

Avaliação dos efeitos ionosféricos nos sinais GPS e correlação com índices ionosféricos e geomagnéticos**Evaluation of ionospheric effects on GPS signals and correlation with ionospheric and geomagnetic indices**

DOI:10.34117/bjdv6n9-159

Recebimento dos originais: 05/08/2020

Aceitação para publicação: 08/09/2020

Leonardo José LopesPrograma de Pós-graduação em Engenharia Cartográfica do Instituto Militar de Engenharia, Brasil.
E-mail: leonardo.lopes@iff.edu.br**Heloísa Alves Silva Marques**Programa de Pós-graduação em Engenharia Cartográfica do Instituto Militar de Engenharia, Brasil.
E-mail: heloisaalves@ime.eb.br**RESUMO**

A ionosfera é uma das principais fontes de erros sistemáticos que afetam a propagação dos sinais GPS. Os efeitos ionosféricos são classificados em três principais tipos: efeito ionosférico de primeira ordem, efeito ionosférico de segunda ordem e efeito ionosférico de terceira ordem. Tais efeitos são grandezas diretamente relacionadas com o conteúdo total de elétrons (TEC) presente na trajetória percorrida pelo sinal GPS entre o satélite e receptor. Pode ser monitorado, inclusive, por meio das observações GPS. As condições ionosféricas podem ser monitoradas através de índices ionosféricos e geomagnéticos. Investigar a correlação entre os efeitos ionosféricos e os índices de monitoramento ionosféricos torna-se interessante para uma melhor compreensão da interferência desta camada sobre a propagação dos sinais GPS. Os maiores coeficientes de correlação foram observados entre os efeitos ionosféricos de primeira ordem e os índices geomagnéticos. No caso da correlação dos mesmos efeitos ionosféricos com índices de irregularidades ionosféricas, observou-se um comportamento fora do padrão exigindo que novos experimentos sejam realizados. E, por fim, para a correlação dos índices de cintilação com os efeitos ionosféricos observou-se correlação do tipo fraca tanto para o dia com registro de atividade geomagnética calma como para o dia com atividade geomagnética muito intensa.

Palavras-chave: GPS, Ionosfera, Efeitos Ionosféricos.**ABSTRACT**

The ionosphere is one of the main sources of systematic errors that affect the propagation of GPS signals. The ionospheric effects are classified into three main types: first order ionospheric effect, second order ionospheric effect and third order ionospheric effect. Such physics are grandiose related to the electron content (TEC) present in the trajectory traversed by the GPS signal between the satellite and the receiver. It can also be monitored through GPS observations. Ionospheric conditions can be monitored through ionospheric and geomagnetic indices. Investigating asysticism between ionospheric and ionospheric monitoring indices becomes interesting for a better understanding of the interaction of this layer on the propagation of GPS signals. The higher coefficients correlations were observed between the 1st order ionospheric and the geomagnetic indexes. In the case of the application, ionospheric effects with rates of ionizing irregularities, one of the main standards was observed than the other experiments. And, finally, to index the scintillation indexes with the

ionospheric observed with the same frequency for the record of geomagnetic activity calm as for the day with very intense geomagnetic activity.

Keywords: GPS, Ionosphere, Ionospheric Effects.

1 INTRODUÇÃO

Os sinais GNSS (*Global Navigation Satellite System*) sofrem influências das diferentes camadas da atmosfera através da qual atravessam até alcançarem o receptor. Nesse sentido, a ionosfera é uma das camadas responsáveis pelo efeito da refração nestes sinais. Isso se deve, principalmente, ao conteúdo total de elétrons (TEC – *Total Electron Content*) presentes na trajetória do satélite até o receptor. As consequências dessa interferência são avanços ou retardos nas portadoras L1 e L2 e na frequência do código, respectivamente, e por consequência um menor ou maior caminho percorrido pelos sinais (MATSUOKA, 2003).

O TEC não é regular uma vez que sofre variações ao longo do tempo, da atividade geomagnética e da posição geográfica. É possível, por meio das observáveis GNSS, estimar o valor de TEC mesmo que, tal parâmetro, apresente as variações mencionadas (MATSUOKA, 2007).

Os efeitos ionosféricos, por sua vez, são diretamente proporcionais ao TEC. Dessa forma, as estimativas de tais efeitos são realizadas com base nos cálculos das variações de TEC (MATSUOKA, 2007).

As variações do TEC e, portanto, o comportamento da ionosfera, é passível de ser monitorado por meio de diversos índices. Entre eles, pode-se citar três tipos: os índices de irregularidades ionosféricas, os índices de cintilação e os índices geomagnéticos.

Os índices de irregularidades ionosféricas refletem a variação de TEC observada em determinado intervalo de tempo na ionosfera. Já os índices de cintilação monitoram o fenômeno da cintilação de fase ou amplitude sofrida pelo sinal, quando este se encontra em condições adversas da ionosfera, provocando, por exemplo, a perda de sinal. Por fim, os índices geomagnéticos indicam a ocorrência ou não de tempestades geomagnéticas.

Dessa forma, investigar a correlação entre os efeitos ionosféricos e os índices de monitoramento da ionosfera torna-se interessante para uma melhor compreensão da interferência desta camada sobre a propagação dos sinais GPS (*Global Positioning System*), por exemplo.

Assim, neste artigo foram avaliados os efeitos ionosféricos de primeira ordem em sinais GPS e sua correlação com os índices ionosféricos e geomagnéticos. Estudos dessa natureza contribuem para uma melhor análise e avaliação dos efeitos ionosféricos em sinais GPS, além de permitir inferências sobre o comportamento do efeito ionosférico frente a cenários de atividade geomagnética distintos.

2 EFEITOS IONOSFÉRICOS NA PROPAGAÇÃO DOS SINAIS GNSS

Na área da Geodésia, a ionosfera é uma camada constituída por grande quantidade de elétrons livres e íons variando entre, aproximadamente, 50 km e 1.000 km de altura. A sua formação se deve à radiação solar, uma vez que, através da fotoionização é induzida a produção de grande quantidade destes elétrons livres e íons. Trata-se de um meio que, devido a sua alta concentração de elétrons livres, afeta diretamente a propagação de sinais de rádio, inclusive do GNSS, causando dispersão na transmissão destes. Essa dispersão pode ocasionar um atraso na propagação dos sinais, no caso da observável código, ou um avanço se a observável considerada é a fase da onda portadora (DAVIES, 1990).

