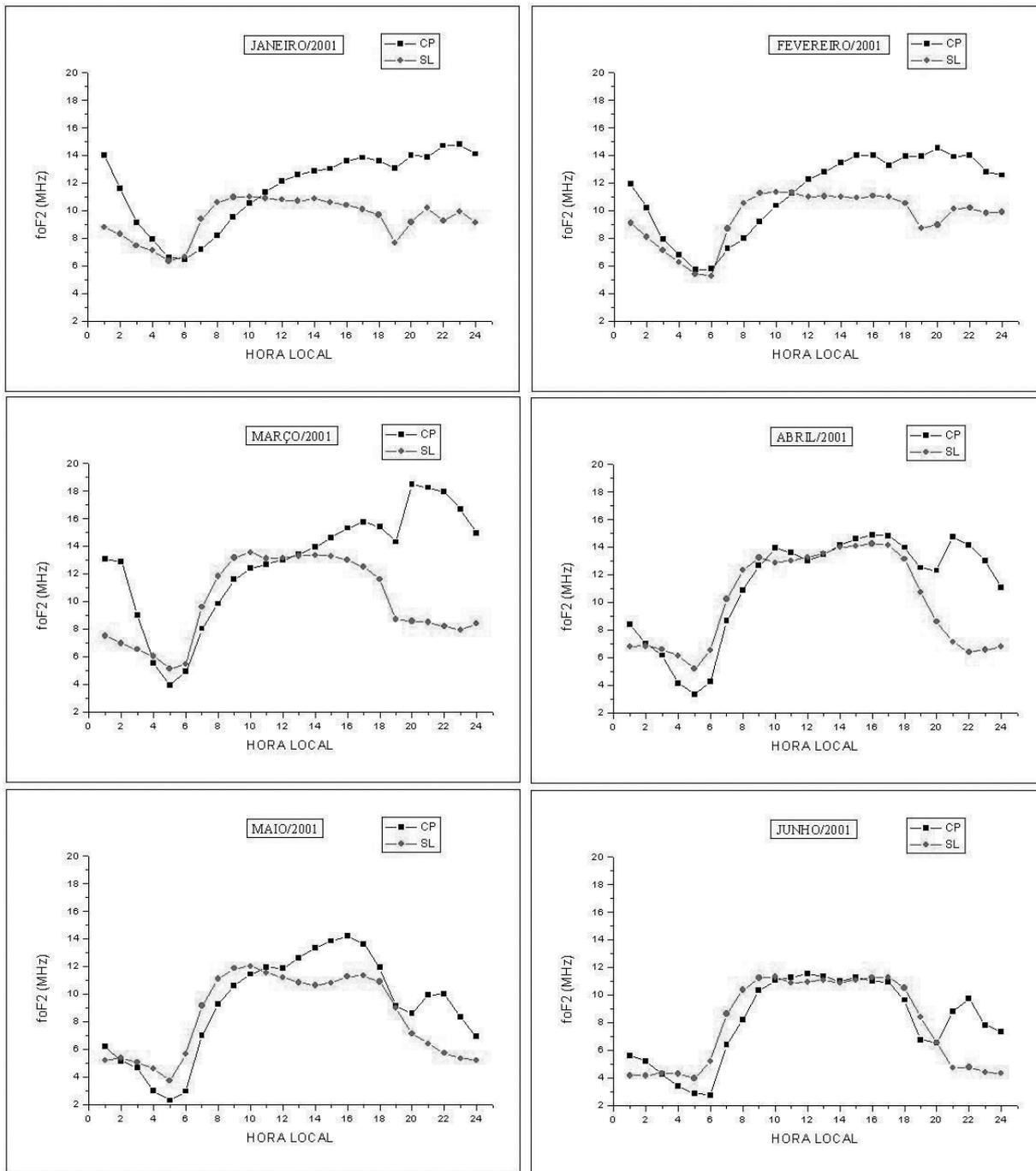


Figura 5 – Valores médios mensais de foF2 para Cachoeira Paulista (CP) e São Luís (SL) – Digissondas – janeiro a junho de 2001.

