

Revista Brasileira de Cartografia (2015) N<sup>o</sup> 67/1 97-109  
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto  
ISSN: 1808-0936

## **ESTUDO DO COMPORTAMENTO DA CINTILAÇÃO IONOSFÉRICA EM DIFERENTES REGIÕES BRASILEIRAS E SEU IMPACTO NO POSICIONAMENTO GNSS**

*Studies of Ionospheric Scintillation Behavior in Different Brazilian Regions and its  
Impact on GNSS Positioning*

**Jéssica Saldanha Souza; Daniele Barroca Marra Alves & Bruno César Vani**

**Universidade Estadual Paulista – UNESP**

**Faculdade de Ciências e Tecnologia – FCT Departamento de Cartografia**

Rua Roberto Simonsen, 305, Campus Presidente Prudente. Cep 19060-900. Presidente Prudente/SP, Brasil.  
{jessicasaldanha.souza, brunovani22}@gmail.com, danibarroca@fct.unesp.br

*Recebido em 05 de Junho, 2014/ Aceito em 12 de Outubro, 2014*

*Received on June 05, 2014/ Accepted on October 12, 2014*

### **RESUMO**

Existem irregularidades na ionosfera que afetam a propagação dos sinais GNSS (*Global Navigation Satellite System*), como a cintilação ionosférica. A cintilação ionosférica pode ser descrita como uma mudança rápida na fase e amplitude do sinal GNSS, causada por irregularidades da densidade dos elétrons ao longo do caminho percorrido pelo sinal. A cintilação pode enfraquecer ou até mesmo causar a perda total do sinal GNSS recebido pelos receptores. Uma das iniciativas para estudar e analisar os efeitos da cintilação ionosférica no Brasil é o projeto CIGALA (*Concept for Ionospheric Scintillation Mitigation for Professional GNSS in Latin America*) (<http://cigala.galileoic.org/>) e em continuidade o projeto CALIBRA (*Countering GNSS high Accuracy applications Limitations due to Ionospheric disturbances in BRAzil*). Tais projetos visam analisar os efeitos da cintilação, com o intuito de compreender suas causas e estudar estes efeitos para a modelagem da cintilação e para o aperfeiçoamento de novas técnicas a serem implementadas nos receptores GNSS. Neste artigo pretende-se avaliar o efeito da ionosfera, em especial da cintilação ionosférica, em diferentes regiões do território brasileiro, além disso avaliar o impacto desse efeito no Posicionamento por Ponto. Estudos dessa natureza tem grande relevância, pois, nos anos de 2013 e 2014 vem ocorrendo um pico de atividade solar (<http://solarscience.msfc.nasa.gov/predict.shtml>), o que torna os efeitos da ionosfera, e consequentemente da cintilação, ainda mais significativos, principalmente na região do Brasil, onde já existe um alto índice de cintilação até mesmo para períodos considerados mais brandos no que se refere a cintilação ionosférica. Os resultados obtidos nesse artigo mostraram que no mês de outubro, considerado um período de forte cintilação, o Posicionamento por Ponto é mais afetado pela cintilação do que no mês de junho, período considerado de baixa cintilação, sendo o horário do dia de maior ocorrência das 0 às 6h TU (Tempo Universal).

**Palavras chaves:** Ionosfera, Cintilação, GNSS.

### **ABSTRACT**

There are ionosphere irregularities that affect the GNSS (*Global Navigation Satellite System*) signals propagation, like the ionosphere scintillation. The ionosphere scintillation can be described as a fast change in the phase and amplitude of GNSS signal caused by irregularities in the electron density along the signal's path. The Scintillation can weaken or even cause total lost of GNSS signal received by the receivers. One of the initiatives to study and analyze the effects

of ionosphere scintillation is the CIGALA (Concept for Ionospheric Scintillation Mitigation for Professional GNSS in Latin America) (<http://cigala.galileoic.org/>) and CALIBRA (*Countering GNSS high Accuracy applications Limitations due to Ionospheric disturbances in BRAzil*) projects. These projects aim analyze the Scintillation effects, in order to understand its causes and to study these effects for the scintillation modeling and the development of new techniques to be implemented in GNSS receivers. This paper aims to evaluate the effect of the ionosphere, particularly the ionosphere scintillation in different Brazilian regions, besides evaluate this effect impact in Point Positioning. These kind of studies are very relevant because in 2013 and 2014 years is occurring a peak of solar activity (<http://solarscience.msfc.nasa.gov/predict.shtml>). It can cause ionospheric effects, and consequently scintillation, more significant, especially in Brazil region, where there is already a high scintillation index even in periods considered of slow scintillation. In this paper the results showed that in October, considered a period of strong scintillation, the Point Positioning is more affected by scintillation than in June, a period considered low scintillation. Besides, the time of day where the scintillation has the highest occurrence is from 0 to 6h UT (Universal Time).

**Keywords:** Ionosphere, Scintillation, GNSS.

## 1. INTRODUÇÃO

O sistema GNSS (*Global Navigation Satellite System*), tem se tornado uma tecnologia extremamente útil e indispensável para as atividades humanas que necessitam de posicionamento. Este sistema apresenta vantagens sobre os métodos de posicionamento convencionais, tais como rapidez na obtenção de coordenadas, disponibilidade em quaisquer condições climáticas e a não necessidade de visibilidade entre as estações (MONICO, 2008).

Os métodos de posicionamento que utilizam os sinais GNSS geralmente são descritos na literatura como: posicionamento absoluto ou por ponto; posicionamento relativo; posicionamento diferencial (DGPS – *Differential GPS*) e posicionamento baseado em redes. Estes métodos podem estar no modo estático ou cinemático e com processamento em tempo real ou pós – processado (HOFMANN - WELLENHOF, LICHTENEGGER e WASLE, 2008; ALVES, 2008).

Mas, os sinais GNSS sofrem diferentes tipos de influência, que podem provocar variações em sua direção de propagação, velocidade de propagação, polarização e em sua potência. Os efeitos ocasionados durante a passagem do sinal pela atmosfera, por exemplo, podem degradar a qualidade da observável GNSS e conseqüentemente a acurácia do posicionamento (CAMARGO, 1999; SEEBER, 2003).

A atmosfera terrestre tem grande influência na propagação dos sinais GNSS, principalmente a região da ionosfera, que segundo Camargo (1999) é uma das mais importantes fontes de erro para usuários do GPS que requerem medidas

com boa acurácia, principalmente para usuários de receptores de simples frequência.

O Brasil está situado na região do equador geomagnético, onde o sinal GNSS é afetado por diversas condições ionosféricas, como por exemplo, o efeito da cintilação ionosférica e da anomalia equatorial. Além dos efeitos já citados, no final do ano de 2013 e início de 2014 vem ocorrendo um pico da atividade ionosférica, o que torna este período ideal para testar e avaliar o efeito da ionosfera no posicionamento GNSS. Assim, esse artigo tem como objetivo avaliar o comportamento da cintilação ionosférica em diferentes regiões brasileiras e a consequência desse efeito no posicionamento por ponto. A revisão teórica, métodos empregados, resultados e análises são apresentados nas próximas seções.

## 2. IONOSFERA E SUAS CARACTERÍSTICAS

Com o intuito de estudar a propagação do sinal GNSS na atmosfera, a mesma pode ser dividida em Troposfera e Ionosfera, sendo os efeitos da Ionosfera enfatizados neste artigo.