O principal parâmetro que explica o seu efeito dispersivo é a quantidade de elétrons livres contidos no caminho percorrido pelo sinal. Conhecido como conteúdo total de elétrons, ou ainda, pela sigla TEC, tal parâmetro consiste na quantidade de elétrons livres presentes em uma coluna de seção unitária de 1 m^2 , podendo ser expresso em função do atraso que ocasiona na distância medida, entre satélite e receptor, tanto pelo código ou pela fase nas frequências das portadoras L1 e L2. Portanto, o erro associado à refração ionosférica sobre o sinal GNSS, dependerá diretamente do TEC presente no caminho entre satélite-receptor. As principais variáveis, no espaço e no tempo, que influenciam o valor do TEC nas camadas ionosféricas são: ciclo solar, época do ano, hora do dia, localização geográfica e atividade geomagnética (MATSUOKA, 2007).

A variação do ciclo solar corresponde à ocorrência de manchas solares, isto é, regiões escuras e frias na superfície do Sol. Essas regiões emitem um nível elevado de radiação ultravioleta provocando variação na densidade dos elétrons livres na ionosfera, ou seja, do TEC. As manchas solares acontecem num período a cada 11 anos (McNAMARA, 1991). Quanto à época do ano, a variação do TEC se relaciona com os diferentes valores do ângulo de inclinação dos raios solares. Isso se deve ao movimento translacional da Terra em torno do Sol. Durante as quatro estações do ano, diferentes níveis de ionização são lançados à ionosfera. Nesse sentido, os máximos de densidade de elétrons são registrados em meses como Março/Abril e Setembro/Outubro, e os mínimos em Junho/Julho (FONSECA, 2002).

Em relação à hora do dia, durante o período diurno, devido o fluxo de ionização provocado pela radiação solar, as alterações dos valores de TEC são maiores, com máximo acontecendo por volta das 14 horas local e mínimo em torno das 5 horas local. No período noturno, em determinadas regiões da ionosfera, tais alterações desaparecem (MATSUOKA, 2007).

A variação geográfica diz respeito às regiões geomagnéticas em que se encontra inserida uma determinada posição geográfica sobre a Terra. No caso do Brasil, o país está localizado na região geomagnética equatorial, que por sinal, é a região de maior influência das perturbações ionosféricas

causadas por variações na densidade de elétrons livres. Exemplos de fenômenos que afetam a propagação de sinais nestas regiões são: a cintilação ionosférica e a anomalia equatorial e também a ocorrência de bolhas ionosféricas (DAVIES, 1990).

Os efeitos ionosféricos que atuam sobre o sinal GNSS são classificados em três principais grupos, dependendo das variáveis correlacionadas, sendo eles: efeitos ionosféricos de 1ª, 2ª e 3ª ordem. Todos os três efeitos são diretamente proporcionais aos valores de TEC contidos nas trajetórias dos sinais GNSS. Já o de 2ª ordem, além disso, se relaciona com o campo geomagnético da Terra, e por fim, o de 3ª ordem depende da densidade máxima de elétrons. Tais relações de dependência podem ser constatadas, respectivamente, através das seguintes relações matemáticas (ODJIK, 2002):

$$I_{gLi}^{(1)} = \frac{A}{2f_{Li}^2} \int N_e d\rho = \frac{40,3}{f_{Li}^2} TEC \quad (1)$$

$$I_{gLi}^{(2)} = \frac{eA}{f_{Li}^3 2\pi m_e} \int \|B\| |\cos\theta| N_e d\rho = \frac{eA}{f_{Li}^3 2\pi m_e} \|B\| |\cos\theta| TEC \quad (2)$$

$$I_{gLi}^{(1)} I_{gLi}^{(3)} = \frac{3A^2}{8f_{Li}^4} \int N_e^2 d\rho = \frac{3A^2}{8f_{Li}^4} \eta N_{e,max} TEC = \frac{A}{2f_{Li}^2} \int N_e d\rho = \frac{40,3}{f_{Li}^2} TEC \quad (3)$$

sendo:

N_e : densidade de elétrons livres (m^{-3});

e : carga do elétron = $1,60218 \times 10^{-19}$ (C);

m_e : massa do elétron = $9,10939 \times 10^{-31}$ (kg);

ϵ_0 : permissividade do espaço livre = $8,85419 \times 10^{-12}$ (Farad/metro);

B : vetor de indução do campo geomagnético;

η : fator constante = 0,66;

$$A = \frac{e^2}{4\pi m_e \epsilon_0} \approx 80,6 m^3/s^2.$$

Neste artigo será dada ênfase ao estudo do efeito ionosférico de 1ª ordem na propagação do sinal GPS, visto que é o efeito responsável por 99,9% da degradação do sinal GPS (HERNANDEZ-PAJARES, 2010).

3 ÍNDICES DE MONITORAMENTO IONOSFÉRICOS**3.1 ÍNDICES DE IRREGULARIDADES IONOSFÉRICAS**

O monitoramento da ionosfera pode ser realizado por meio de índices calculados em função do conteúdo total de elétrons (TEC) presente na trajetória do sinal GPS. Um exemplo desses índices são os índices de irregularidades ionosféricas. Estes, por sua vez, são obtidos com base na variação da densidade de elétrons livres presentes na camada ionosférica, expressa por meio do *ROT* (*Rate of Change of Total Electron Content*). O *ROT* é a razão entre variação dos valores TEC's obtidos e o intervalo de tempo entre duas épocas consecutivas (Δt), isto é (Pi et al.; 1997):

$$ROT = \frac{TEC_{t_2} - TEC_{t_1}}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta TEC}{\Delta t} \quad (4)$$

O f_p índice f_p (*Phase Fluctuation*) é um exemplo de índice de irregularidade ionosférica. Calculado com base no valor da mediana dos *ROT*'s para um intervalo de tempo de 15 minutos, sendo os *ROT*'s estimados a cada minuto, tal índice pode ser escrito da seguinte forma (MENDILLO et. al., 2000):

$$f_p(n, hr, i) = \text{mediana}|ROT| \quad (5)$$

em que:

n : número do satélite;

hr : hora cheia, de 0 a 24 horas TU;

i : número da seção, com duração de 15 minutos em uma hora cheia, isto é, $i = 1, 2, 3 \text{ ou } 4$.

O segundo exemplo de índice de irregularidade ionosférica é o índice F_p . Baseado no valor médio de índices f_p para todos os satélites rastreados em uma estação no período de uma hora, seu valor reflete o panorama das irregularidades ionosféricas presentes nas adjacências de determinada estação. Matematicamente é expresso por (MENDILLO et. al., 2000):

$$F_p(hr) = \frac{\sum_n^{nsat} |\sum_i^k f_p(n, h, i)/k|}{nsat(hr)} * 1000 \quad (6)$$

sendo:

$nsat$: total de satélites rastreados durante o período de uma hora;

k : número de valores de f_p disponíveis em cada hora ($k = 0,1,2,3$ ou 4);

Um padrão de classificação do índice F_p é fornecido através da Tabela 1:

Tabela 1: Padrão de classificação para o índice F_p .