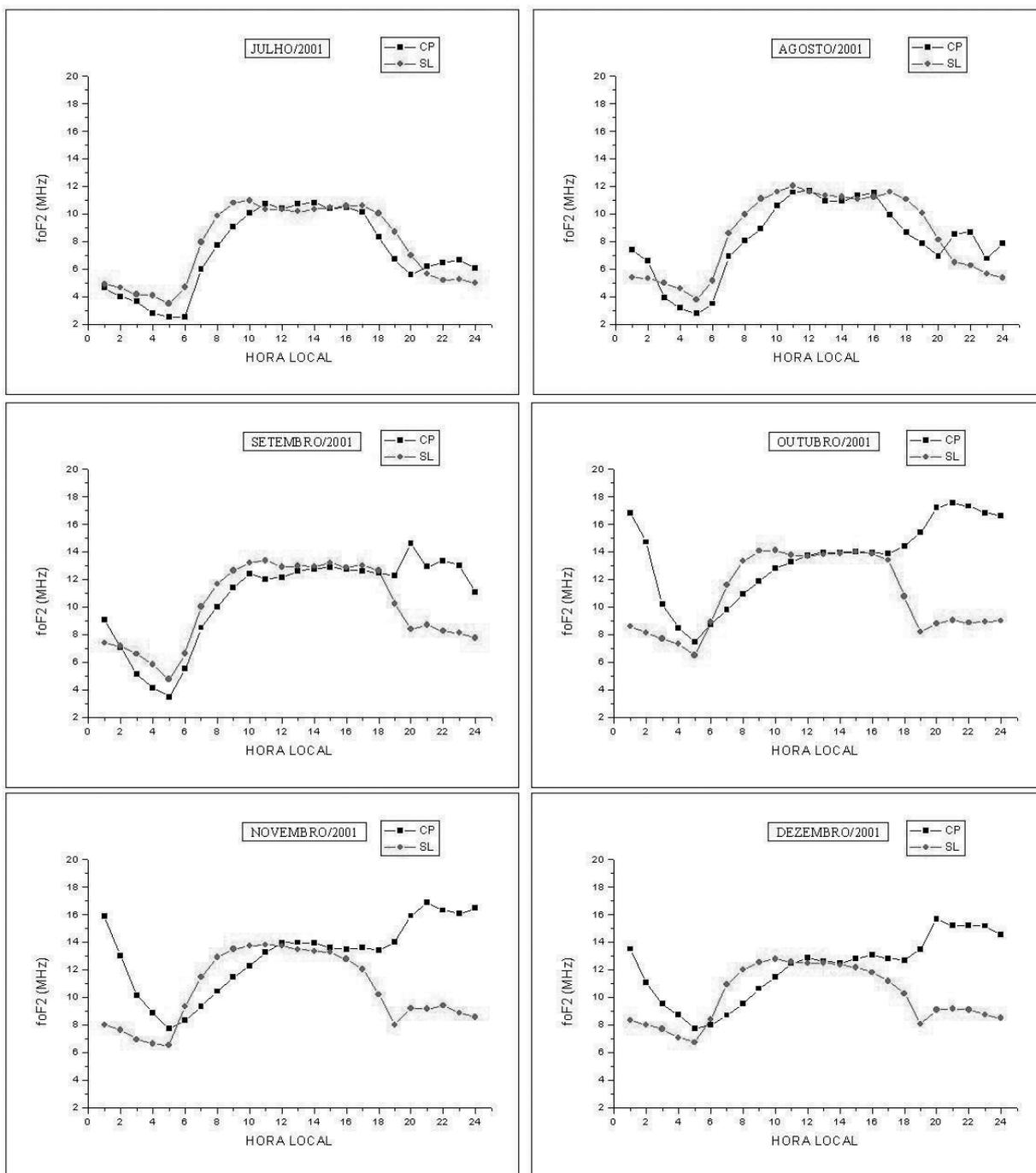


Figura 6 – Valores médios mensais de foF2 para Cachoeira Paulista (CP) e São Luís (SL) – Digisondas – julho a dezembro de 2001.

