

**ESTIMATIVA E ANÁLISE DE ÍNDICES DE  
IRREGULARIDADES DA IONOSFERA UTILIZANDO DADOS  
GPS DE REDES ATIVAS**

*Estimation and analysis of the ionosphere irregularities indices using GPS data  
from active networks*

VINÍCIUS AMADEU STUANI PEREIRA  
PAULO DE OLIVEIRA CAMARGO

Universidade Estadual Paulista - UNESP  
Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas  
Departamento de Cartografia  
Rua Roberto Simonsen, 305  
CEP 19060-900 – Presidente Prudente – São Paulo  
vi\_stuani@hotmail.com; paulo@fct.unesp.br

**RESUMO**

As observáveis GNSS (*Global Navigation Satellite System*) são afetadas por erros sistemáticos devido aos elétrons livres presentes na ionosfera. O erro associado à ionosfera depende do Conteúdo Total de Elétrons (TEC – *Total Electron Content*), que é influenciado por diversas variáveis: ciclo solar, época do ano, hora local, localização geográfica e atividade geomagnética. Os receptores GPS (*Global Positioning System*), GLONASS (*Global Orbiting Navigation Satellite System*) e Galileo de dupla frequência permitem calcular o erro que afeta as observáveis GNSS e o TEC. Com a taxa de variação do TEC (ROT – *Rate of TEC*) pode-se determinar índices que indicam irregularidades da ionosfera, permitindo assim fazer inferências sobre o comportamento da mesma. Atualmente é possível realizar estudos dessa natureza no Brasil, devido às diversas Redes Ativas disponíveis, tais como a RBMC/RIBaC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo/Rede INCRA de Bases Comunitárias) e a Rede GNSS Ativa do Estado de São Paulo. A pesquisa proposta visou à estimativa e análise de índices de irregularidades da ionosfera, além de suprir as geociências de informações sobre o comportamento da ionosfera.

**Palavras-chave:** Ionosfera; Índices de Irregularidades da Ionosfera; GNSS; ROT; Redes ativas.

#### ABSTRACT

Observable GNSS (Global Navigation Satellite System) are affected by systematic errors due to free electrons present in the ionosphere. The error associated with the ionosphere depends on the Total Electron Content (TEC), which is influenced by several variables: solar cycle, season, local time, geomagnetic activity and geographic location. The GPS (Global Positioning System), GLONASS (Global Orbiting Navigation Satellite System) and Galileo dual frequency receivers allow the calculation of the error that affects the GNSS observables and the TEC. Using the rate of change of TEC (ROT - Rate of TEC) indices that indicate irregularities of the ionosphere can be determined, allowing inferences about its behavior. Currently it is possible to perform such studies in Brazil, due to the several Active Networks available, such as RBMC/RIBaC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo/Rede INCRA de Bases Comunitárias) and GNSS Active Network of São Paulo. The proposed research aimed at estimating and analysing of indexes of irregularities of the ionosphere, besides supplying the geosciences of information about the behavior of the ionosphere.

**Keywords:** Ionosphere; Indexes of Irregularities of the Ionosphere; GNSS; ROT; Active Networks.

### 1. INTRODUÇÃO

O GNSS (*Global Navigation Satellite System*) é uma das tecnologias mais avançadas que existem atualmente, que impulsionou as atividades relacionadas com posicionamento a partir de observações espaciais e estudos relacionados com a atmosfera neutra e a ionosfera. Os principais exemplos de GNSS são o GPS (*Global Positioning System*), desenvolvido pelo governo Norte-Americano, o GLONASS (*Global Orbiting Navigation Satellite System*), desenvolvido na extinta URSS (União das Repúblicas Socialistas Soviéticas) e hoje sendo de responsabilidade da República da Rússia, e o Galileo, sistema em implementação pela Comunidade Europeia. Há também o sistema chinês Beidou/Compass que se encontra em desenvolvimento. Outros exemplos, além dos citados, que compõem o GNSS são os sistemas aumentados, designados de SBAS (*Satellite Based Augmentation System*), tais como o Norte-Americano WASS (*Wide Area Augmentation System*), o europeu EGNOS (*European Geostationary Navigation Overlay Service*), entre outras iniciativas similares (SEEBER, 1993).

As tecnologias GPS e GLONASS, e futuramente o Galileo e o Beidou/Compass, possibilitam posicionamento absoluto, relativo e diferencial. Com base nas especificações e necessidades de cada usuário do GNSS há a disposição vários modelos de receptores, que podem ser de simples ou dupla frequência e até com três frequências. Em aplicações que exigem alta acurácia devem-se utilizar

receptores de dupla ou mais frequências, mas os de uma frequência ainda são utilizados em trabalhos de engenharia.

É limitado o número de trabalhos que obtêm resultados satisfatórios com receptores de uma frequência, principalmente no posicionamento absoluto. Isso ocorre, pois, os resultados obtidos com esse tipo de receptor são afetados por vários efeitos sistemáticos, no qual se destaca a influência da ionosfera, que por sua vez passou a ser a maior fonte de erro sistemático após a desativação da técnica SA (*Selective Availability*).

A dimensão do efeito sistemático devido à ionosfera no sinal GNSS é diretamente proporcional ao Conteúdo Total de Elétrons (TEC – *Total Electron Content*) da camada ionosférica, ou seja, ao número total de elétrons presente ao longo da trajetória percorrida pelo sinal, e inversamente proporcional ao quadrado da frequência deste sinal.

O problema principal é que o TEC varia no tempo e no espaço, em razão do fluxo de ionização solar, atividade geomagnética, ciclo de manchas solares, ângulo zenital do Sol, estação do ano, hora local, direção do raio vetor do satélite e localização geográfica (LEICK, 1995). Caso o valor do TEC fosse constante, ou tivesse uma variação regular, os efeitos causados pela ionosfera nas observáveis seriam facilmente minimizados.