Valor de F_p	Indicativo de irregularidades
$F_p \leq 50$	Baixos níveis de irregularidades ionosféricas
$50 < F_p \leq 200$	Presença de irregularidades moderadas
$F_p > 200$	Fortes níveis de irregularidades ionosféricas

Fonte: Mendillo *et. al.*, 2000.

Outros dois tipos de índices de irregularidades ionosféricas são: o índice I_{ROT} e o $ROTI$. Enquanto o primeiro reflete a presença de irregularidades ionosféricas baseando-se nas flutuações da fase, o segundo relaciona a taxa de variação do TEC baseando-se no desvio padrão do ROT em um intervalo de tempo de 5 minutos. O I_{ROT} , é o EMQ (Erro Médio Quadrático) do ROT . Introduzido por (WANNINGER, 1993), pode ser escrito da seguinte forma:

$$I_{ROT} = 10 * EMQ(ROT) \quad (7)$$

O seguinte padrão de classificação para o índice I_{ROT} é proposto por (PEREIRA, 2014) e apresentado na Tabela 2:

Tabela 2: Padrão de Classificação para o índice I_{ROT} .

Valor de I_{ROT}	Indicativo de irregularidades
$I_{ROT} \leq 0,5$	Baixos níveis de irregularidades ionosféricas
$0,5 < I_{ROT} \leq 2,0$	Presença de irregularidades moderadas
$I_{ROT} > 2,0$	Fortes níveis de irregularidades ionosféricas

Fonte: Pereira e Camargo, 2014.

Por fim, o índice $ROTI$ foi introduzido por (Pi *et. al.*, 1997), e é obtido por meio da seguinte equação, onde $\langle . \rangle$ consiste no valor da média:

$$ROTI = \sqrt{\langle ROT^2 \rangle - \langle ROT \rangle^2} \quad (8)$$

O padrão de classificação para tal índice segue a seguinte determinação (PEREIRA e CAMARGO, 2014) conforme mostra a Tabela 3:

Tabela 3: Padrão de Classificação para o índice ROTI.

Valor de ROTI	Indicativo de irregularidades
$ROTI \leq 0,05$	Baixos níveis de irregularidades ionosféricas
$0,05 < ROTI \leq 0,2$	Presença de irregularidades moderadas
$ROTI > 0,2$	Fortes níveis de irregularidades ionosféricas

Fonte: Pereira e Camargo, 2014.

3.2 ÍNDICES GEOMAGNÉTICOS

Outra forma de quantificar o comportamento da ionosfera consiste em indicar a ocorrência ou não de tempestades geomagnéticas. Tais tempestades, provocadas por ventos solares e que causam bruscas variações na densidade de elétrons na cama ionosférica, apresentam uma variação sazonal, com máximos em torno dos meses Março/Setembro (equinócios) e mínimos (solstícios) (GONZALEZ, et. al., 1999). Para a análise da possível ocorrência destas tempestades são utilizados os índices geomagnéticos. São exemplos desses índices: o índice Kp, o índice DsT, o índice SYM-H, dentre outros.

O índice Kp (*Planetarische Kennziffer*) descreve a intensidade e duração das tempestades geomagnéticas e são disponibilizados diariamente, pelo NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*). Um padrão classificatório para esse índice é proposto em Wreen et. al., (1987) apud Fedrizzi (2003) e apresentado através da Tabela 4.

Tabela 4: Padrão classificatório do índice Kp.

Atividade Geomagnética	Índice Kp
Muito calma	0 a 1
Calma	1 a 2
Normal	2 a 3
Perturbada	3 a 4
Muito perturbada	4 a 9

Fonte: Wreen et. al., (1987)

O índice Dst (*Disturbance Storm Time*) representa uma série de curvas de medidas realizadas por uma rede de magnetômetros localizados na faixa equatorial, ao longo do globo terrestre. É considerado o índice que melhor define a tempestade geomagnética uma vez que a descreve antes (usualmente denominada fase inicial da tempestade), durante (fase principal da tempestade) e após (fase de recuperação) a sua ocorrência (YAMASHITA, 1999). Uma classificação possível para o índice é sugerida por Fedrizzi (1999) conforme mostra a Tabela 5.

Tabela 5: Padrão classificatório do índice DsT .

Classificação da Tempestade Geomagnética	Valor do índice DsT (nanotesla)
Fraca	$-50 < DsT \leq -30$
Moderada	$-100 < DsT \leq -50$
Intensa	$-250 < DsT \leq -100$
Muito Intensa	$DsT \leq 250$

Fonte: Fedrizi, 1999.

Um índice alternativo ao índice Dst é fornecido pelo ISGI (*International Service of Geomagnetic Indices*). Trata-se do índice $SYM-H$ que mede os distúrbios de componentes horizontais simétricos e que, essencialmente, é o mesmo que o índice DsT , porém com resolução temporal diferente. Enquanto o índice DsT é disponibilizado em um intervalo de tempo de 1 em 1 hora (UT), o $SYM-H$ é discretizado de minuto a minuto (UT).

3.3 ÍNDICES DE CINTILAÇÃO

As perturbações quanto aos valores de TEC existentes na camada ionosférica podem provocar bruscas flutuações na amplitude do sinal GNSS, bem como na fase. Tais variações refletem, respectivamente, as cintilações de amplitude e as cintilações de fase. Ambos os fenômenos também podem ser caracterizados por meios de índices. São os chamados índices de cintilação, ou ainda, índices atmosféricos. Os mais comuns são: índice $S4$ (cintilação de amplitude) e o σ_ϕ (desvio-padrão da cintilação da fase) (CONKER et. al., 2003; WALTER, 2010).

O índice $S4$ baseia-se no desvio-padrão normalizado da intensidade do sinal, podendo ser estimado para o sinal da portadora L1 e L2. O detalhamento de como se chega ao índice $S4$, bem como suas relações matemáticas, podem ser encontrados em (VAN DIERENDONCK et. al., 1993). Além disso, diversas outras referências procuram descrever um padrão classificatório para tal índice. Entre elas: Conker et. al., (2003) e Muella et. al., (2009). O padrão classificatório para o índice $S4$, proposto pelo ITU (*International Telecommunication Union*), é apresentado a através da Tabela 6.

Tabela 6: Padrão classificatório para o índice $S4$.

Valor do $S4$	Intensidade da cintilação
$S4 \leq 0,3$	Cintilação Fraca
$0,3 < S4 \leq 0,6$	Cintilação Moderada
$S4 > 0,6$	Cintilação Forte

Fonte: ITU.