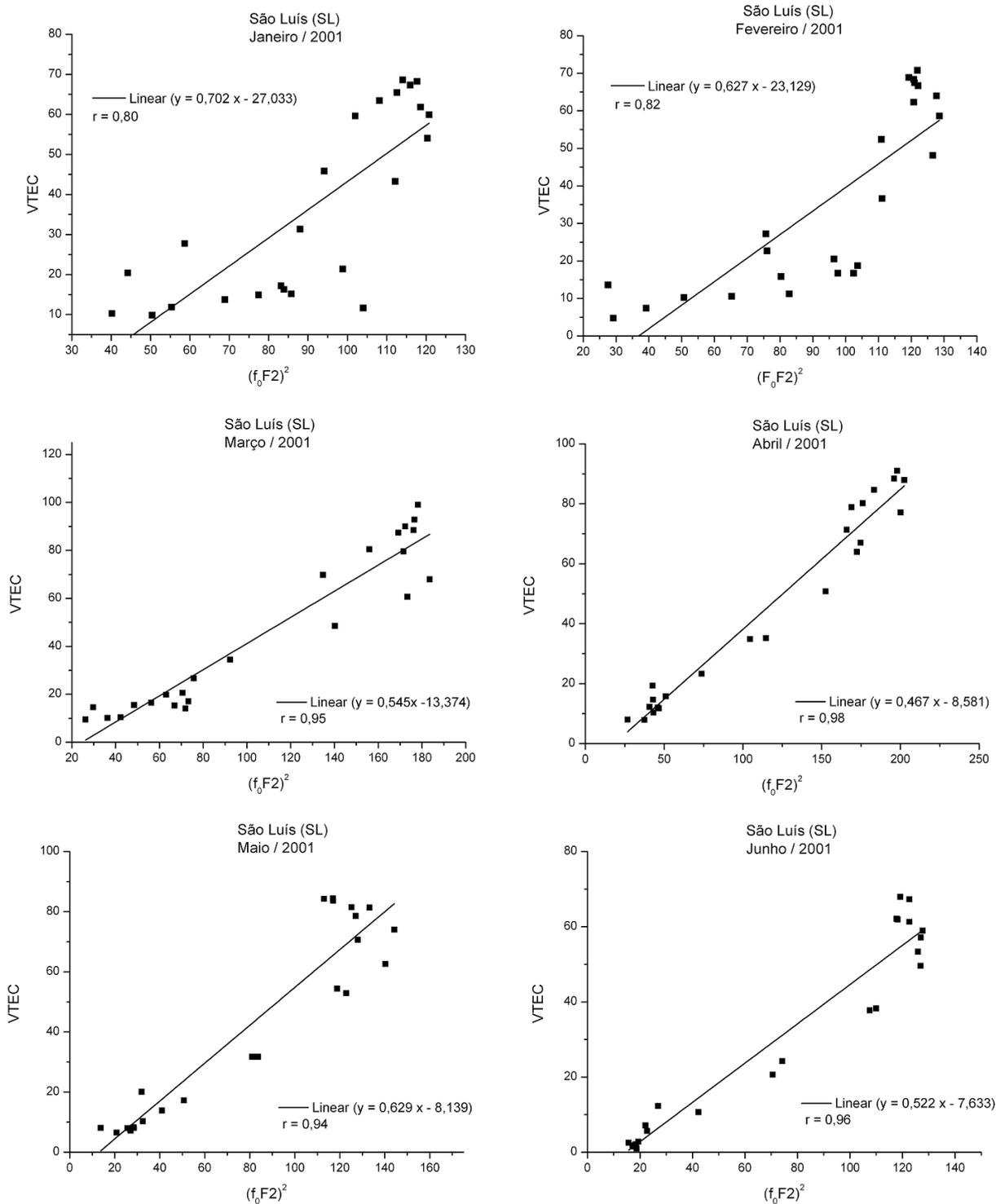


Figura 7 – Gráficos de dispersão entre os valores mensais de VTEC e o quadrado de foF2 para São Luís (SL), a reta ajustada e o coeficiente de correlação linear (r) – janeiro a junho de 2001.