Devido à ionosfera ser um meio dispersivo, então a partir de receptores de dupla frequência pode-se eliminar o efeito de primeira ordem por meio de uma combinação linear entre as observáveis em  $L_1$  e  $L_2$  (LIN, 1997; SEEBER, 1993), bem como calcular o TEC presente na ionosfera e o erro nas observáveis (pseudodistância e fase de batimento da onda portadora). Para minimizar o efeito da ionosfera no posicionamento absoluto e relativo em regiões com alto gradiente na variação do TEC, os usuários de receptores de uma frequência podem utilizar modelos ionosféricos, sejam eles regionais ou globais (CAMARGO; MONICO; FERREIRA, 2000).

O Brasil dispõe de dados para a realização de estudos desta natureza, uma vez que a Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), órgão gestor do Sistema Geodésico Brasileiro (SGB), estabeleceu a Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC) do Sistema de Posicionamento Global (GPS). A RBMC passou por um processo de modernização e integração com a Rede INCRA de Bases Comunitárias (RIBaC) gerenciada pelo Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária (INCRA) (FORTES et al., 2007), e atualmente, conta com aproximadamente 90 estações de monitoramento contínuo, incluindo as estações da Rede GNSS Ativa do Estado de São Paulo.

O Brasil localiza-se sob a camada ionosférica de baixa latitude, na região equatorial. Nesta região a ionosfera possui características peculiares e que devem ser consideradas para a modelagem e correção do seu efeito. Com os experimentos já realizados (AGUIAR, 2005; DAL POZ; CAMARGO; AGUIAR, 2008; MATSUOKA; CAMARGO; DAL POZ, 2004) verifica-se que é possível, a partir de Redes Ativas, realizar estudos do comportamento da camada ionosférica utilizando

dados GNSS coletados com receptores de dupla frequência. Com esses dados pode-se calcular o TEC, o ROT (*Rate of TEC* – Taxa de Variação do TEC) e gerar mapas da ionosfera, que permitem observar o comportamento espacial e temporal e entender o ciclo de atividades da ionosfera, importantes para a compreensão do clima espacial (INPE, 2013).

O clima espacial tem despertado grande interesse nacional e principalmente internacional. Com o advento de várias missões com o objetivo de estudar o Sol por Sensoriamento Remoto, tais como a missão SOHO (*The Solar & Heliospheric Observatory*) e a STEREO (*Solar TERrestrial RELations Observatory*), houve um maior interesse em entender a influência do Sol e seu impacto no GNSS (DAL POZ, 2010). Há vários centros de pesquisas que fazem previsão do clima espacial: NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*), ESA (*European Space Agency*), NASA (*National Aeronautics and Space Administration*). No Brasil destaca-se o programa EMBRACE (Estudo e Monitoramento Brasileiro do Clima Espacial) de responsabilidade do INPE (Instituto de Pesquisas Espaciais) (INPE, 2013).

A partir dos valores do TEC obtidos dos dados GNSS de redes ativas pode-se determinar, também, diversos índices de irregularidades da camada ionosférica, com base na flutuação de fase, os quais indicam as características e os comportamentos da referida camada, permitindo assim a realização de planejamentos e análises dos resultados dos levantamentos com GNSS. Alguns exemplos de índices:  $I_{ROT}$  (WANNINGER, 1993), ROTI (PI et al., 1997),  $f_p$  e  $F_p$  (MENDILLO; LIN; AARONS, 2000). Há também os índices geodinâmicos, que constituem uma série de dados que visam descrever em escala planetária a atividade geomagnética ou alguns de seus componentes. Segundo Matsuoka (2007), o estudo dos índices geomagnéticos também é importante, pois, tempestades geomagnéticas e tempestades ionosféricas têm as mesmas causas: explosões solares, ejeções de massa coronal (CME – *Coronal Mass Ejection*), HSSWS (*High Speed Solar Wind Stream* – Vento Solar de Alta Velocidade) e SDF (*Sudden Disappearing Filaments* – Desaparecimento Súbito de Filamentos).

Este trabalho visa à estimativa de índices de irregularidade da ionosfera, bem como a respectiva análise, para dois períodos específicos: um de baixa atividade solar (21 de novembro de 2007) e outro de alta atividade solar (28 de outubro de 2003), com índices F10.7 em 67.4 unidades e 270 unidades, respectivamente. O dia 28 de outubro de 2003 apresentou um índice geomagnético  $K_p$  em torno de 4 e uma excursão negativa do índice Dst que oscilou entre 0 e -30 nT, e este dia antecedeu a uma tempestade magnética muito forte quando Dst atingiu -390 nT no dia 30. Já o dia 21 de novembro de 2007 estava na fase de recuperação de uma tempestade magnética fraca, pois,  $K_p$  variou de 4 a 1 e Dst variou de -40 a -30 nT. Portanto, ambos períodos analisados foram magneticamente perturbados, mas com baixa intensidade.

## 2. IONOSFERA, TEC E ROT

### 2.1 A Camada Ionosférica

A ionosfera é a parte ionizada da atmosfera terrestre e está situada numa faixa a partir de, aproximadamente, 50 km de altitude e se estende até uma altitude de 1000 km da superfície da Terra, sendo formada por partículas livres carregadas, ou seja, íons e elétrons (LIN, 1997). Essas partículas são resultantes da ação da radiação solar, devido à absorção dos raios no extremo ultravioleta (EUV) e raios X, pelas partículas neutras. Devido às propriedades de propagação dispersiva da ionosfera para os sinais de rádio, a magnitude deste efeito depende da frequência do sinal (HEISE et al., 2003). Portanto, no momento em que as ondas de rádio na banda L, de sistemas de navegação, viajam através da ionosfera, as mesmas estão sujeitas a um atraso no tempo de propagação e mudanças na fase, amplitude e polarização.