O índice σ_ϕ quantifica as cintilações de fase. Estudos feitos por Walter (2010) constataram que fortes cintilações de fase e de amplitude podem provocar a perda total de sintonia entre receptor e satélite. Tal índice é coletado para um intervalo de tempo igual a 60 segundos, podendo ser

discretizado em intervalos menores (1, 3, 10, 30 segundos). Um padrão classificatório para o índice σ_ϕ foi proposto por (HEGARTY *et. al.*, 2001) conforme mostra a Tabela 7.

Tabela 7: Padrão classificatório para o índice σ_ϕ .

Valor do σ_ϕ	Intensidade da Cintilação
$0,05rad < \sigma_\phi \leq 0,2rad$	Cintilação Muito Fraca
$0,2rad < \sigma_\phi \leq 0,3rad$	Cintilação Fraca
$0,3rad < \sigma_\phi \leq 0,6rad$	Cintilação Moderada
$\sigma_\phi > 0,6rad$	Cintilação Forte

Fonte: Hegarty *et. al.* 2001

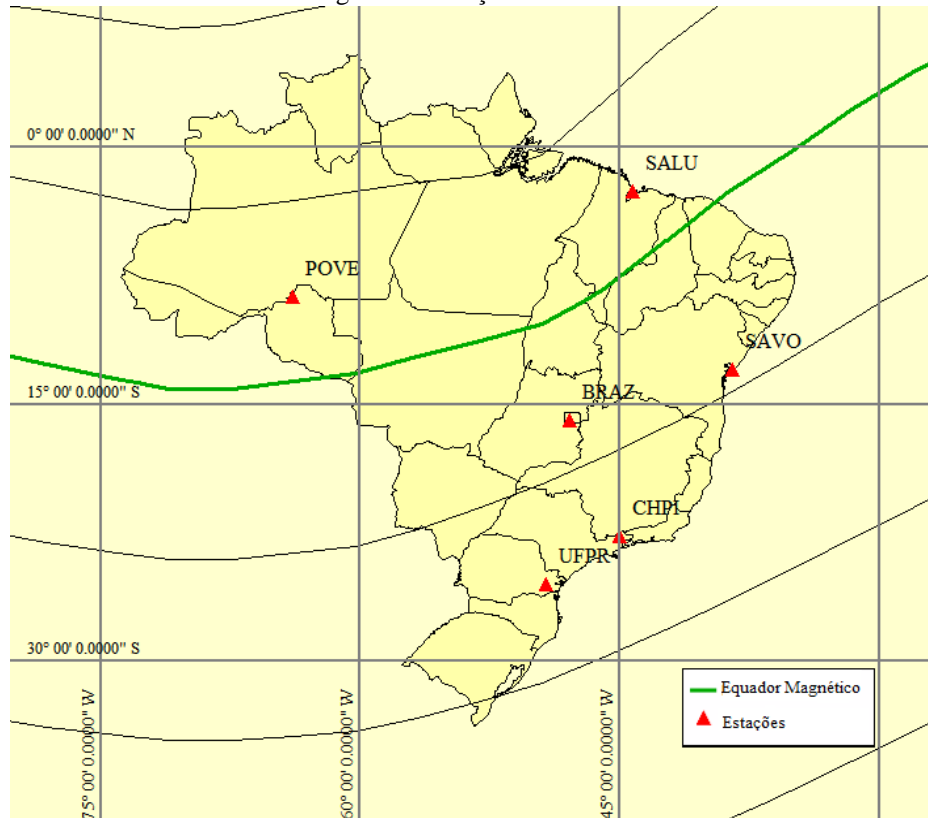
Outros índices de cintilação, alternativos ao índice σ_ϕ são: o S_ϕ (S-Phi) e o σ_{CHAIN} . As abordagens de tais índices podem ser encontradas nas seguintes referências: Fortes (1997) e Mushini *et. al.* (2012).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Com o objetivo de estimar os efeitos ionosféricos de primeira ordem foi utilizado o software RINEX_HO desenvolvido por Marques (2008). Tal ferramenta tem por objetivo calcular os efeitos ionosféricos de ordem superior (2ª e 3ª ordem). Neste artigo, para fins de análise o RINEX_HO foi adaptado para fornecer o efeito ionosférico de 1ª ordem.

Para os experimentos foram utilizados dados GPS de estações pertencentes à RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo) e ao IGS (*International GNSS Service*). Foram escolhidas as seguintes estações: POVE (Porto Velho/RO); SALU (São Luís/MA); BRAZ (Brasília/DF); SAVO (Salvador/BA); CHPI (Cachoeira Paulista/SP) e UFPR (Curitiba/PR). Tal escolha foi baseada de acordo com as latitudes geomagnéticas, abrangendo dessa forma a variação sazonal do TEC, como visto na seção 2, e como mostra a Figura 1.

Figura 1 – Estações utilizadas.



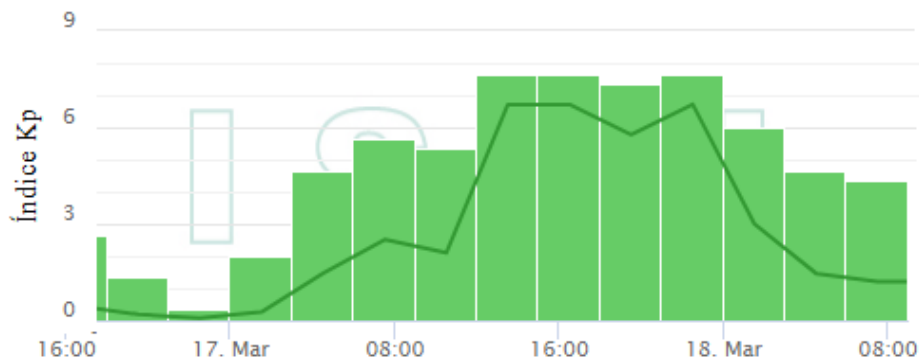
Fonte: Elaborado pelos autores.

Os dados GPS utilizados foram selecionados para dois dias específicos: 17 de Março de 2015 (dia de ocorrência de atividade geomagnética muito intensa) e 17 de Julho de 2015 (dia com atividade geomagnética calma).

Os índices geomagnéticos K_p e D_sT , que indicavam a ocorrência de tempestade geomagnética muito intensa no dia 17 de Março, foram os critérios utilizados para definição das datas citadas anteriormente. Estes índices foram obtidos via *download* no site do ISGI (http://isgi.unistra.fr/indices_asy.php).

A Figura 2 mostra o índice K_p verificado para os dias 15, 16, 17 e 18 de Março de 2015 indicando a ocorrência de tempestade geomagnética muito intensa ao longo do dia 17 de Março, conforme padrão classificatório do próprio índice.