A radiação solar contém energia suficiente para causar a fotoionização da atmosfera terrestre nas altas altitudes, criando, na atmosfera superior, regiões parcialmente ionizadas, conhecidas como ionosfera, que variam de, aproximadamente, 50 a 1000 km (DAVIES 1990).

O efeito da ionosfera depende da frequência, e conseqüentemente, do índice de refração, sendo proporcional ao TEC (*Total Electron Content* – Conteúdo Total de Elétrons), ou seja, ao número de elétrons presentes ao longo do caminho do satélite ao receptor. O problema principal é que o TEC varia no tempo e no espaço, em função do fluxo de ionização solar, atividade magnética,

ciclo de manchas solares, estação do ano, localização do usuário e direção do raio vetor entre o satélite e o receptor (CAMARGO, 1999).

Além dos problemas já citados, na ionosfera existem anomalias e irregularidades que afetam a propagação do sinal GNSS, como a anomalia equatorial, tempestades geomagnéticas, bolhas ionosféricas e a cintilação ionosférica (MATSUOKA, 2007).

## 2.1 Cintilação Ionosférica e seus efeitos no posicionamento GNSS

A cintilação ionosférica é causada por mudanças rápidas na fase e amplitude do sinal de rádio recebido, as quais são causadas por irregularidades na densidade de elétrons ao longo do caminho percorrido pelo sinal na ionosfera, podendo enfraquecer o sinal recebido pelos receptores GNSS, fazendo que ocorra em muitos casos a degradação ou até mesmo perda do sinal (CONKER *et al.*, 2003).

Os efeitos da cintilação ionosférica são mais intensos nas regiões equatoriais e de altas latitudes (MONICO, 2008). Na região de altas altitudes, a ocorrência da cintilação é devida às tempestades geomagnéticas ou magnetosféricas (AGUIAR, 2010). Os eventos que se direcionados a Terra podem provocar tempestades geomagnéticas são: as explosões solares (*solar flares*), ejeções coronais de massa (CME – *Coronal Mass Ejections*), correntes de vento solar de alta velocidade (HSSWS – *High Speed Solar Wind Streams*) e desaparecimentos súbitos de filamentos (SDF – *Sudden Disappearing Filaments*) (RUVIARO *et al.*, 2012).

Já nas regiões equatoriais os efeitos da cintilação são relacionados à anomalia equatorial com intensidade maior no pico local da anomalia. Além disso, bolhas ionosféricas são formadas nesta região logo após o pôr-do-sol (SILVA *et al.*, 2012). Segundo Matsuoka (2007) bolhas ionosféricas em larga escala aumentam a ocorrência de cintilação ionosférica, resultando em degradação nos sinais de comunicação transionosféricos e nos sinais de navegação, como os do GNSS. Segundo Sahai *et al.* (2000) a ocorrência de bolhas ionosféricas são muito mais frequentes durante o período de alta atividade solar, sendo o local de maior ocorrência o equador geomagnético onde elas podem chegar

a picos maiores que 1500 km.

Cabe acrescentar que a magnitude e a frequência das cintilações são correlacionadas com o ciclo solar (SILVA *et al.* 2012). A Fig. 1 mostra os ciclos solares que ocorrem em intervalos de 11 anos, sendo o pico atual no final de 2013 e início de 2014. Assim, os efeitos causados pelas irregularidades ionosféricas devem ser intensificados nesse período, devido ao aumento da atividade solar, que deverá trazer efeitos sob a atmosfera terrestre.

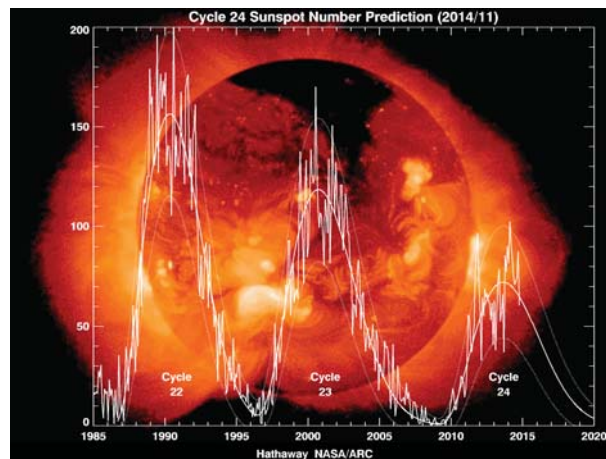


Fig. 1 - Últimos ciclos Solares.

Fonte: <http://solarscience.msfc.nasa.gov/predict.shtml>. Acesso em junho/2014.

Em Salomoni *et al.* (2009) os resultados mostram a diferença no erro obtido no posicionamento em períodos de alta atividade solar e baixa atividade solar, onde é possível ver a influência do ciclo solar na qualidade dos dados obtidos no posicionamento.

O Brasil tem grande parte do seu território localizado na região equatorial, fortemente afetada pela anomalia equatorial, o que permite estudos dessa natureza. Segundo estudos realizados por Skone *et al.* (2001) em períodos de alta atividade solar nesta região equatorial o sinal L2 é fortemente afetado devido à cintilação ionosférica, tendo seus dados corrompidos em até 40%. O tipo de receptor e os algoritmos empregados também podem influenciar numa maior perda de sinal L2 devido à cintilação.

Segundo Matsuoka (2007) os períodos aonde chega-se aos maiores índices de cintilação são aproximadamente durante o período de setembro à março (equinócio) e os mínimos ocorrem durante os meses de solstício de inverno e verão, ou seja, os meses de abril à

agosto. Os períodos do dia mais complicados, tanto para a determinação altimétrica quanto para a planimétrica, coincide com o período noturno onde as irregularidades ionosféricas se intensificam (MATSUOKA *et al.*, 2007).

Uma maneira de caracterizar a variação da potência de um sinal ao longo do tempo é utilizando os índices S. É possível que se divida a amplitude de uma onda em harmônicos, sendo que o índice S<sub>4</sub> (quarto harmônico) é o mais utilizado entre todos os índices S. As análises realizadas neste artigo estão baseadas no índice S4 (MENDONÇA, 2013).

O índice S4 mapeia a intensidade da cintilação ionosférica e é dado por (<http://www.inpe.br/scintec/pt/scintil.php>):

$$S_4^2 = \frac{\langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2}{\langle I \rangle^2}$$

onde:

$I$  é o vetor contendo a intensidade do sinal em um determinado intervalo de tempo.

Segundo Conker *et al.* (2003) quando atingi-se o índice S4 > 0,707, alguns modelos de receptores são considerados bloqueados pela cintilação, ou seja, perdem quase ou totalmente o sinal transmitido pelo satélite. De acordo com a Tabela 1, o índice S4 também pode ser classificado como forte, moderado e fraco, dependendo diretamente da intensidade de cintilação ocorrida no dia em análise (TIWARI, *et al.* 2011).