### 2.2 Conteúdo Total de Elétrons (TEC) e Suas Variações

O principal parâmetro que descreve o efeito da ionosfera nos sinais GNSS é o TEC, que representa o número de elétrons contidos em uma coluna que se estende desde o receptor até o satélite, e cuja área da base é unitária ( $1\text{m}^2$ ) (MATSUOKA e CAMARGO, 2004). O TEC é dado em elétrons/ $\text{m}^2$ , e para propósitos de padronização a comunidade científica tem adotado como unidade do TEC a sigla “TECU” (*TEC Unit* – Unidade de TEC), sendo  $1\text{TECU} = 1 \times 10^{16}$  elétrons/ $\text{m}^2$ .

O estado da ionosfera, descrito pela densidade de elétrons, é influenciada por diversas variáveis, tais como: variações temporais, variações da radiação solar, influências da latitude, longitude, campo magnético, dentre outras (LEICK, 1995; MATSUOKA, 2007).

A alteração da densidade de elétrons na ionosfera está relacionada com as variações temporais, que correspondem às variações diurnas, sazonais e ciclos de longos períodos (CAMARGO, 1999; SEEBER, 2003).

As variações diurnas ocorrem, simplesmente, devido à iluminação do Sol, ou seja, a radiação solar. No decorrer do dia a densidade de elétrons depende da hora local, atingindo um valor máximo entre as 12 e 16 horas local (WEBSTER, 1993). Um segundo valor máximo da densidade eletrônica ocorre na região de baixas latitudes entre 21 e 22 horas locais, após o ocaso do Sol, sendo esse valor maior do que o pico que ocorre no período da tarde.

Com relação às variações sazonais, a densidade de elétrons varia durante os meses do ano em uma determinada região, devido ao ângulo zenital do Sol possuir uma variação sazonal (McNAMARA, 1991). Os menores valores de densidade de elétrons ocorrem, aproximadamente, nos meses de solstícios de verão e inverno, e os maiores valores nos meses de março, abril, setembro e outubro (equinócio).

Já as variações de ciclos de longos períodos correspondem a ciclos de, aproximadamente 11 anos e estão relacionadas à ocorrência de manchas solares; o aumento da ionização da camada é proporcional ao número de manchas. Atualmente

o Sol encontra-se no início do “ciclo 24”, e o período de máxima atividade solar deverá ocorrer em 2013-2014, onde haverá um aumento do número de manchas solares e conseqüentemente um aumento do número de elétrons na ionosfera.

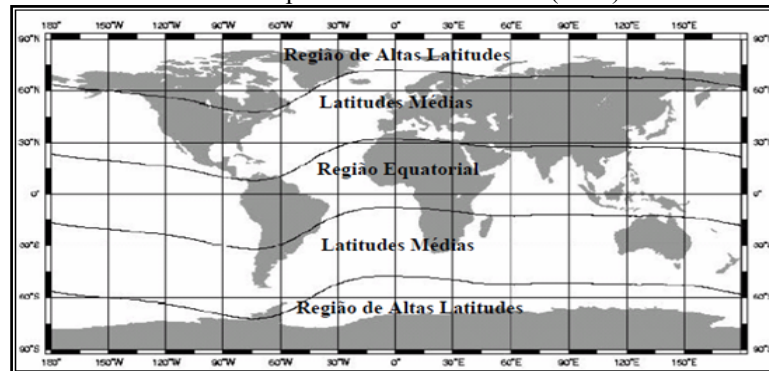
A variabilidade da quantidade de emissão da radiação ultravioleta e dos raios-X emitidos pelo Sol provoca um efeito no nível de ionização da atmosfera terrestre, com períodos que vão de alguns minutos a algumas semanas (WEBSTER, 1993). Devido a essa variação há três tipos de fenômenos: um associado aos eventos solares (explosões solares), outro aos buracos coronais (ventos solares) e um terceiro relacionado às manchas solares. Como exemplos de estudos brasileiros do impacto de explosões solares no posicionamento por GNSS, pode-se citar: Matsuoka, Camargo e Batista (2006) e Ruviano, Matsuoka e Camargo (2013).

O campo geomagnético terrestre é responsável por exercer uma grande influência na variação da densidade de elétrons. O mesmo controla o deslocamento das partículas ionizadas na ionosfera. Portanto, qualquer perturbação no campo geomagnético resulta em modificações nas condições de transporte do meio ionizado. As variações mais comuns percebidas são aquelas produzidas pelas correntes elétricas que fluem na parte inferior da ionosfera. Podem ocorrer também variações bruscas e intensas, provocadas pelas tempestades solares (KIRCHHOFF, 1991). O impacto de tempestades geomagnéticas no posicionamento por GNSS no Brasil pode ser verificado, por exemplo, em Matsuoka et al. (2013), Salomoni, Matsuoka e Souza (2011) e Matsuoka, Camargo e Batista (2008).

Com relação às regiões geográficas ionosféricas, elas são conhecidas como: regiões de altas latitudes, regiões de médias latitudes e região equatorial (FONSECA JÚNIOR, 2002). A Figura 1 mostra a localização geográfica dessas regiões no globo terrestre. Nesta região equatorial do mapa estão incluídas as regiões de baixas latitudes em que estão as localidades de Recife e Cuiabá, sendo que Santa Maria pode ser considerada estar localizada em latitude média.

Figura 1 – Regiões geográficas da ionosfera.

Fonte: Adaptada de Fonseca Júnior (2002).