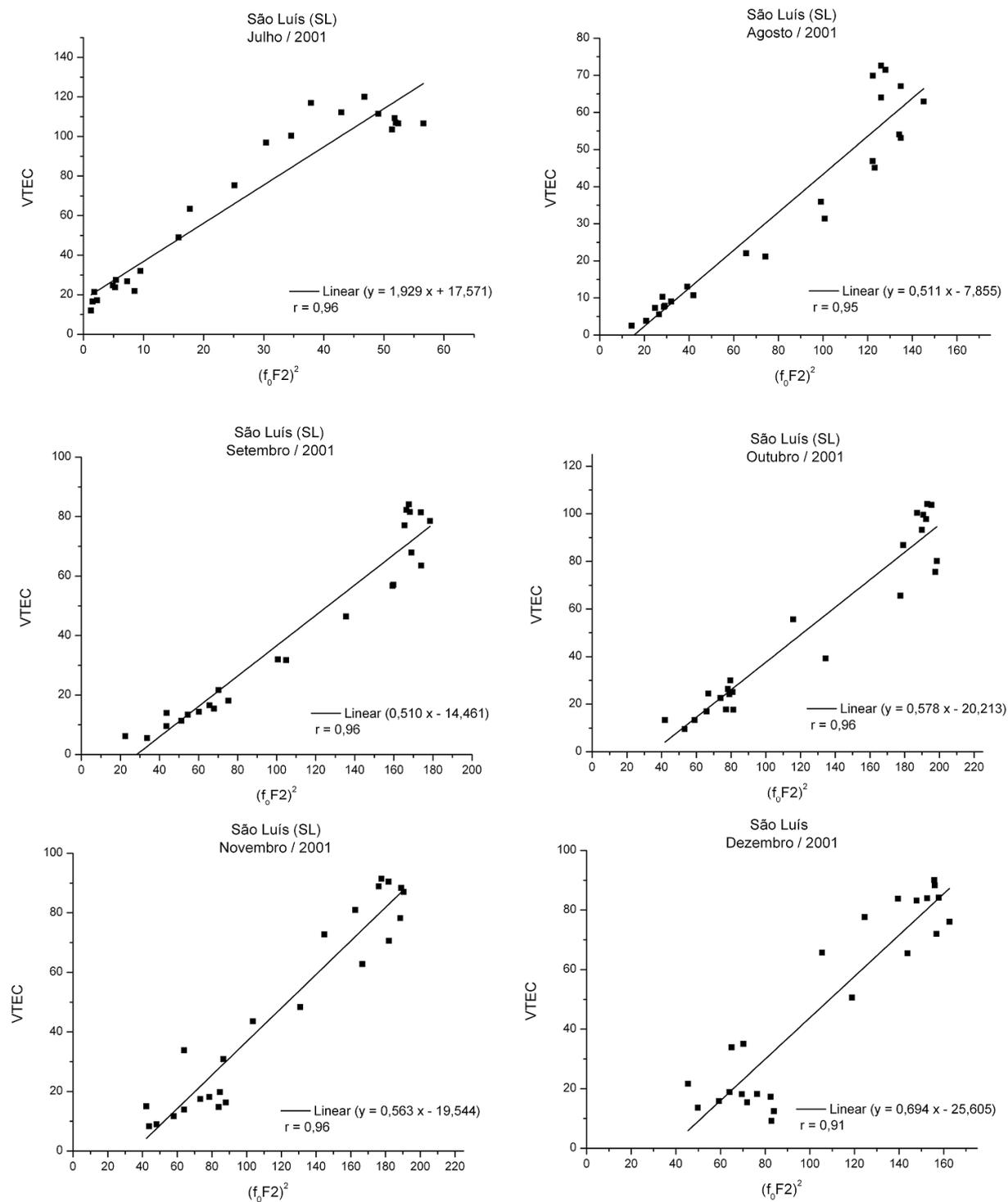


Figura 8 – Gráficos de dispersão entre os valores mensais de VTEC e o quadrado de f_oF2 para São Luís (SL), a reta ajustada e o coeficiente de correlação linear (r) – julho a dezembro de 2001.