Figura 2 – Índice Kp para os dias 16, 17 e 18 de Março de 2013.



Fonte: Disponível em http://isgi.unistra.fr/indices_asy.php, Acesso dia 12 Janeiro 2019.

Para a obtenção dos índices de irregularidades ($F_p, I_{ROT}, ROTI$) e de cintilação ionosférica (σ_ϕ), referentes às estações em estudo, foram utilizadas as seguintes ferramentas, respectivamente: *ION_INDEX* - desenvolvida por Pereira (2013), *ISMR Query Tool* - desenvolvida por Vani *et. al.* (2017).

Para a interpretação das correlações entre o efeito ionosférico de 1ª ordem e os índices ionosféricos e geomagnéticos foi utilizado o critério de correlação de Pearson, e, o critério de interpretação proposto por Callegari-Jacques (2003) conforme mostra a Tabela 8.

Tabela 8: Critério de interpretação dos coeficientes de correlação.

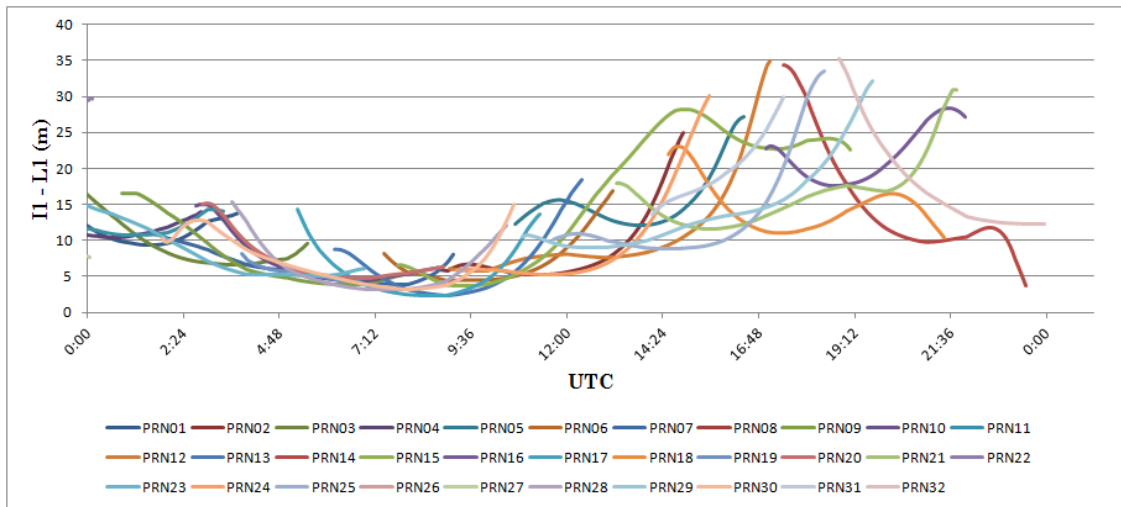
Valor do Coeficiente de correlação (ρ)	Interpretação
$0,00 < \rho < 0,30$	Existe FRACA correlação linear
$0,30 < \rho < 0,60$	Existe MODERADA correlação linear
$0,60 < \rho < 0,90$	Existe FORTE correlação linear
$0,90 < \rho < 1,00$	Existe correlação linear MUITO FORTE

Fonte: Callegari-Jacques, 2003

5 RESULTADOS E ANÁLISES

As séries temporais do efeito ionosférico de 1ª ordem, para os dois dias de dados GPS selecionados, apresentaram crescimento a partir das 09 horas UTC, se estendendo ao longo do período final do dia até por volta das 19 horas UTC, e decrescendo, para a maioria dos satélites, depois disso. Este comportamento pode ser verificado na Figura 3. Tal comportamento se deve ao fato do efeito ionosférico de 1ª ordem ser diretamente proporcional ao TEC, que por sua vez, é maior quanto maior a radiação solar em determinados períodos do dia. Nesse sentido, a variação do TEC ao decorrer do dia, atingindo máximos por volta das 14 horas/15 horas locais (MATSUOKA, 2007), explica a tendência similar entre o efeito de 1ª ordem e os índices de irregularidades ionosféricas.

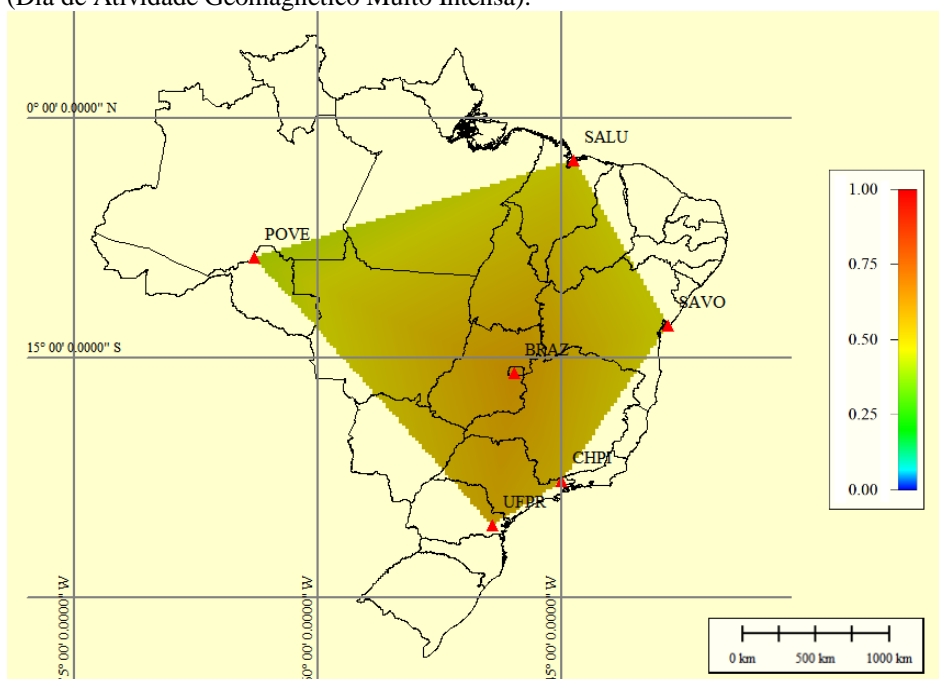
Figura 3 – Série temporal do efeito ionosférico de primeira ordem para dados GPS referente ao dia 17 de Março de 2015 – Estação BRAZ.



Fonte: Elaborado pelos autores.