A ionosfera sobre os pólos norte e sul, denominadas de ionosfera polar ou de altas latitudes, é extremamente instável (McNAMARA, 1991). A região equatorial é caracterizada por um alto nível de densidade de elétrons, e vários fenômenos ocorrem nessa região. Já as regiões de latitudes médias são consideradas relativamente livres das anomalias ionosféricas (WEBSTER, 1993).

### 2.3 Taxa de Variação do TEC (ROT)

O ROT consiste na taxa de variação do TEC, ou seja, na diferença entre os TEC's obtidos consecutivamente entre duas épocas, dividido pelo intervalo de tempo entre suas determinações:

$$ROT = \frac{TEC_{t_2} - TEC_{t_1}}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta TEC}{\Delta t} \quad (1)$$

Os valores dos ROT's, por sua vez, são utilizados no cálculo de diferentes índices de irregularidades da ionosfera, tais como:  $f_p$ ,  $F_p$ ,  $I_{ROT}$  e  $ROTI$ .

## 3. ÍNDICES DE IRREGULARIDADES DA IONOSFERA

Os índices de irregularidades da ionosfera possuem a função principal de classificar o comportamento da mesma, de acordo com um padrão estabelecido. As estimativas desses índices se baseiam na taxa de variação do TEC (ROT) e na flutuação da fase. Há diversos índices classificatórios da ionosfera, dentre os quais se destacam:  $I_{ROT}$ ,  $ROTI$ ,  $f_p$  e  $F_p$ .

### 3.1 Índice $f_p$

O índice  $f_p$  (*phase fluctuation*) é o valor da mediana dos ROTs para um período de 15 minutos, sendo os ROTs estimados a cada minuto. O índice  $f_p$  é calculado para cada satélite de uma determinada estação, e é sempre maior ou igual a zero. O uso do valor da mediana efetivamente elimina os picos de ruídos. Assim, para diversos satélites/estações ele representa a resolução espacial das irregularidades (MENDILLO; LIN; AARONS, 2000):

$$f_p(n, hr, i) = \text{Mediana} \left[ \frac{\Delta TEC}{\min} \right], \quad (2)$$

onde  $n$  é o número do satélite,  $hr$  é a hora (00-24 UT (*Universal Time* – Tempo Universal)),  $i$  número da seção com duração de 15 minutos dentro de uma hora, ou seja,  $i = 1, 2, 3$  ou  $4$ .

### 3.2 Índice $F_p$

O índice  $F_p$  é calculado para cada estação, para cada hora. Representa o valor médio de  $f_p$  de todos os satélites observados em uma estação dentro de uma hora.  $F_p$

destina-se a retratar o nível geral de irregularidades presentes na vizinhança de uma determinada estação (MENDILLO; LIN; AARONS, 2000):

$$F_p(hr) = \frac{\sum_n^{nsat} \left[ \sum_i^k f_p(n, hr, i) / k \right]}{nsat(hr)} * 1000, \quad (3)$$

onde  $nsat$  é o número total de satélites observados dentro de uma hora e  $k$  é o número de valores  $f_p$  disponíveis dentro de cada hora ( $k = 1, 2, 3$  ou  $4$ ). A constante multiplicativa (1000) é usada para tornar  $F_p$  um índice inteiro.

Um valor  $F_p \leq 50$  representa baixos níveis de irregularidades;  $50 < F_p \leq 200$  significa a presença de irregularidades moderadas, e quando  $F_p > 200$  representa a ocorrência de níveis de irregularidades muito fortes (MENDILLO; LIN; AARONS, 2000).

### 3.3 Índice $I_{ROT}$

Wanninger (1993) foi, aparentemente, o primeiro pesquisador a sugerir que 30 segundos de dados GNSS poderiam ser usados para caracterizar “cintilações da fase” como um diagnóstico de irregularidades ionosféricas. O índice desenvolvido para a taxa de variação do TEC ( $I_{ROT}$ ), calculado para um período de 15 minutos, é dado por:

$$I_{ROT} = 10RMS \left( \frac{\Delta TEC}{\min} \right), \quad (4)$$

onde RMS representa o erro médio quadrático da média da variação do TEC ( $\Delta TEC_i = TEC_i - TEC_{i-1}$ , onde  $i$  representa as épocas  $i=1,2,\dots,n$ ).

Um valor  $I_{ROT} \leq 0,5$  representa baixos níveis de irregularidades;  $0,5 < I_{ROT} \leq 2,0$  significa a presença de irregularidades moderadas, e quando  $I_{ROT} > 2,0$  representa a ocorrência de níveis de irregularidades muito fortes (PEREIRA, 2013).

### 3.4 Índice ROTI

Devido ao fato de que as flutuações em pequena escala não estavam sendo identificadas nos índices já existentes, Pi et al. (1997) sugerem que um índice para a taxa de variação do TEC (ROTI) poderia ser determinado com base no desvio-padrão do  $\Delta TEC/\min$  (ROT), em um intervalo de 5 minutos. A equação para o cálculo do índice ROTI é apresentado a seguir:

$$ROTI = \sqrt{\langle ROT^2 \rangle - \langle ROT \rangle^2}, \quad (5)$$

onde  $\langle \rangle$  representa a média.

Um valor  $ROTI \leq 0,05$  representa baixos níveis de irregularidades;  $0,05 <$



$ROTI \leq 0,2$  significa a presença de irregularidades moderadas, e quando  $ROTI > 0,2$  representa a ocorrência de níveis de irregularidades muito fortes (PEREIRA, 2013).