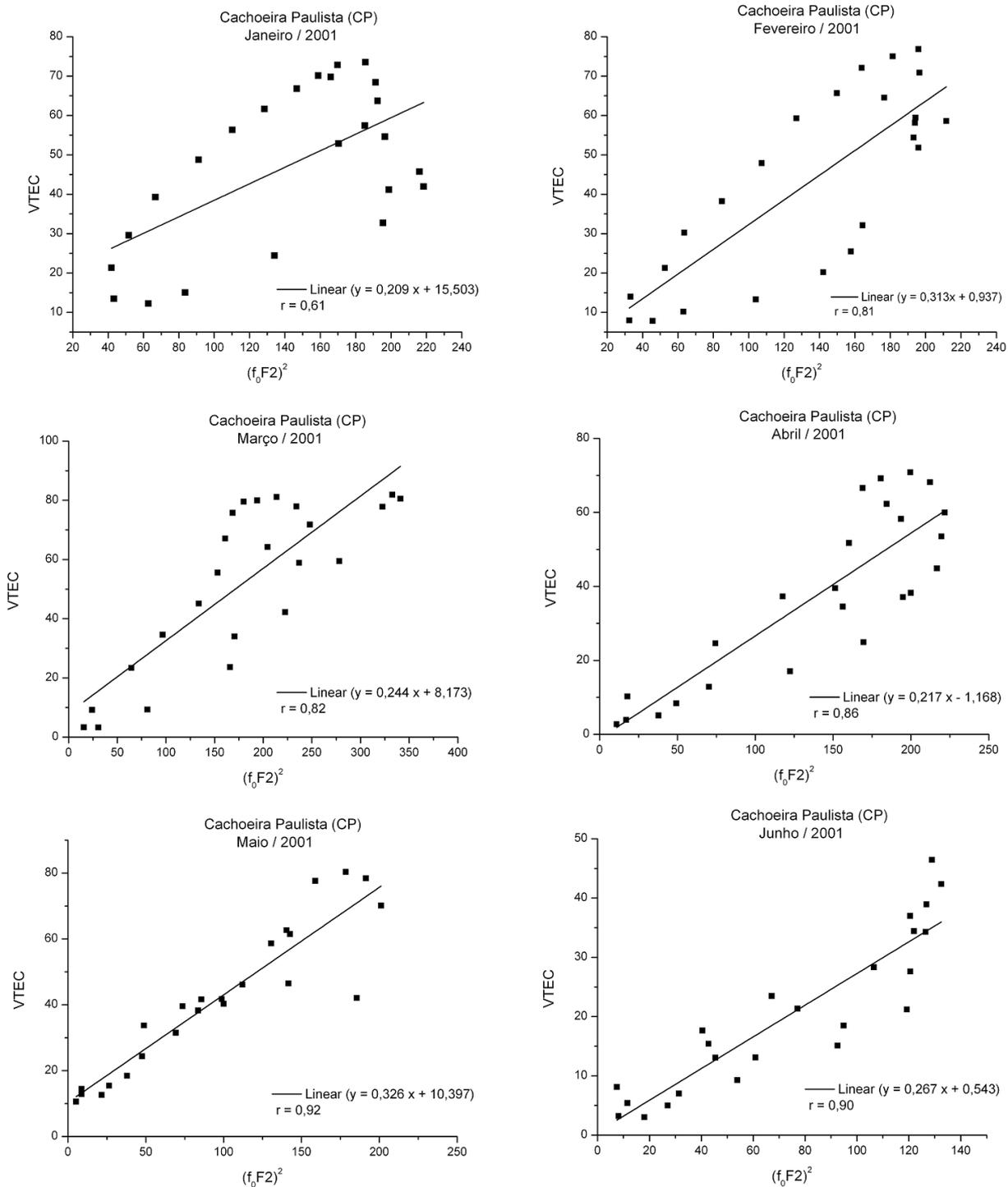


Figura 9 – Gráficos de dispersão entre os valores mensais de VTEC e o quadrado de foF2 para Cachoeira Paulista (CP), a reta ajustada e o coeficiente de correlação linear (r) – janeiro a junho de 2001.