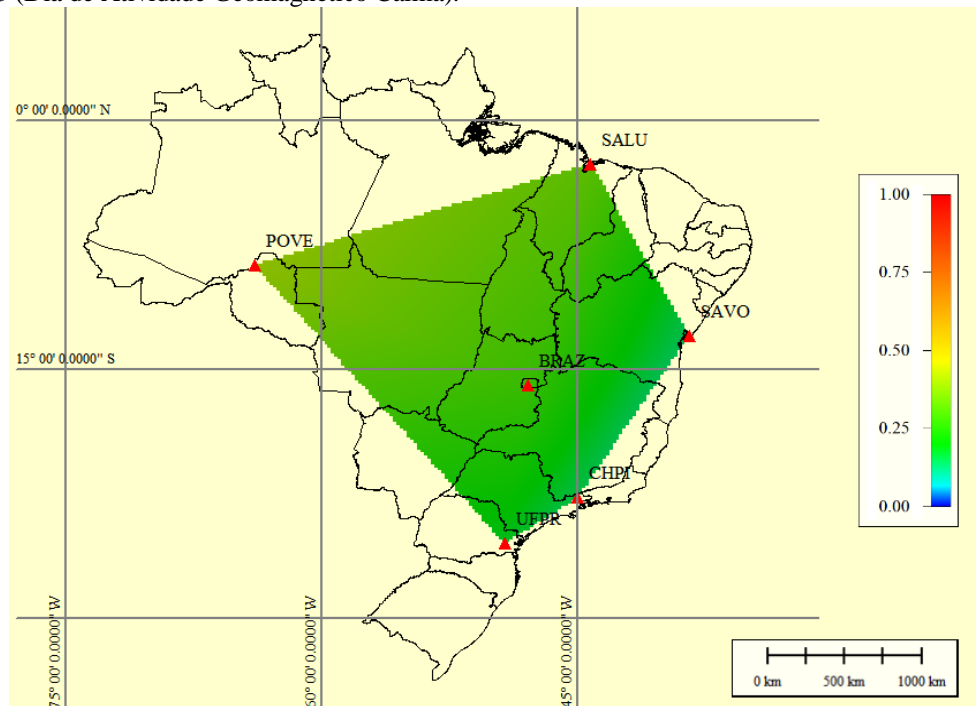
Considerando, inicialmente, a média do efeito ionosférico de primeira ordem, para todos os trinta e dois satélites GPS envolvidos, observa-se que para o dia 17 de Março de 2015, dia da tempestade geomagnética muito intensa, a correlação média entre o índice SYM-H e o efeito ionosférico de 1ª ordem é moderada (visto que o coeficiente de correlação apresentou valor igual a 0,51). Portanto, é maior do que a correlação para o dia de atividade geomagnética calma (17 de Julho de 2015 – coeficiente de correlação igual a 0,25 – correlação fraca). Nesse sentido, pode-se afirmar que existem indícios de que quanto maior a perturbação da atividade geomagnética, maior será a correlação entre o índice geomagnético SYM-H e o efeito ionosférico de 1ª ordem (Figuras 4 e 5).

Figura 4 – Correlação entre o efeito ionosférico de primeira ordem e o índice geomagnético SYM-H para o dia 17 de Março de 2015 (Dia de Atividade Geomagnético Muito Intensa).



Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 5 – Correlação entre o efeito ionosférico de primeira ordem e o índice geomagnético SYM-H para o dia 17 de Julho de 2015 (Dia de Atividade Geomagnética Calma).



Fonte: Elaborado pelos autores.

A taxa de variação do coeficiente de correlação entre as duas apresentou valores entre, aproximadamente, 5% a 72%. A estação CHPI, com latitude geomagnética igual a 13°54'S, isto é, mais próxima da região com maior concentração de elétrons, apresentou entre os dois dias citados uma variação de 72%. Enquanto que, a estação UFPR, com latitude geomagnética igual a 16°20'S, apresentou a taxa de variação igual a 68%, isto é, alta variação entre o dia de atividade geomagnética muito intensa e o dia de atividade geomagnética calma. Já a estação POVE, localizada mais próxima do equador geomagnético, com latitude geomagnética igual a 0°55'S, apresentou uma variação entre os dois dias igual a, aproximadamente, 5%. Isto se deve ao fato de que a região do equador geomagnético é considerada uma região com baixa densidade de elétrons.

Ao se analisar a correlação entre o índice geomagnético e o efeito ionosférico de primeira ordem de forma individual para cada satélite GPS, percebe-se que esta é maior quanto maior a atividade geomagnética. As Tabelas 9 e 10 mostram tais resultados.

Tabela 9: Coeficiente de correlação entre o efeito ionosférico de primeira ordem e o índice geomagnético SYM-H para o dia de atividade geomagnética muito intensa (17 de Março de 2015).

Estação	ρ	Correlação
BRAZ	0,62	Forte
CHPI	0,54	Moderada
POVE	0,42	Moderada
SALU	0,47	Moderada
SAVO	0,45	Moderada
UFPR	0,57	Moderada

Fonte: Elaborado pelos autores.

Tabela 10: Coeficiente de correlação entre o efeito ionosférico de primeira ordem e o índice geomagnético SYM-H para o dia de atividade geomagnética calma (17 de Julho de 2015).

Estação	ρ	Correlação
BRAZ	0,27	Fraca
CHPI	0,15	Fraca
POVE	0,40	Moderada
SALU	0,33	Moderada
SAVO	0,14	Fraca
UFPR	0,18	Fraca

Fonte: Elaborado pelos autores.

Em relação aos ângulos de elevação dos satélites GPS, dados coletados com ângulos maiores que 40° se referem a maiores valores de correlação entre o índice SYM-H e o efeito ionosférico de primeira ordem, como mostra a Tabela 11.

Tabela 11: Relação entre ângulo de elevação máximo e coeficiente de correlação entre o efeito ionosférico de primeira ordem e o índice SYM-H.