#### 4. EXPERIMENTOS, RESULTADOS E ANÁLISES

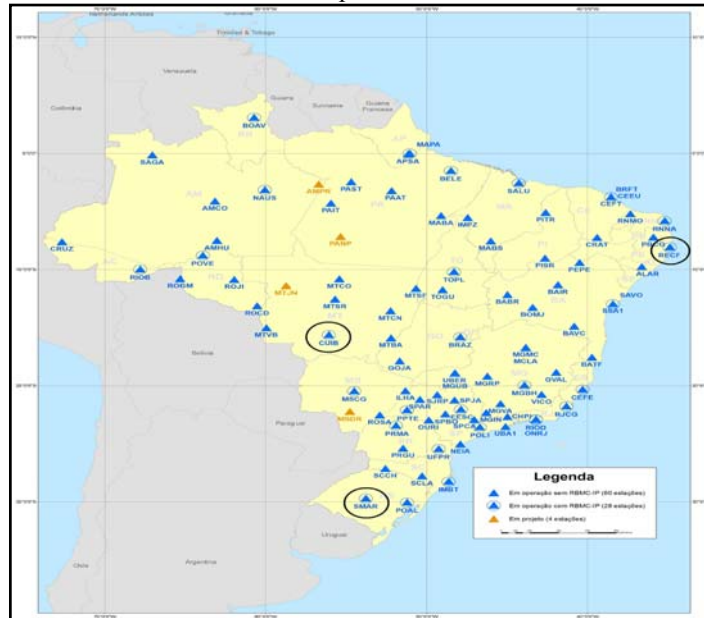
Os valores dos TEC's foram calculados com o modelo ionosférico Mod\_Ion (CAMARGO, 1999; CAMARGO; MONICO e FERREIRA, 2000; CAMARGO, 2009), a partir dos arquivos RINEX (*Receiver INdependent EXchange format*) das estações da RBMC/RIBaC.

A partir dos TEC's foram determinadas as taxas de variações (ROT's), cujos valores, por sua vez, foram utilizados no cálculo dos índices de irregularidades da ionosfera  $f_p$ ,  $F_p$ ,  $I_{ROT}$  e  $ROTI$  (equações (2), (3), (4) e (5), respectivamente).

Foram determinados índices ionosféricos para várias estações das Redes Ativas para dois períodos específicos: um de baixa atividade solar (21 de novembro de 2007) durante a fase de recuperação de uma tempestade magnética fraca ( $K_p$  variou de 4 para 1) e outro de alta atividade solar (28 de outubro de 2003) com  $K_p$  em torno de 4, que foi seguido por uma tempestade magnética muito forte. Para fins de exemplificação, serão apresentados os índices de três estações, sendo duas de baixa latitude (Recife/PE – RECF) e (Cuiabá/MT – CUIB) e outra de latitude média (Santa Maria/RS - SMAR). A Figura 2 apresenta a distribuição geográfica das estações.

Figura 2 – Distribuição geográfica das estações.

Fonte: Adaptada de IBGE.



Um dos motivos da escolha das estações RECF e CUIB é por estarem localizadas em latitudes baixas sob o efeito da Anomalia da Ionização Equatorial (AIE) devido ao efeito fonte. Esta anomalia consiste de duas faixas de alta densidade do plasma ionosférico, localizadas nas regiões tropicais que circulam paralelamente ao equador magnético (RODRIGUES, 2003).

As Figuras 3, 4 e 5 apresentam os ROT e os índices  $F_p$ ,  $I_{ROT}$  e ROTI para o período de baixa atividade solar e as Figuras 6, 7 e 8 os valores do período de alta atividade solar, para as estações RECF, CUIB e SMAR, respectivamente.

Figura 3 – ROT e índices  $F_p$ ,  $I_{ROT}$  e ROTI, Estação RECF, 21/11/2007.