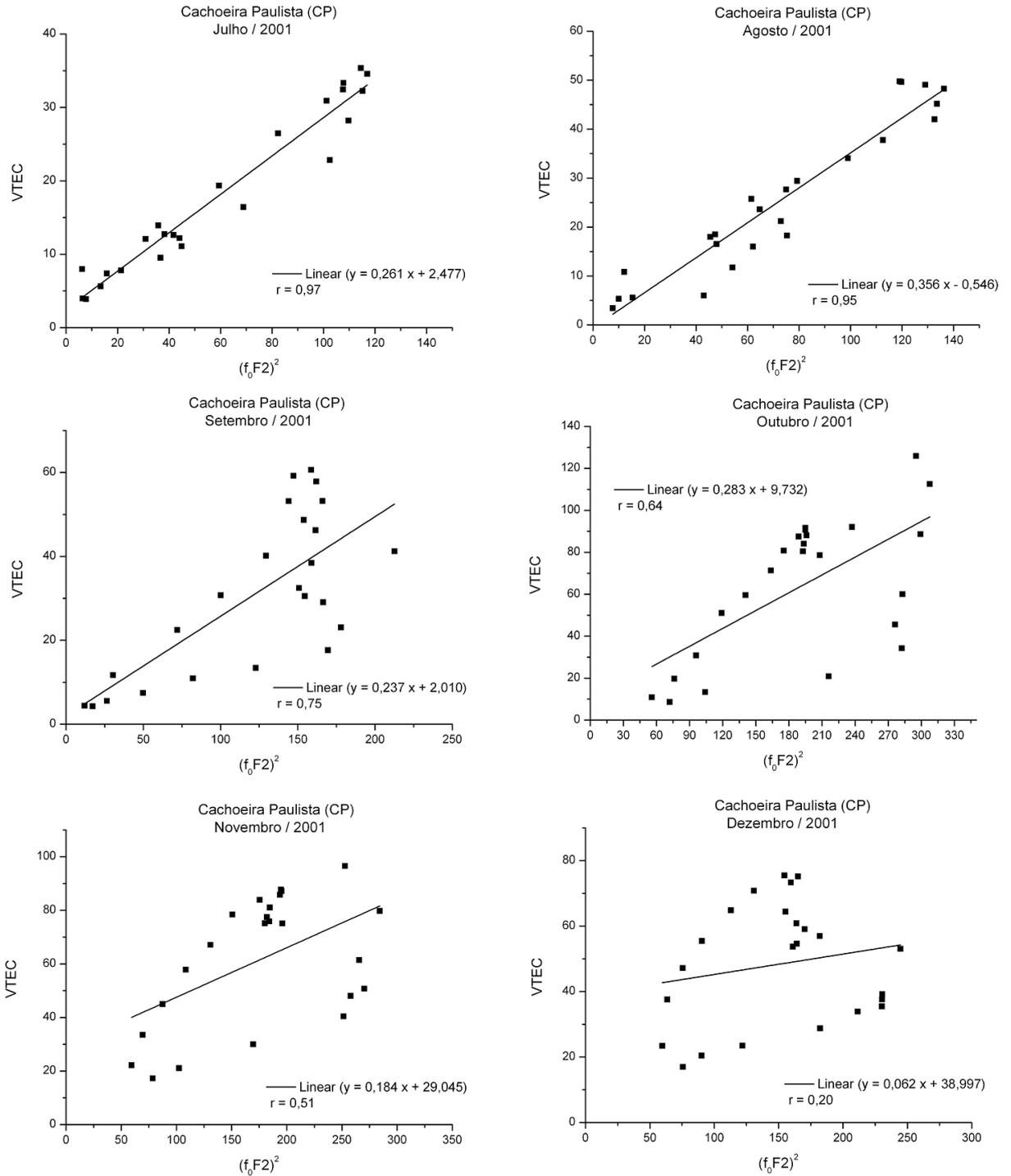


Figura 10 – Gráficos de dispersão entre os valores mensais de VTEC e o quadrado de foF2 para Cachoeira Paulista (CP), a reta ajustada e o coeficiente de correlação linear (r) – julho a dezembro de 2001.

ou iguais a 0,90 somente em julho (0,94) e agosto (0,90), e os valores muito baixos em janeiro (0,37), outubro (0,40), novembro (0,26) e dezembro (0,04).

Tabela 1 – Coeficiente de determinação entre os dados mensais de VTEC advindos de GPS e o quadrado de foF2 advindos de digisondas para SL e CP.

Coeficiente de Determinação (r^2)		
Meses	SL	CP
Janeiro	0,64	0,37
Fevereiro	0,67	0,65
Março	0,90	0,67
Abril	0,96	0,73
Maio	0,88	0,84
Junho	0,92	0,81
Julho	0,92	0,94
Agosto	0,90	0,90
Setembro	0,92	0,56
Outubro	0,92	0,40
Novembro	0,92	0,26
Dezembro	0,82	0,04
Média	0,86	0,60

CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES

Foi investigado o comportamento da ionosfera em período de alta atividade solar (e com atividade geomagnética calma), a partir do parâmetro VTEC, de duas regiões brasileiras: São Luís (próxima ao equador geomagnético) e Cachoeira Paulista (próxima ao pico da anomalia equatorial), utilizando dados GPS de estações ativas da RBMC. Os resultados mostraram estar de acordo com a teoria já conhecida sobre as variações da ionosfera equatorial e de latitudes baixas, evidenciando a potencialidade do uso das estações GPS da RBMC para estudos e monitoramento da ionosfera na região brasileira. De maneira geral, tanto para CP quanto para SL, os resultados mostraram maiores valores de VTEC durante os meses próximos aos equinócios, e menores nos meses próximos ao inverno. Quanto à variação diária, valores mínimos de VTEC foram verificados por volta das 4-6 HL e valores máximos durante o período da tarde, com valores um pouco maiores em SL.

No período após o pôr do Sol, principalmente nos meses próximos aos equinócios, detectou-se a formação da anomalia equatorial, com valores mais altos de VTEC em CP do que em SL, mostrando a alta variação latitudinal do VTEC na região brasileira neste período. A formação da anomalia ocorreu em todos os meses, estando de acordo com a teoria, uma vez que em período

de alta atividade solar espera-se em todos os meses a formação da anomalia equatorial, com maior intensidade nos equinócios e solstícios de verão e menor no inverno.