Tabela 1: Classificação do índice S4

S4	CLASSES
S4 > 1	FORTE
0,5 < S4 < 1	MODERADA
0 < S4 < 0,5	FRACA

Fonte: Tiwari, *et al.* 2011

Segundo Mendonça *et al.* (2012) outro índice utilizado para a avaliação da cintilação é o índice phi60 (ou sigma-phi -  $\sigma\phi$ ), que mostra a variação da medida de fase da onda portadora ( $\phi$ ) no receptor nos últimos 60 segundos, e é calculado segundo a equação:

$$\sigma_\phi = \sqrt{\langle \phi^2 \rangle - \langle \phi \rangle^2}$$

Conforme a Tabela 2, o índice  $\sigma\phi$  pode ser classificado como forte, moderado e fraco, assim como o índice S4 (Tiwari, *et al.* 2011).

Tabela 2: Classificação do índice  $\sigma\phi$

S4	CLASSES
$\sigma\phi > 0,8$	FORTE
$0,4 < \sigma\phi < 0,8$	MODERADA
$0 < \sigma\phi < 0,4$	FRACA

Fonte: Tiwari, *et al.* 2011.

Com o intuito de prever e modelar os efeitos da cintilação ionosférica, modelos globais e regionais têm sido desenvolvidos, como por exemplo, o WBMOD (*Wideband Model*) desenvolvido por pesquisadores do *NorthWest Research Associates* (NWRA), EUA e seus melhoramentos (SCINTMOD). Este modelo global é útil para prever a variabilidade da cintilação em longo prazo (WERNIK *et al.*, 2004). Outro modelo desenvolvido por pesquisadores do *Informatique Electromagnétisme Electronique Analyse* (IEEA), da França, é o *The Global Ionospheric Scintillation Model* (GISM), o qual permite obter tanto os erros médios da cintilação quanto das ondas de rádio (REZENDE *et al.*, 2010).

Modelos teóricos estão em desenvolvimento como o modelo para o cálculo da fase e da amplitude das cintilações em regiões equatoriais desenvolvido por Costa e Bazu (2002) *apud* Rezende (2010). Em Anderson *et al.* (2004) também é descrita uma técnica para prever a frequência de ocorrência da cintilação ionosférica numa estação localizada na região equatorial.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS EMPREGADOS

A fim de avaliar os efeitos da cintilação no posicionamento foi desenvolvido no Brasil o projeto CIGALA (*Concept for Ionospheric Scintillation Mitigation for Professional GNSS in Latin America*) (<http://is-cigala-calibra.fct.unesp.br>), onde foram instaladas oito estações em diferentes regiões do Brasil como pode ser visto na Fig. 2. O projeto CIGALA foi finalizado em 2012, mas a rede de receptores GNSS implantados no Brasil continuou em operação, o projeto CALIBRA (*Countering GNSS high Accuracy applications Limitations due to Ionospheric disturbances in Brazil*) (<http://www.calibra-ionosphere.net/calibra/index.aspx>) visa

dar continuidade e expandir a rede de receptores do projeto CIGALA.



Fig. 2 - Distribuição das estações da rede CIGALA/CALIBRA.

Fonte: <http://is-cigala-calibra.fct.unesp.br>.

Nesse artigo, foi utilizado o banco de dados do CIGALA (<http://iscigalacalibra.fct.unesp.br/is/ismrtool/mining/Mining.php>), com a intenção de identificar as regiões do Brasil onde a cintilação ionosférica atua com maior ou menor intensidade, avaliando as correlações entre períodos do dia, diferentes localizações e diferentes estações do ano. Além do banco de dados do CIGALA também foi utilizada uma ferramenta que está em desenvolvimento na FCT/UNESP, a ISMR Query Tool (VANI, 2013), que permite realizar consultas e análises sobre os dados obtidos das estações (<http://is-cigala-calibra.fct.unesp.br>).

As estações selecionadas para realizar as análises estão apresentadas na Tabela 3. Estas estações foram as que tiveram maior quantidade de dados coletados no período escolhido para as análises.

Tabela 3: Estações da Rede CIGALA

ESTAÇÃO	LOCALIDADE
<b>PALM</b>	PALMAS – TO
<b>POAL</b>	PORTO ALEGRE – RS
<b>PRU1</b>	PRES. PRUDENTE – SP
<b>PRU2</b>	PRES. PRUDENTE – SP
<b>SJCU</b>	S. J. DOS CAMPOS – SP

Para avaliar o impacto da cintilação ionosférica no posicionamento GNSS, foram selecionados os meses de outubro considerado um período de cintilação muito intensa e junho considerado um período de cintilação moderada. Com os dados destes meses em 2013 foram realizados testes utilizando o posicionamento por ponto (PP).

O PP necessita de um único receptor para sua aplicação (MONICO, 2008), é um método de grande utilidade para diversas aplicações e vem sendo bastante empregado pela comunidade civil.

Para o processamento do PP foi utilizado o serviço disponibilizado pelo IBGE (*Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística*), o IBGE-PPP (<http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/ppp/default.shtm>) que é um serviço on-line para o pós-processamento de dados GPS. No PP emprega-se apenas as pseudodistâncias, devido a isto foram utilizados apenas dados do código C/A no software IBGE-PPP. Além disso, nesse artigo, para todos os dias analisados, o PP foi realizado no método Estático.

Os gráficos gerados nos resultados a partir do PP utilizam o Erro Médio Quadrático (EMQ) das coordenadas E, N e h (EMQ 3D) obtidas para cada dia. Cada arquivo rinex processado no IBGE-PPPP gera as coordenadas e o desvio padrão. O EMQ 3D é obtido a partir dos cálculos gerados com base no desvio padrão e nas diferenças entre as coordenadas obtidas e as consideradas verdadeiras.

Antes de realizar o PP foi selecionado o período do dia onde a cintilação é mais relevante. A Fig. 3 apresenta o índice S4 para o dia 23 de outubro de 2013 (período de alta cintilação) em duas estações diferentes PRU2 e POAL. Note que a cintilação tem picos durante o período das 0h00min às 06h00min (TU). Devido a isto este período foi escolhido para avaliar os efeitos da cintilação no PP.

Na Fig. 3 os gráficos a e c mostram a ocorrência de cintilação na estação PRU2 e POAL respectivamente, sendo o período de coleta de dados para PRU2 de 24 horas e para POAL de 22 horas, em um dia com alta cintilação ionosférica; já os gráficos b e d mostram para as mesmas estações respectivamente a ocorrência de cintilação durante o período das 00h00min às 06h00min. Note que os maiores picos de cintilação ocorrem neste período.