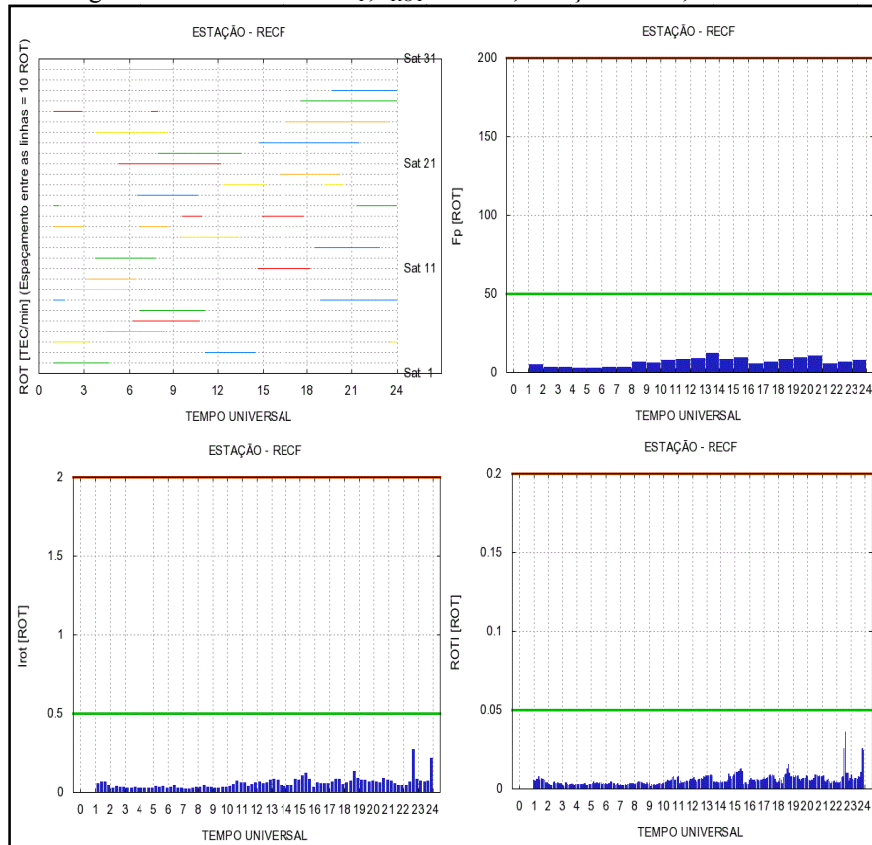


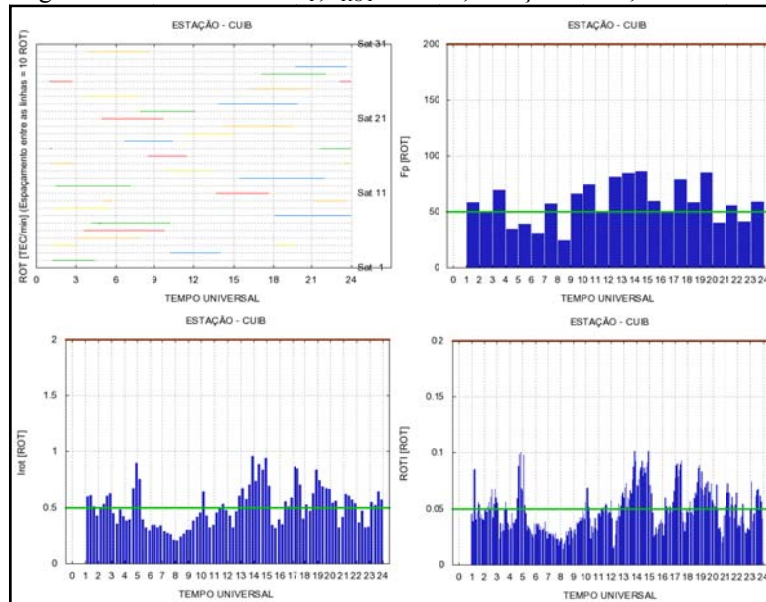
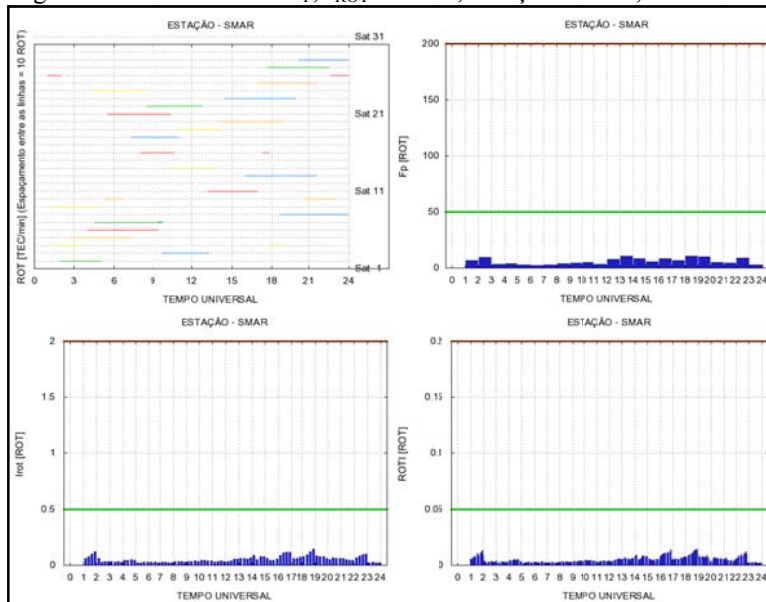
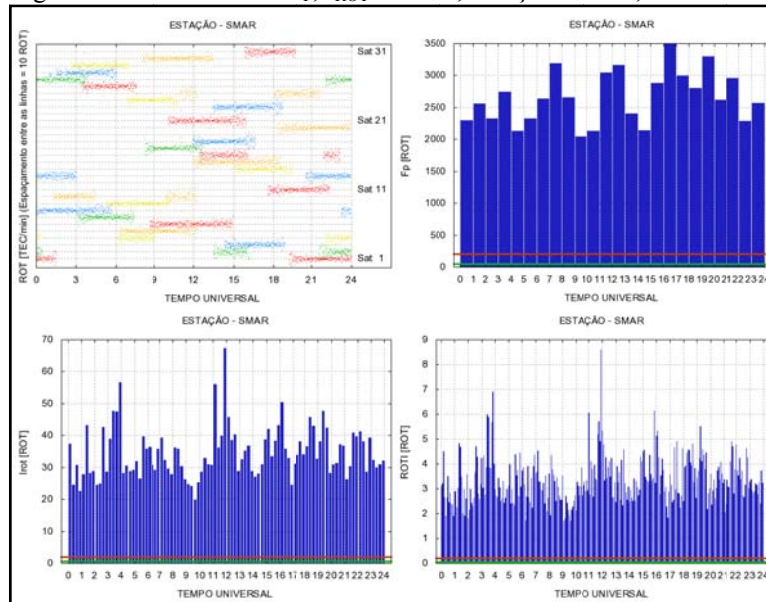
Figura 4 – ROT e índices  $F_p$ ,  $I_{ROT}$  e  $ROTI$ , Estação CUIB, 21/11/2007.Figura 5 – ROT e índices  $F_p$ ,  $I_{ROT}$  e  $ROTI$ , Estação SMAR, 21/11/2007.



Figura 8 – ROT e índices  $F_p$ ,  $I_{ROT}$  e  $ROTI$ , Estação SMAR, 28/10/2003.

Conforme apresentado nas Figuras 3, 4 e 5, para as estações localizadas em latitude baixas e médias, as flutuações de fase (ROT) foram mínimas, devido ser um período de baixa atividade solar, o que acarretou em índices de irregularidades que indicam pouca atividade da ionosfera.