Adicionalmente foram incluídos no estudo dados de foF2 advindos das digisondas de CP e SL. A comparação entre foF2 e VTEC apresentou, na maioria dos casos, alta correlação linear. Uma forte correlação linear em todos os meses foi observada em SL, com valor médio de coeficiente de correlação linear de 0,93. Para CP uma menor correlação linear foi constatada com valor médio de 0,74, chegando a ter uma forte correlação para os meses de fevereiro, março, abril, maio, junho, julho e agosto, que apresentaram valores maiores do que 0,80.

REFERÊNCIAS

- AGUIAR CR & CAMARGO PO. 2006. Modelagem em tempo real do erro sistemático das observáveis GPS devido à ionosfera. *Boletim de Ciências Geodésicas*, 12(1): 101–120.
- AGUIAR CR & CAMARGO PO. 2007. Comportamento do TEC na região brasileira de baixa latitude usando observáveis GPS. In: *Anais II Simpósio Brasileiro de Geomática e V Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas*, 1: 635–639, Presidente Prudente, SP.
- BATISTA IS & ABDU MA. 2004. Ionospheric variability at Brazilian low and equatorial latitudes: comparison between observations and IRI model. *Adv. Space Res.*, 34: 1894–1900.
- CAMARGO PO. 1999. Modelo regional da ionosfera para uso em posicionamento com receptores de uma frequência. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 191 p.
- CAMARGO PO, MONICO JFG & FERREIRA LDD. 2000. Application of ionospheric corrections in the equatorial region for L1 GPS users. *Earth, Planets and Space*, 52(11): 1083–1089.
- DAVIES K. 1990. *Ionospheric Radio*. London: Peter Peregrinus Ltd., 580 p.
- EL-GIZAWY ML. 2003. Development of an ionosphere monitoring technique using GPS measurements for high latitude GPS users. MSc. Thesis – Department of Geomatics Engineering, UCGE Reports n. 20171, The University of Calgary, Calgary, Alberta, Canada, 161 p.
- FEDRIZZI M. 1999. Observações do conteúdo eletrônico total com dados do GPS. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 142 p.
- FEDRIZZI M. 2003. Estudo do efeito das tempestades magnéticas sobre a ionosfera utilizando dados do GPS. Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 223 p.