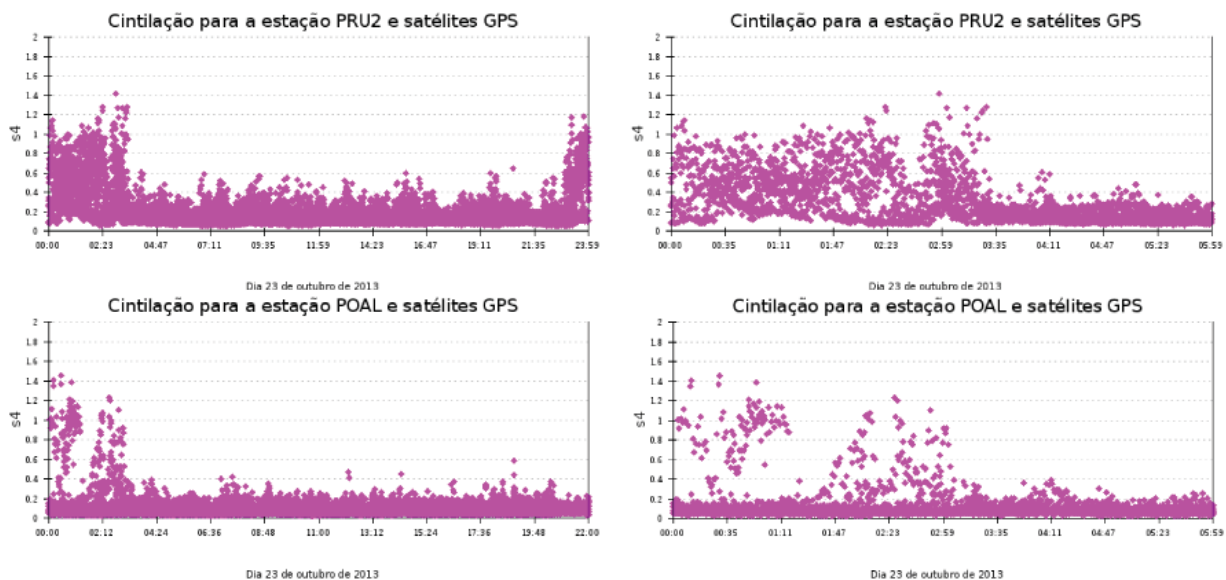


Fig. 3 - Período do dia com maior influência da cintilação para duas estações da rede CIGALA/CALIBRA, sendo os gráficos a e b para a estação PRU2 e c e d para a estação POAL.

#### 4. RESULTADOS E ANÁLISES

Para gerar os resultados e análises com o intuito de avaliar a cintilação ionosférica no Brasil e sua influência no posicionamento GNSS foram empregados dados no período de maior e menor intensidade do efeito. Na análise da intensidade da cintilação ionosférica e para realizar o PP foram utilizadas as estações da rede CIGALA (TABELA 3), a fim de avaliar a relação entre a cintilação, o posicionamento e a região onde encontra-se as estações. O ano de 2013 foi escolhido para as análises devido ao pico da atividade solar já mencionada. Assim, a seção 4.1 apresenta de uma maneira geral como a cintilação se comportou durante todo o ano de 2013, mostrando o período mais afetado e o menos afetado. Já na seção 4.2 são apresentados os resultados do PP para períodos com baixa e alta cintilação, mostrando a relação entre os picos de cintilação e os erros no posicionamento. Finalizando, a seção 4.3 mostra para todas as estações analisadas um EMQ médio para o período de maior e menor ocorrência da cintilação onde é possível ver qual estação sofreu maior impacto.

##### 4.1 Índice S4 para estações da rede CIGALA

A Fig. 4 mostra um calendário de 2013 desenvolvido na ISMR Query Tool, contendo todos os dias do ano de cada estação a ser

analisada. Neste calendário é possível ver qual o dia com maior impacto da cintilação. Para cada dia é gerada uma média de S4 e essa média é fixada em uma escala de cores onde as cores mais fortes (verde escuro) mostram uma média maior de índice S4, com  $S4 \geq 0,15$  e as cores mais claras mostram uma média menor de S4 sendo  $S4 \leq 0,009$  (amarelo claro). Em alguns períodos do ano houve perda de dados nas estações, que pode ser visto na cor branca.

A Fig. 4 possibilita a comparação entre os índices obtidos em junho e outubro. Em todas as estações as médias obtidas para junho foram menores do que as obtidas em outubro; junho atingiu em alguns dias médias entre 0,009 a 0,11 para as estações PRU1 e PRU2. O mês de outubro atingiu valores maiores principalmente nas estações PRU1, PRU2 e PALM, com média  $> 0,11$ .

As estações PRU1 e PRU2 foram as que mantiveram médias de S4 mais altas, isto provavelmente se deve ao efeito da anomalia equatorial, provocando um aumento significativo da cintilação nesta região. A estação POAL obteve médias baixas praticamente o ano todo. Esta estação está mais distante do efeito provocado pela anomalia equatorial, devido a isto os efeitos da cintilação sobre ela são menores.

# Estudo do Comportamento da Cintilação Ionosférica em Diferentes Regiões Brasileiras e seu Impacto

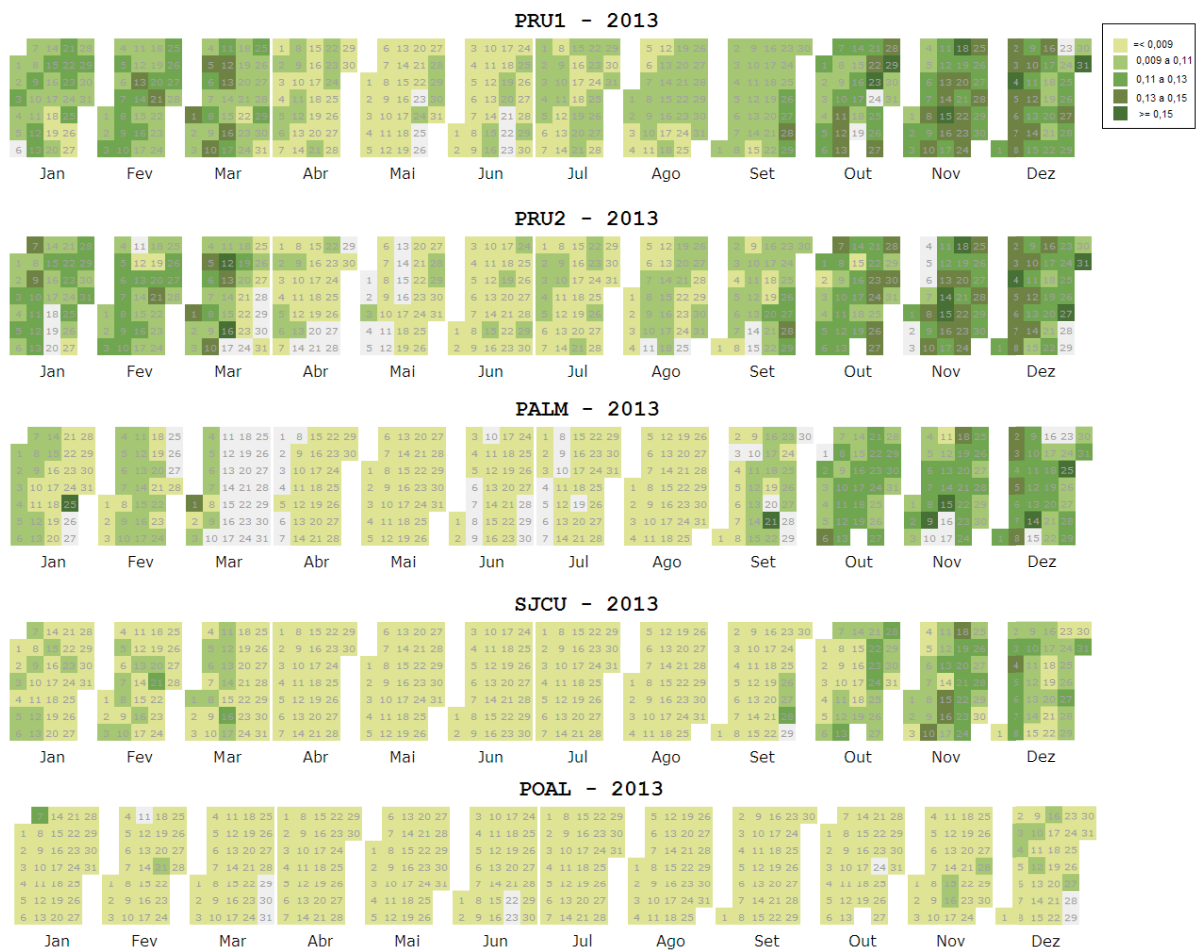


Fig. 4 - Média gerada para todos os dias de 2013 a partir do índice S4 para estações da rede CIGALA/CALIBRA.