A linha inferior presente nos gráficos indica o limite entre baixos e moderados níveis de irregularidades da ionosfera, ao passo que a linha superior o limite entre os níveis moderados e fortes. Portanto, em relação ao índice  $F_p$ , os valores obtidos para as estações RECF e SMAR não foram superiores a 50, que representam baixos níveis de irregularidades; para a estação CUIB, que provavelmente estava debaixo do pico sul da AIE, os valores variaram de 25 a 75, indicando baixos e moderados níveis de irregularidades. Análise análoga foi realizada para os índices  $I_{ROT}$  e  $ROTI$ , sendo obtidas as mesmas classificações da ionosfera para as estações em estudo.

Já as Figuras 6, 7 e 8 mostram elevadas flutuações de fase, devido ser um período de alta atividade solar que antecedeu a uma tempestade magnética muito forte, que por sua vez gerou índices de irregularidades da ionosfera alarmantes. Em experimentos, Matsuoka, Camargo e Batista (2006) verificaram um aumento no VTEC (*Vertical TEC* – TEC na direção vertical) em toda a região brasileira devido ao aumento do fluxo de radiação eletromagnética decorrente da explosão, o que corrobora com os valores dos índices obtidos. Ainda, segundo Matsuoka, Camargo e Batista (2006), e Ruviano, Matsuoka e Camargo (2013), o aumento do valor do

VTEC foi em escala global, principalmente sobre o continente africano.

A radiação provocada pela explosão solar culminou num aumento da produção de elétrons livres, alterando a variação espacial das cristas da AIE, as quais deram lugar a uma grande quantidade de elétrons livres no equador até as cristas norte e sul (RUVIARO; MATSUOKA e CAMARGO, 2013). As estações RECF e CUIB, por estarem localizadas próximas a crista Sul, apresentaram os maiores valores de índices (Figura 6 e 7) em relação à SMAR (Figura 8).

Com relação ao índice  $F_p$ , os valores obtidos para as três estações foram superiores a 2000, que representam elevados níveis de irregularidades. Já para os índices  $I_{ROT}$  e ROTI os valores foram superiores a 20 e 2, respectivamente, indicando também fortes níveis de irregularidades.

## 5. CONSIDERAÇÕES E CONCLUSÕES

Os índices  $I_{ROT}$  e ROTI representam/detalham melhor as irregularidades da ionosfera do que o índice  $F_p$ , devido ao fato de ambos serem obtidos a partir de períodos de dados menores do que o índice  $F_p$  (para o índice  $I_{ROT}$  o período é de 15 minutos e para o ROTI é de 5 minutos, ao passo que para o  $F_p$  é de 1 hora). Portanto, pode-se verificar que os índices  $I_{ROT}$  e ROTI identificam as flutuações em pequena escala, ao contrário do índice  $F_p$  que retrata um nível geral de irregularidades.

Um dos motivos das estações RECF e CUIB apresentarem valores de  $F_p$ ,  $I_{ROT}$  e ROTI maiores do que a estação SMAR durante a alta atividade solar é provavelmente devido às mesmas estarem localizadas mais próximas do equador magnético. Uma vez determinado os índices de irregularidades da ionosfera para diversas estações, pode-se realizar o planejamento e/ou análise dos resultados dos levantamentos com GNSS.

Foi elaborado o *software* ION\_INDEX, que agrupa todas as rotinas que estimam os índices de irregularidades da ionosfera, bem como também as rotinas que possibilitam a visualização dos gráficos dos mesmos, e também o programa Mod\_Ion, desenvolvido por Camargo (1999), que possibilita o cálculo do TEC. O *software* ION\_INDEX encontra-se disponível para *download* na página do GEGE (Grupo de Estudos em Geodésia Espacial), no *link softwares* (<http://www.fct.unesp.br/#!/pesquisa/grupos-de-estudo-e-pesquisa/gege/software/>).

## AGRADECIMENTOS

Os autores desse projeto agradecem à FAPESP (processos n° 2011/00986-8 e n° 2006/04008-2), pelo apoio financeiro com bolsa de iniciação científica, ao IBGE pelo fornecimento dos dados GNSS, e ao CNPQ (processos n° 309332/2007-9 e n° 482052/2007-4).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, C. R. *Modelo Regional da Ionosfera (Mod\_Ion): Implementação em Tempo Real*. 2005. 159p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-