Satélite	Ângulo de elevação máximo	ρ
PRN 04	86°	0,93
PRN 11	63°	0,94
PRN 25	85°	0,69
PRN 16	35°	0,25
PRN 29	45°	0,29
PRN 31	49°	0,13

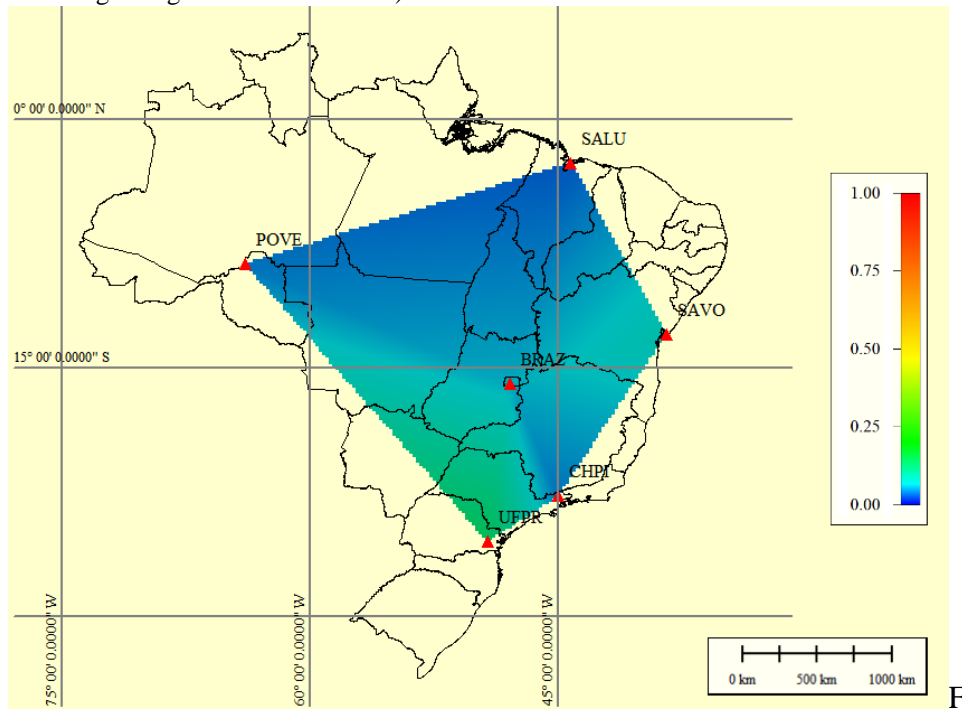
Fonte: Elaborado pelos autores.

A correlação entre o efeito ionosférico de primeira ordem e os índices de irregularidades ionosféricas I_{ROT} e $ROTI$, considerando todos os satélites GPS, apresentou comportamento similar em ambos os dias. Ambos os índices apresentaram correlação do tipo fraca para o dia de atividade geomagnética muito intensa, isto é, para o dia de ocorrência da tempestade geomagnética. Para o dia de atividade geomagnética calma, ambos os índices apresentaram correlação moderada com o efeito ionosférico de primeira ordem. Vale ressaltar que tal comportamento se mostra instigante uma vez que, as tempestades geomagnéticas são decorrentes de compressões nas linhas de força do campo geomagnético, o que por sua vez, provocam bruscas variações na densidade de elétrons na camada ionosférica.

Os índices de irregularidades ionosféricas, I_{ROT} e $ROTI$, buscam representar a presença de irregularidades ionosféricas. Além disso, o índice $ROTI$ reflete as variações na densidade de conteúdo total de elétrons. Hipoteticamente, em um dia com registro de tempestade geomagnética é de se esperar uma maior correlação existente entre o índice $ROTI$ e o efeito ionosférico de primeira ordem.

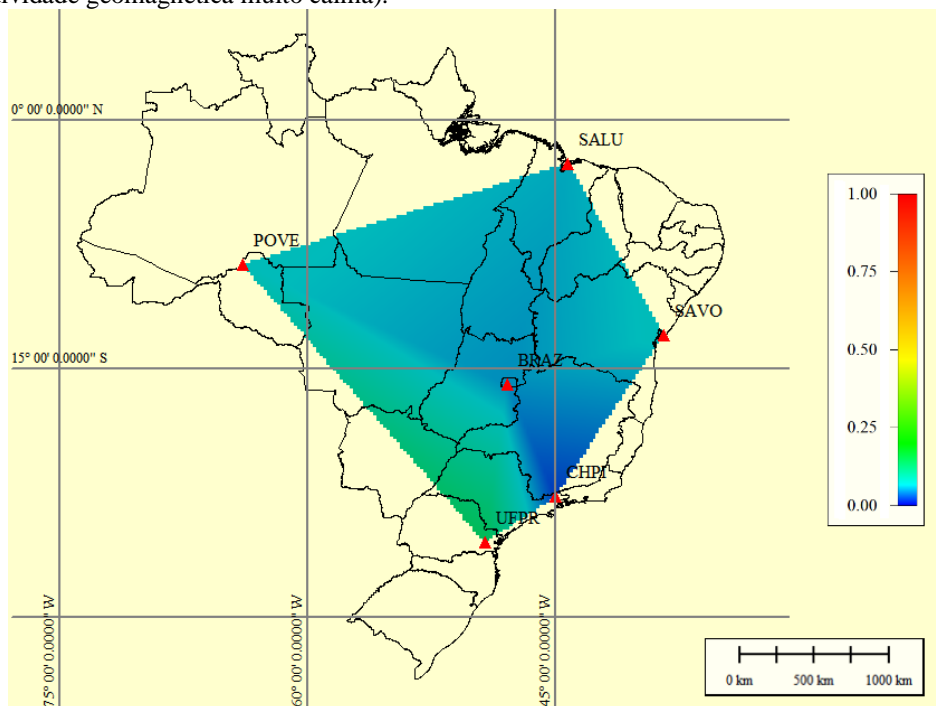
Quanto ao índice de cintilação σ_{ϕ} , a correlação com o efeito ionosférico de primeira ordem foi classificada como fraca tanto para o dia com atividade geomagnética calma como para o dia de atividade geomagnética muito intensa. As Figuras 6 e 7 mostram tais resultados.

Figura 6 – Correlação entre o efeito ionosférico de primeira ordem e o índice de cintilação σ_ϕ para o dia 17 de Março de 2015 (Dia de atividade geomagnética muito intensa).



Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 7 – Correlação entre o efeito ionosférico de primeira ordem e o índice de cintilação σ_ϕ para o dia 17 de Julho de 2015 (Dia de atividade geomagnética muito calma).



Fonte: Elaborado pelos autores.

O monitoramento do fenômeno da cintilação ionosférica pode ser feito a partir da medida de cintilação de amplitude ou da cintilação de fase. Enquanto a cintilação de amplitude é medida através do índice S4, a cintilação de fase é medida através do desvio-padrão da fase (σ_ϕ). Dessa forma, é

interessante que ao se estudar a correlação dos índices de cintilação com o efeito ionosférico de 1ª ordem, por exemplo, ambos os índices de monitoramento de cintilação sejam levados em consideração. Neste artigo, apesar de não ter sido utilizado o índice S4, recomenda-se que em trabalhos futuros, tal índice seja incluído nas análises de correlação com os efeitos ionosféricos.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Dentre as principais conclusões deste artigo, destaca-se que quanto mais perturbada a atividade geomagnética maior será a correlação entre as duas variáveis em estudo, nesse caso, o efeito ionosférico de primeira ordem e o índice geomagnético SYM-H. Para as estações mais próximas do equador geomagnético, como por exemplo, estação POVE, menores foram os valores da taxa de variações, cerca de 5% apenas, entre os coeficientes de correlação entre o dia com registro de atividade geomagnética muito intensa e o dia de atividade geomagnética calma. Já para estações mais próximas da crista da anomalia equatorial, localizadas aproximadamente a 15°N e 15°S, como é o caso das estações CHPI e UFPR, a taxa de variação entre os coeficientes de correlação, para os dois dias em estudo, apresentou-se alta.