A Fig. 5 mostra a distribuição do índice S4 no Brasil durante os meses de junho e outubro de 2013. É notável que o mês de outubro sofre maior influência da cintilação atingindo picos de cintilação de até 2,4. Também é possível perceber

através da distribuição do índice S4 que a região mais afetada é onde estão as estações PRU1, PRU2 e PALM. A estação POAL e a SJCUC não sofrem a mesma influência da cintilação que as tais estações.

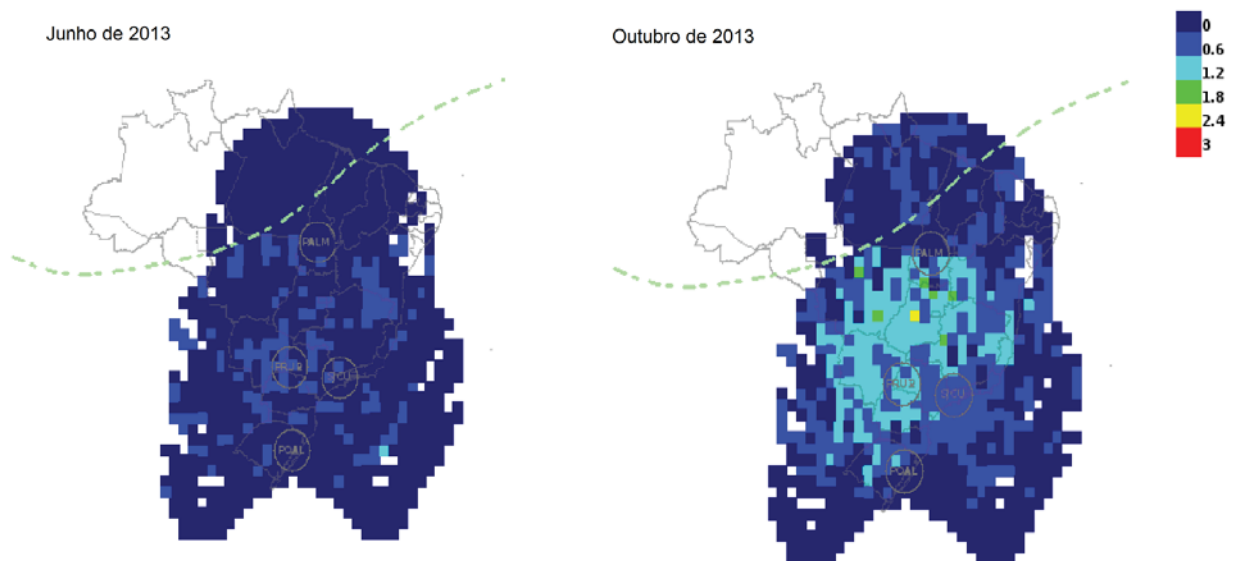


Fig. 5 - Distribuição do índice S4 pelo Brasil.

Como visto nas Fig. 4 e Fig. 5 uma das estações mais afetadas pela cintilação é a PRU2 e a menos afetada é a estação POAL. Devido a isto a Fig. 6 mostra o comportamento da cintilação durante todo o ano de 2013 para o satélite GPS (número 31), que obteve maior coleta de dados de índice S4 para as duas estações POAL e PRU2. Desta forma, é possível verificar para

um mesmo satélite a diferença de índices S4 no decorrer do ano e o comportamento da cintilação para as duas estações. Como pode ser visto as duas estações tem picos de cintilação no início e final do ano, como o esperado. Além disso, mesmo em períodos considerados de cintilação menos intensa PRU2 mantém valores de S4 altos, sempre maiores que POAL.

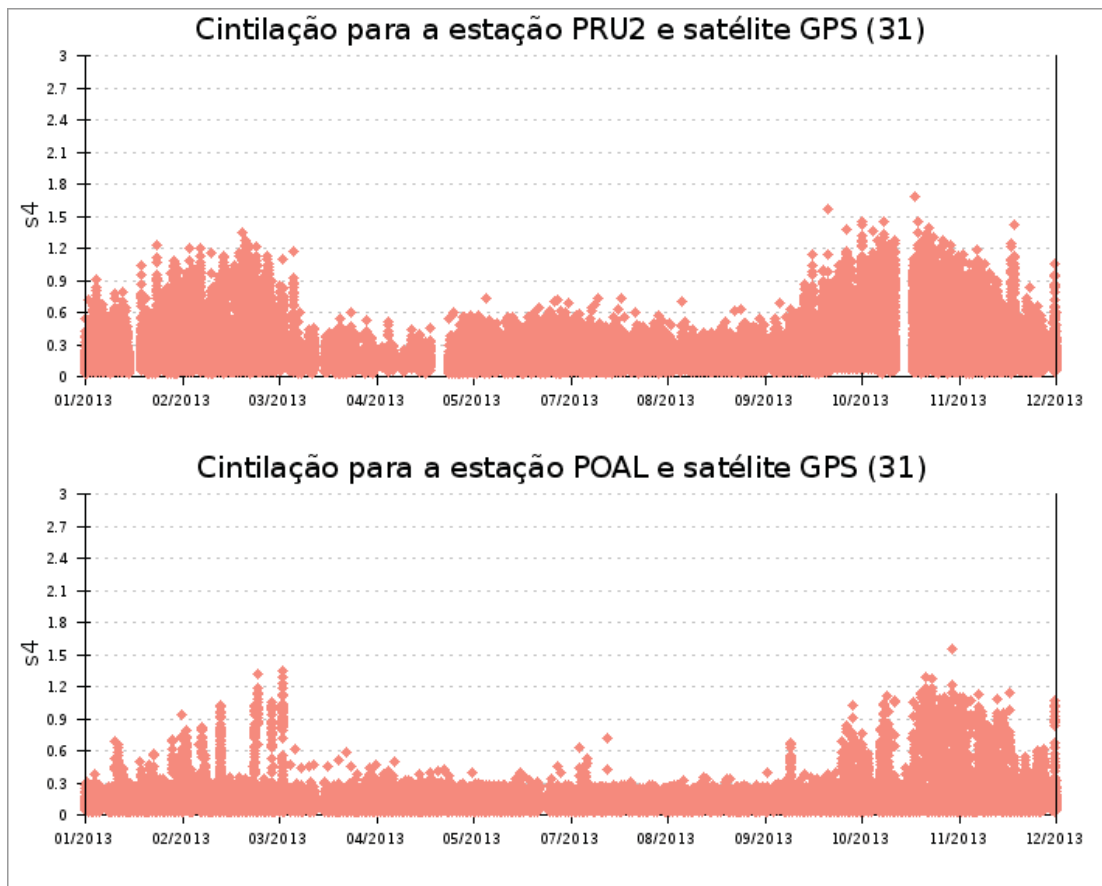


Fig. 6 - Índice S4 para 2013 nas estações PRU2 e POAL.