- FELTENS J & SCHAER S. 1998. IGS Products for the Ionosphere. In: *Proceeding of the IGS Analysis Centre Workshop*, 1: 225–232, ESA/ESOC, Darmstadt, Germany.
- FONSECA JUNIOR ES. 2002. O sistema GPS como ferramenta para avaliação da refração ionosférica no Brasil. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia de Transportes, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 176 p.
- HARGREAVES JK. 1992. *The solar-terrestrial environment*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 420 p.
- HATCH R. 1982. The synergism of GPS code and carrier measurements. In: *Proceedings of the Third International Symposium on Satellite Doppler Positioning*, 2: 1213–1231, Las Cruces, New Mexico.
- HOFMANN-WELLENHOF B, LICHTENEGGER H & COLLINS J. 2001. *Global Positioning System Theory and Practice*. 5 ed. New York: Springer-Verlag, 382 p.
- IGSCB – International GPS Service Central Bureau. 2009. online – Disponível em: <<http://igscb.jpl.nasa.gov/components/prods.html>>. Acesso em: 01 fev. 2009.
- ISAAKS EH & SRIVASTAVA RM. 1989. *An introduction to applied Geostatistics*. Oxford, New York: Oxford University Press. 592 p.
- JAKOWSKI N. 1996. TEC monitoring by using satellite positioning systems. In: KOHL H, RUSTER R & SCHLEGEL K (Ed.). *Modern ionospheric science*. Katlenburg-Lindau, European Geophysical Society, 1: 371–390.
- JIN XX. 1996. Theory of carrier adjusted DGPS positioning approach and some experimental results. Ph.D. Thesis – Delft University of Technology, Holanda. 163 p.
- KIRCHHOFF VWJH. 1991. *Introdução à geofísica espacial*. São Paulo: Nova Stella, Ed. USP/FAPESP, 149 p.
- KOMJATHY A. 1997. Global ionospheric total electron content mapping using the Global Positioning System. Ph.D. Dissertation – Department of Geodesy and Geomatics Engineering, Technical Report n. 188, University of New Brunswick, New Brunswick, Canada, 248 p.
- LIU Z. 2004. Ionosphere tomographic modeling and applications using global positioning system (GPS) measurements. Ph.D. Thesis – Department of Geomatics Engineering, UCGE Report n. 20198, The University of Calgary, Calgary, Alberta, Canada, 304 p.
- MATSUOKA MT. 2007. Influência de diferentes condições da ionosfera no posicionamento por ponto com GPS: Avaliação na região brasileira. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente/SP, 263 p.
- MATSUOKA MT & CAMARGO PO. 2003. Evaluation of Functions for Modelling of the Effect of the Ionospheric Refraction in the Propagation of the GPS Signals. *Proceedings of the ION GPS/GNSS*, 1: 1736–1741, Portland, Oregon, USA.
- MATSUOKA MT & CAMARGO PO. 2004. Cálculo do TEC usando dados de receptores GPS de dupla frequência para a produção de mapas da ionosfera para a região brasileira. *Revista Brasileira de Cartografia*, 56(1): 14–27.
- McNAMARA LF. 1991. *The ionosphere: communications, surveillance, and direction finding*. Florida: Krieger Publishing Company, 237 p.
- REINISCH BW, GALKIN IA, KHMYROV GM, KOZLOV AV, LISYSYAN IA, BIBL K, CHENEY G, KITROSSER D, STELMASH S, ROCHE K, LUO Y, PAZNUKHOV VV & HAMEL R. 2008. Advancing digisonde technology: the DPS-4D. In: *Radio Sounding and Plasma Physics*, AIP Conference Proceedings, 974: 127–143.
- RODRIGUES FSR. 2003. Estudo das irregularidades ionosféricas equatoriais utilizando sinais GPS. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 151 p.
- SARDÓN E & ZARRAOA N. 1997. Estimation of total electron content using GPS data: How stable are the differential satellite and receiver instrumental biases?. *Radio Science*, 32: 1899–1910.
- SKONE S. 1998. Wide area ionosphere grid modelling in the auroral region. Ph.D. Thesis – Department of Geomatics Engineering, UCGE Report n. 20123, The University of Calgary, Calgary, Alberta, Canada, 198 p.
- VERONEZ MR. 2004. Proposta de um modelo regional da ionosfera para redução do efeito sistemático da ionosfera através do método seqüencial de ajustamento. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 205 p.
- YAMASHITA CS. 1999. Efeito das tempestades magnéticas intensas na ionosfera de baixa latitude. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 75 p.

NOTAS SOBRE OS AUTORES

Marcelo Tomio Matsuoka. Possui graduação em Engenharia Cartográfica (2000) e Doutorado em Ciências Cartográficas (2007) pela Universidade Estadual Paulista. Atualmente é Professor Adjunto no Departamento de Geodésia do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Tem experiência na área de Geociências, com ênfase em Geodésia, atuando principalmente nos seguintes temas: análise e modelagem dos efeitos da ionosfera no posicionamento por GNSS, estudos do comportamento da ionosfera com GNSS, análise de séries temporais de coordenadas estimadas com GNSS, confiabilidade interna e externa no ajustamento de observações.

Paulo de Oliveira Camargo. Possui graduação em Engenharia Cartográfica pela Universidade Estadual Paulista (1985), Mestrado (1992) e Doutorado (1999) em Ciências Geodésicas pela Universidade Federal do Paraná e Pós-Doutorado pela Universidad Nacional de La Plata – FCAG (2008). Atualmente é Professor Adjunto do Departamento de Cartografia da Universidade Estadual Paulista. Tem experiência na área de Geociências, com ênfase em Geodésia, atuando principalmente nos seguintes temas: GNSS, Ionosfera, Controle de Qualidade, ajustamento pelos mínimos quadrados.

Inez Staciari Batista. Possui graduação em Física pela Universidade Federal de Goiás (1972), Mestrado (1975) e Doutorado (1985) em Ciência Espacial pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Realizou pesquisa de Pós-Doutorado na Universidade de Boston, USA em 1987. Atualmente é Pesquisadora Titular do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), e presidente da Associação Latino-Americana de Geofísica Espacial e representante brasileira no COSPAR (*Committee On Space Research*). Tem experiência na área de Geociências, com ênfase em Aeronomia, atuando principalmente nos seguintes temas: ionosfera, ionosfera equatorial, ionossonda, *spread* e digissonda.