A correlação entre o efeito ionosférico de primeira ordem e os índices de irregularidades ionosféricas, I_{ROT} e ROTI, apresentou-se com comportamento fora do padrão esperado, isto é, para o dia de registro de tempestade geomagnética, o que implica variações bruscas na densidade de elétrons.

Em ambos os cenários de atividade geomagnética, a correlação entre o efeito ionosférico de primeira ordem e o índice de cintilação σ_{ϕ} mostrou-se do tipo fraca. Para melhor compreensão deste cenário, recomendam-se experimentos com dados GPS coletados em dia anterior e posterior ao dia da ocorrência da tempestade geomagnética.

Uma outra recomendação consiste no uso do índice de cintilação S4 nas análises de sua correlação com o efeito ionosférico de 1ª ordem visto que tal índice reflete a cintilação de amplitude.

REFERÊNCIAS

- Callegari-Jacques, S. M. Bioestatística: princípios e aplicações. Porto Alegre: Artemed, 2003, 255p.
- Conker, R. S.; El-Arini, M. B.; Hegarty, C. J.; Hsiao, T. Modeling the effects of ionospheric scintillation on GPS/Satellite-Based augmentation system availability. Radio Science, v. 38, n.1, p. 1-23, Feb. 2003.

Davies, K. Ionospheric radio. England: Short Run Press LTd., 1990, 580p.

Fedrizzi, M. Estudo do efeito das tempestades magnéticas sobre a ionosfera utilizando dados GPS. 2003. 223p. Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

Fedrizzi, M. Observações do conteúdo eletrônico total com dados do GPS. 1999. 142 f. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

Fonseca Júnior, E. S. O sistema GPS como ferramenta para a avaliação ionosférica no Brasil. 2002. 176 p. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia de Transportes, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

Fortes, L. P. S. Operacionalização da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo do Sistema GPS (RBMC). 1997. 152 f. Dissertação (Mestrado em Sistemas e Comunicação) – Instituto Militar em Engenharia, Rio de Janeiro.

Gonzalez, W. D.; Tsurutani, B, T.; Gonzalez, A. L. C. Interplanetary origin of geomagnetic storms. *Space Science Reviews*, v. 88., p. 529-562, Mar.1999.

Hegarty, C.; El-arini, M. B.; Kim, T.; Ericson, S. Scintillation modeling for GPS-Wide Area Augmentation System receivers. *Radio Science*, v. 36, n. 5, p. 1221-1231, Sep./Oct. 2001.

Hernandez-Pajares, M. et. al. Section 9.4 Ionospheric model for radio techniques of Chapter 9 Models for atmospheric propagation delays of IERS Conventions 2010. In: Petit G.; Luzum, B (eds) IERS Technical Note No. 36. Verlag des Bundesamts fur Kartographie und Geodasie, Frankfurt am Main. 2010.

Marques, H. A. Influência da ionosfera no posicionamento GPS: estimativa dos resíduos no contexto de duplas diferenças e eliminação dos efeitos de 2ª e 3ª ordem. 151 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente. 2008.

Matsuoka, M. T. Avaliação de funções para modelagem do efeito da refração ionosférica na propagação dos sinais GPS. 2003. 164 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

Matsuoka, M. T. Influência de diferentes condições da ionosfera no posicionamento por ponto com GPS: Avaliação na região brasileira. 2007. 263 f. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

McNamara, L. F. The ionospheric: communications, surveillance and direction finding. Florida: Krieger Publishing Company, 237 p. 1991.

Mendillo, M.; Lin, B.; Aarons, J. The application of GPS observations to equatorial aeronomy. *Radio Science*, v. 35, n.3, p. 885-904, May/Jun. 2000.

Muella, M. T. A. H.; De Paula, E. R.; Kantor, I. J.; Rezende, L. F. C.; Smorigo, P. F. Occurrence and zonal drifts of small-scale ionospheric irregularities over an equatorial station during solar maximum – magnetic quiet and disturbed conditions. *Advances in Space Research*, v. 43, n. 12, p. 1957-1973, June 2009.

Mushini, S. C.; Jayachandran, P. T.; Langley, R. B.; Macdougall, J. W.; Pokhotelov, D. Improved amplitude and phase scintillation indices derived from wavelet detrended high latitude GPS data. *GPS Solutions*. v. 16. n. 3, p. 363-373. Jul. 2012.

Odiijk, D. Fast precise GPS positioning in the presente of ionospheric delays. 2002. 242 f. PhD dissertation, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology, Delft.

Pereira, V. A. S.; Camargo, P. O. Estimativa e análise de índices de irregularidades da ionosfera utilizando dados GNSS de redes ativas. *Boletim de Ciências Geodésicas*, v. 19, n. 3, p. 374-390, jul./set. 2013.

Pereira, V. A. S.; Camargo, P. O. Padrões para classificação dos índices de irregularidades da ionosfera: I_{ROT} e $ROTI$. In: Anais do V Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. Instituto de Tecnologia de Pernambuco, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 12-14 nov. 2014.

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, (18): 2283-2286, 1997.

Van Dierendonck, A. J.; Klobuchar, J.; HUA, Q. Ionospheric scintillation monitoring using commercial single frequency C/A code receivers. In: PROCEEDINGS OF THE INSTITUTE OF NAVIGATION, 1993, Alexandria . Proceedings... Alexandria: [s.n.], 1993. p. 1324-1333.

Vani, Bruno César; Shimabukuro, Milton Hirokazu; Monico, João Francisco Galera. Exploração visual e análise dos dados de monitoramento da cintilação ionosférica: A Ferramenta de consulta ISMR. Computers & Geosciences. (2017).

Walter, T. et. al. Effect of ionospheric scintillations on GNSS: a white paper. In: SBAS IONOSPHERIC WORKING GROUP, 2010. Eletronic Proceedings...2010. p. 1-22.

Wanninger, L. Ionospheric monitoring using IGS data. In: 1993 IGS Workshop, 1993, Berne. Proceedings... Berne: Beuther, G.; Brockmann, E., 1993. P. 351-360.

Yamashita, C. S. Efeito das tempestades magnéticas intensas na ionosfera de baixa latitude. 1999. 75 f. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.