#### 4.2 Análise do índice S4 e do PP para estações de diferentes regiões do Brasil

Para realização dos experimentos no posicionamento foram selecionados dados dos 30 dias de junho e outubro do ano de 2013 para as estações PALM, PRU2, PRU1, POAL e SJC. As 5 estações estão em regiões diferentes do Brasil possibilitando a análise do posicionamento de acordo com cada região, exceto PRU1 e PRU2 que estão na mesma região.

Em algumas estações para os dias selecionados não houve dados coletados, por isso não há resultados destes períodos.

Na Fig. 7 estão os resultados obtidos no PP com dados das 00h00min às 06h00min para

a estação PRU1. Os gráficos **a** e **b** mostram, respectivamente, o índice S4 e o EMQ 3D obtido no PP para o mês de junho. Já os gráficos **c** e **d** mostram o índice S4 e o EMQ 3D para mês de outubro. Em outubro os resultados do posicionamento atingiram valores de EMQ 3D superiores a 4m, chegando 4,19 m. O mês de junho atingiu 1,68 m no PP, um erro considerável para um período de cintilação moderada.

Relacionando o índice S4 com o PP é notável que a cintilação influencia no posicionamento. Note que outubro obteve valores de S4 maiores que junho e isso foi refletido no erro obtido no posicionamento.



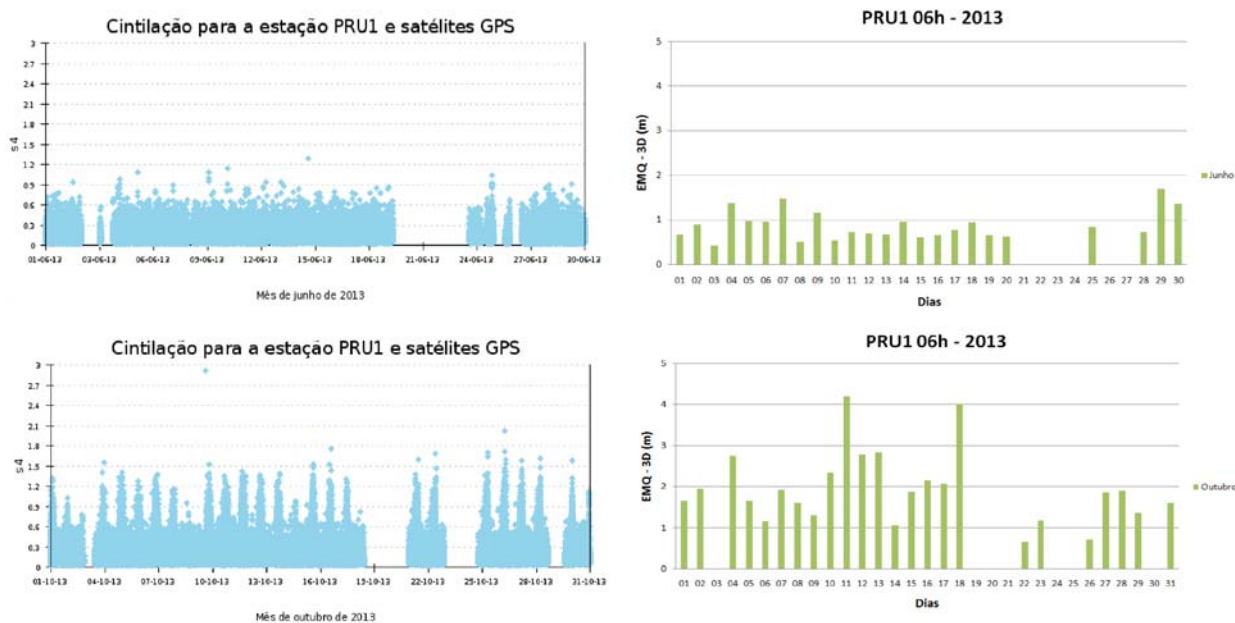


Fig. 7 - Dados de S4 e EMQ para a estação PRU1 em 2013, sendo os gráficos a e b referente ao mês de junho e c e d referente ao mês de outubro.

Na Fig. 8 estão os resultados para a estação PRU2, sendo que os gráficos **a** e **b** mostram o índice S4 e o EMQ respectivamente para o mês de junho, assim como os gráficos **c** e **d** mostram o índice S4 e o EMQ para mês de outubro. Nessa estação, no mês de outubro atingiu-se 4,30m

no PP. Já junho atingiu apenas 1,66m. Assim como a estação PRU1, a PRU2 manteve índices menores de S4 para junho e neste mês os erros no PP também foram menores como o esperado para o período.

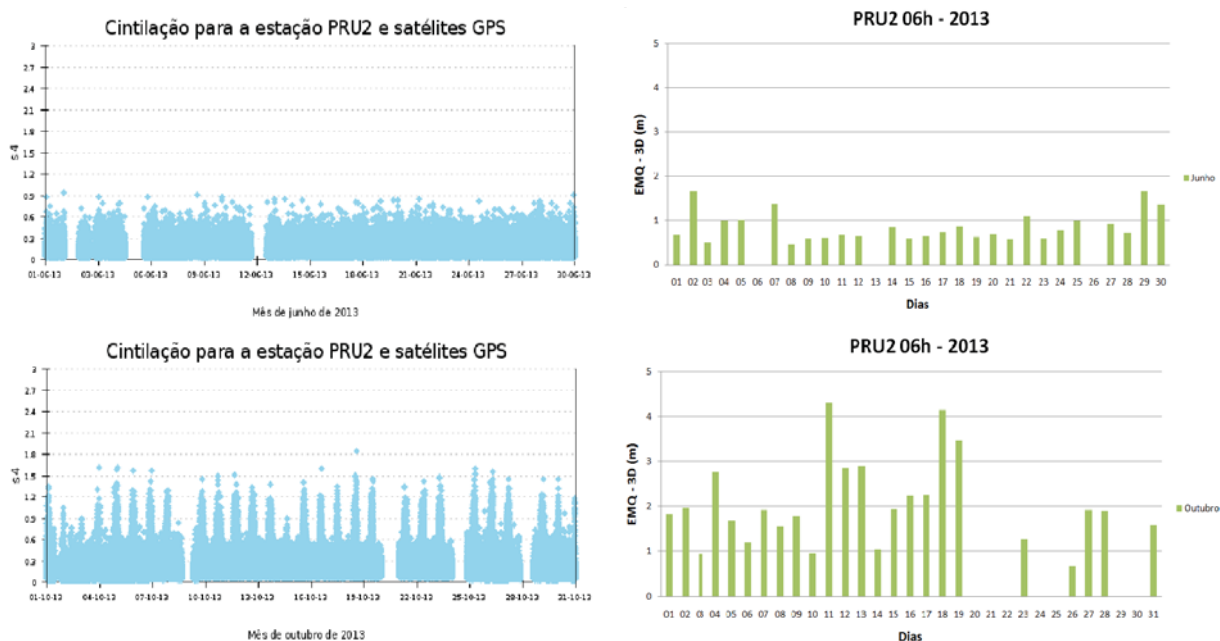


Fig. 8 - Dados de S4 e EMQ para a estação PRU2 em 2013 sendo os gráficos a e b referente ao mês de junho e c e d referente ao mês de outubro.