- Graduação em Ciências Cartográficas, Faculdade de Ciências e Tecnologia da UNESP, Presidente Prudente.
- CAMARGO, P. O. *Modelo Regional da Ionosfera para uso em Posicionamento com Receptores de uma Frequência*. 1999. 191p. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- CAMARGO, P. O. Quality of TEC Estimated with Mod\_Ion Using GPS and GLONASS Data. *Mathematical Problems in Engineering*, v. 2009, Article ID 794578, 16 pages doi:10.1155/2009/794578.
- CAMARGO, P. O.; MONICO, J. F. G.; FERREIRA, L. D. Application of Ionospheric Corrections in the Equatorial Region for L1 GPS Users. *Earth Planets And Space*, Japão, v.52, n.11, p.1083-1089, 2000.
- DAL POZ, W. R. *Investigações Preliminares Sobre a Influência do Clima Espacial no Posicionamento Relativo com GNSS*. 2010. 159p. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, Faculdade de Ciências e Tecnologia da UNESP, Presidente Prudente.
- DAL POZ, W. R.; CAMARGO, P. O.; AGUIAR, C. R. Período de mínima atividade solar: melhora no desempenho do posicionamento relativo. *Boletim de Ciências Geodésicas*, v.14, n.1, p.35-54, 2008.
- DAVIES, K. *Ionospheric Radio*. London: Peter Peregrinus Ltd., 1990. 580p.
- FONSECA JUNIOR, E. S. *O sistema GPS como ferramenta para avaliação da refração ionosférica no Brasil*. 2002. 176p. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia de Transportes, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- FORTES, L. P. S.; COSTA, S. M. A.; ABREU, M. A.; MOURA JUNIOR, N. J.; DA SILVA, A. L.; LIMA, M. A. A.; MONICO, J. F. G.; SANTOS, M. C. Plano de Expansão e Modernização das Redes Ativas RBMC/RIBaC. *XXIII Congresso Brasileiro de Cartografia*, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2007.
- HEISE, S.; JAKOWSKI, N.; WEHRENPENNIG, A.; REIGBER, C.; LUHR, H. *Initial Results on Ionosphere/Plasmasphere Sounding based on GPS Data Obtained On Board CHAMP*. 2003. Disponível em: <[www.cosmic.ucar.edu/related\\_papers/2003\\_csm1\\_heise.pdf](http://www.cosmic.ucar.edu/related_papers/2003_csm1_heise.pdf)>. Acesso em: 10 fev. 2013.
- INPE. *Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais*. Disponível em: <<http://www.inpe.br/climaespacial/>>. Acesso em: 10 fev. 2013.
- KIRCHHOFF, V. W. J. H. *Introdução à geofísica espacial*. São Paulo: Nova Stella, Ed. USP/FAPESP, 1991. 149p.
- LEICK, A. *GPS Satellite Surveying*, New York: John Wiley & Sons, 1995. 560p.
- LIN, L. S. A Novel Approach to Improving the Accuracy of Real-Time Ionospheric Delay Estimation Using GPS. *Proceedings of The 10th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation - ION GPS-97*, Kansas City, Sept. 16-19, p.169-178, 1997.
- MATSUOKA, M. T.; COLLISCHONN, C.; KLEIN, I.; CAMARGO, P. O.; PEREIRA, V. A. S. Impacto de tempestade geomagnética na ionosfera e no



- posicionamento com GNSS: estudo de caso para 20 de novembro de 2003 na região brasileira. *Boletim de Ciências Geodésicas* (impresso), v.19, n.1, p.14-33, 2013.
- MATSUOKA, M. T.; CAMARGO, P. O.; BATISTA, I. S. Posicionamento por GPS na região brasileira durante a intensa tempestade geomagnética de 29 de outubro de 2003. *Pesquisas em Geociências*, v.35, p.3-19, 2008.
- MATSUOKA, M. T. *Influência de Diferentes Condições da Ionosfera no Posicionamento por Ponto com GPS: Avaliação na Região Brasileira*. 2007. 263p. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, Faculdade de Ciências e Tecnologia da UNESP, Presidente Prudente.
- MATSUOKA, M. T.; CAMARGO, P. O.; BATISTA, I. S. Impacto de explosões solares no comportamento da ionosfera e no posicionamento com GPS na região brasileira: estudo de caso para o dia 28 de outubro de 2003. In: *Boletim de Ciências Geodésicas*, v.12, p.315-334, 2006.
- MATSUOKA, M. T.; CAMARGO, P. O. Cálculo do TEC usando dados de receptores GPS de dupla frequência para produção de mapa da ionosfera para região brasileira. *Revista Brasileira de Cartografia*, v.56, n.1, p.14-27, 2004.
- MATSUOKA, M. T.; CAMARGO, P. O.; DAL POZ, W. R. Declínio do número de manchas solares do ciclo 23: Redução da atividade ionosférica e melhora da performance do posicionamento com GPS. *Boletim de Ciências Geodésicas*, v.10, n.2, p.141-157, 2004.
- McNAMARA, L. F. *The ionosphere: communications, surveillance, and direction finding*. Flórida: Krieger Publishing Company, 1991. 237p.
- MENDILLO, M.; LIN, B.; AARONS, J. The application of GPS observations to equatorial aeronomy. *Radio Science*, v.35, n.3, p.885-904, 2000.
- PEREIRA, V. A. S. *Estimativa, Análise e Disponibilidade de Índices de Irregularidades da Ionosfera Utilizando Dados GPS/GLONASS de Redes Ativas*. 2013. 158f. Relatório (Iniciação Científica), FAPESP – Processo 2011/00986-8, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Presidente Prudente.
- PI, X.; MANNUCCI, A. J.; LINDQWISTER, U. J.; HO, C. M. Monitoring of Global Ionospheric Irregularities Using the Worldwide GPS Network, *Geophysical Research Letters*, v.24, n.18, p.2283-2286, 1997.
- RODRIGUES, F. S. R. *Estudo das irregularidades ionosféricas equatoriais utilizando sinais GPS*. 2003. 151p. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.
- RUVIARO, J. S.; MATSUOKA, M. T.; CAMARGO, P. O. Análise global dos efeitos provocados pela explosão solar de 28 de outubro de 2003 no TEC e no posicionamento por ponto. *Revista Brasileira de Cartografia* (online), v.65, p.211-226, 2013.
- SALOMONI, C. S.; MATSUOKA, M. T.; SOUZA, S. F. Efeitos de tempestades geomagnéticas no posicionamento relativo com GPS na região brasileira:



estudo de caso para 29 de outubro de 2003. *Revista Brasileira de Cartografia* (online), v.63, p.449-459, 2011.

SEEBER, G. *Satellite Geodesy: Foundations, Methods and Applications*. Berlin-New York: Walter de Gruyter, 1993. 531p.

WANNINGER, L. Ionospheric Monitoring Using IGS Data, paper presented at the *IGS Workshop*, Inst. of Geol. Sci., Bern, Switzerland, March 1993.

WEBSTER, I. *A Regional Model for Prediction of Ionospheric Delay for Single Frequency Users of the Global Positioning System*. M.Sc.E Thesis – Department of Surveying Engineering, University of New Brunswick, New Brunswick, Canada, 1993.

(Recebido em março de 2013. Aceito em junho de 2013).