Na Fig. 9 estão os valores de S4 e EMQ 3D para a estação POAL. Os gráficos **a** e **b** mostram o índice S4 e o EMQ respectivamente para o mês

de junho, sendo que em junho o EMQ atingiu 1,65 m. Já os gráficos **c** e **d** mostram o índice S4 e o EMQ para mês de outubro, sendo que o

EMQ atingiu 2,84 m.

Apesar da estação POAL não sofrer forte influencia da cintilação, o erro do PP foi ampliado no mês de outubro, mas os valores do PP em outubro são muito inferiores aos obtidos nas estações PRU1 e PRU2 no mesmo período.

Na Fig. 10 estão os resultados para o período das 00h00min às 06h00min para a estação PALM. Os gráficos a e b mostram o

índice S4 e o EMQ 3D respectivamente para o mês de junho. O mês de junho atingiu EMQ de 1,82m. Os gráficos c e d mostram o índice S4 e o EMQ 3D para mês de outubro. Em outubro o EMQ atingiu 3,75 m.

Os valores de EMQ para PALM não foram mais altos do que para PRU1 e PRU2 no mês de outubro, mas em junho PALM obteve erros maiores do que as duas estações.

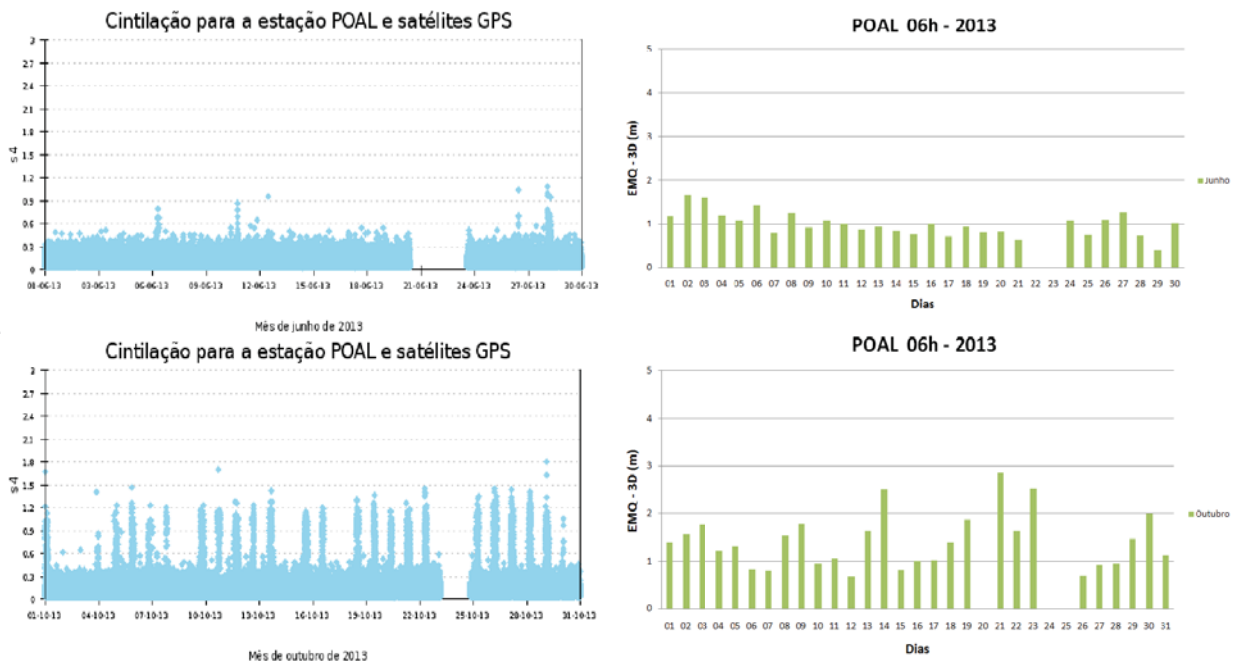


Fig. 9 - Dados de S4 e EMQ para a estação POAL em 2013, sendo os gráficos a e b referente ao mês de junho e c e d referente ao mês de outubro.

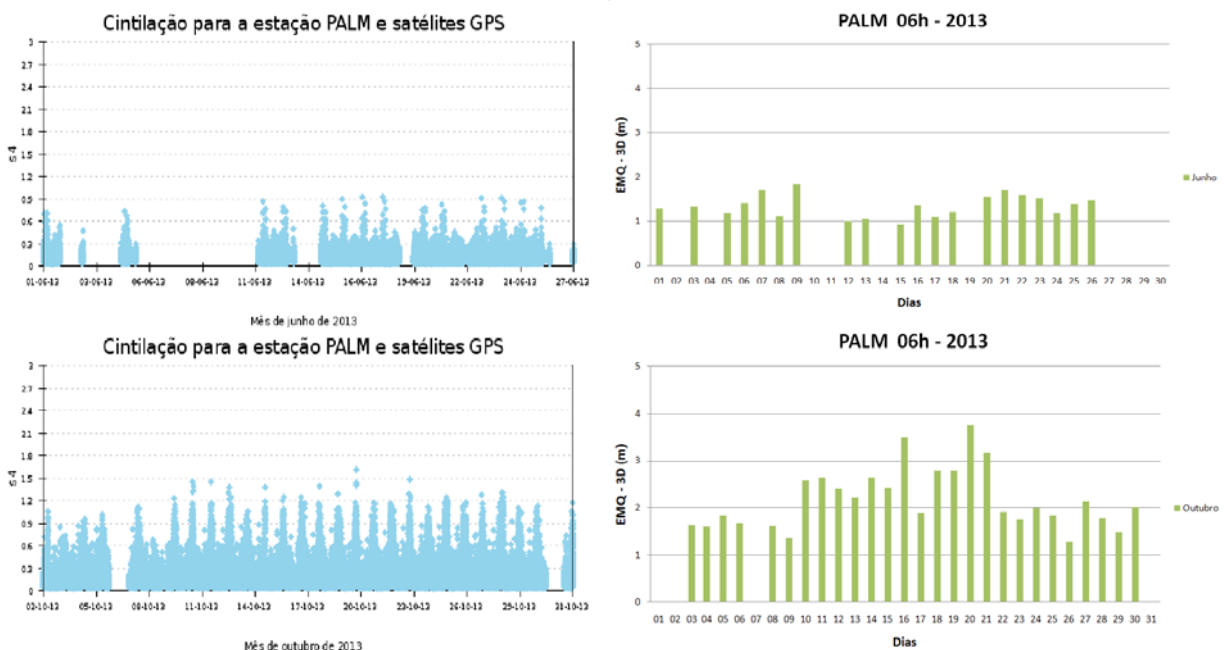


Fig. 10 - Dados de S4 e EMQ para a estação PALM em 2013, sendo os gráficos a e b referente ao mês de junho e c e d referente ao mês de outubro.

Na Fig. 11 estão os resultados obtidos no posicionamento para a estação SJCUC. Na Fig. 11 **c** e **d** são apresentados o índice S4 e EMQ para o mês de outubro, sendo que em outubro o EMQ atingiu 3,88 m. Já na Fig. 11 **a** e **b** são vistos o

índice S4 e o EMQ para o mês de junho. Note que o erro no PP atingiu 1,37 m. Esta estação atingiu índices menores que PRU1 e PRU2, mas também foi fortemente afetada pela cintilação.



Fig. 11 - Dados de S4 e EMQ para a estação SJCUC em 2013, sendo os gráficos a e b referente ao mês de junho e c e d referente ao mês de outubro.

### 4.3 ANÁLISE DO EMQ MÉDIO PARA TODAS AS ESTAÇÕES

A Fig. 12 mostra o EMQ médio do PP para os meses de junho e outubro para as 5 estações selecionadas durante o período das 00h00min as 06h00min. O EMQ Médio para PALM, PRU1, PRU2, SJCUC e POAL foram mais altos em outubro do que para junho, como o esperado, pois outubro é o período com maior

ocorrência de cintilação. A estação que obteve EMQ Médio mais alto em outubro foi a estação SJCUC, esta estação está localizada próxima as estações PRU1 e PRU2. Apesar das estações PRU1 e PRU2 obterem erros maiores no EMQ houve muita perda de dados no período analisado, possibilitando um EMQ médio maior para a estação SJCUC como pode ser visto na Fig. 12.

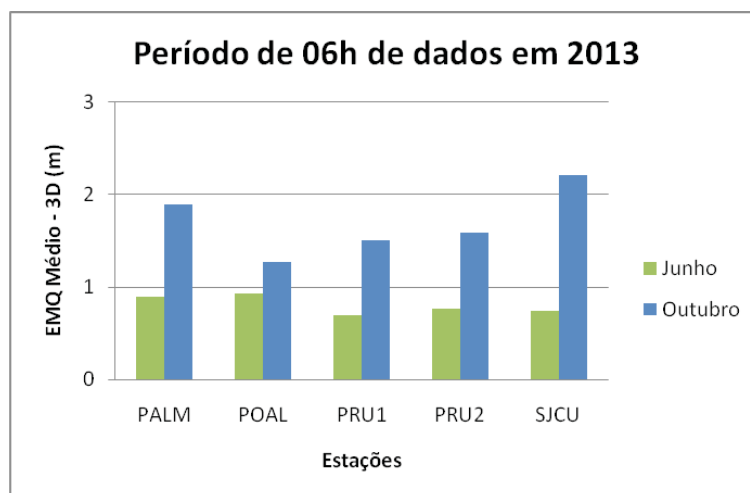


Fig. 12 - EMQ Médio para as estações da rede CIGALA/CALIBRA

## 5. CONCLUSÃO

As análises realizadas para o ano de 2013 utilizando as 5 estações da rede CIGALA/CALIBRA mostram como o índice S4 se comporta ao longo do ano e como a cintilação pode afetar no posicionamento.

Nota-se que os meses de outubro, novembro e dezembro são mais afetados pela cintilação ionosférica, pois, foram obtidos valores de S4 maiores que 0,7 e 1 como o estabelecido pelas referências Tiwari *et al.* (2011) e Conker *et al.* (2003) para períodos de cintilação intensa. Já os meses de maio, junho e julho são os menos atingidos por tal efeito.

Sobre os resultados do PP para todas as estações, constata-se que o EMQ obtido durante o mês de outubro foi maior do que no mês de junho. Como esperado, a partir dos testes realizados verifica-se que a cintilação ionosférica tem forte influência no posicionamento, principalmente em períodos do dia considerados mais afetados pela cintilação, proporcionando em algumas estações erros superiores a 4 metros. Estes erros são muito relevantes para o método de posicionamento empregado.

O EMQ médio também foi maior para o mês de outubro para todas as estações. A estação mais afetada pela cintilação são as estações mais próximas da anomalia equatorial como as estações PRU1, PRU2, PALM e SJCUC; já a estação POAL foi a que mostrou menos influência da cintilação, sendo esta estação a mais afastada da anomalia equatorial.

## AGRADECIMENTOS

À FAPESP pelo financiamento da bolsa do primeiro autor (processo 2012/16110-7) e pelo projeto Regular da segunda autora (processo 2012/19906-7). Ao CNPq pela bolsa de produtividade em pesquisa para a segunda autora e ao projeto Universal (processo 470112/2012-3). Aos projetos CIGALA e CALIBRA financiados pelo programa FP7-GALILEO-2011-GSA-1a (MONICO *et al.*, 2012) pelo acesso ao banco de dados.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDERSON, D., B. REINISCH C. VALLADARE, J. CHAU, and O. VELIZ. **Forecasting the occurrence of ionospheric scintillation activity in the equatorial**

**ionosphere on a day-to-day basis.** Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, Vol. 66 (17), DOI:10.1016/j.jastp.2004.07.010. 1567-1572p.2004.

AGUIAR, C. R. **Grade ionosférica para aplicações em posicionamento e navegação com GNSS.** Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, Faculdade de Ciências e Tecnologia da UNESP, Presidente Prudente. 256f. 2010.

ALVES, D. B. M. **Posicionamento Baseado em redes GPS utilizando o conceito de estação virtual.** Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) – Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente. 160p. 2008.

CAMARGO, P. O. **Modelo regional da ionosfera para uso em posicionamento com receptores GPS de uma frequência.** 1999. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 199f. 191f.

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**, Vol. 38 (1).1-23p. 2003.

DAVIES, K. **Ionospheric Radio.** London: Peter Peregrinus Ltd., 1990. 580p.

H O F M A N N - W E L L E N H O F, B . ; LICHTENEGGER, H.; WASLE, E. **GNSS – Global navigation satellite systems, GPS, GLONASS, Galileo and more.** Springer-Verlage Wien, 2008. 501p.

MATSUOKA, M. T. **Influência de Diferentes Condições da Ionosfera no Posicionamento por Ponto com GPS: Avaliação na região brasileira.** 2007. 263 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós Graduação em Ciências Cartográficas, Faculdade de Ciências e Tecnologia da UNESP, Presidente Prudente.

MATSUOKA, M. T.; CAMARGO, P. O. Correção ionosférica utilizando os mapas globais do TEC do IGS: Avaliação no posicionamento por ponto na região brasileira. **Boletim Ciências Geodésicas**, sec. Artigos, Curitiba, v. 13, nº 2, p.253-270, jul-dez, 2007. (<http://ojs.c3sl.ufpr.br/ojs2/index.php/bcg/article/view/10727/7127>).

- MENDONÇA, M. A. M. **Investigação da cintilação Ionosférica no Brasil e seus efeitos no posicionamento por GNSS**. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente. 144p. 2013.
- MENDONÇA, M. A. M.; MONICO, J. F. G.; MOTOKI, G. M. **Efeitos da cintilação ionosférica na agricultura de precisão: um estudo de caso**, 2012. Disponível em: <[http://docs.fct.unesp.br/departamentos/cartografia/eventos/2012\\_III\\_SBG/\\_artigos/A115.pdf](http://docs.fct.unesp.br/departamentos/cartografia/eventos/2012_III_SBG/_artigos/A115.pdf)>. Acesso em: mar. 2014.
- MONICO, J. F. G.; FRANCESCHI, G.; BOUGARD, B.; AQUINO, M.; SOLEY, M. CIGALA: A FP7 innovative activity to tackle the threat of ionospheric scintillation to GNSS operations in Latin America. **Revista Brasileira de Cartografia**, nº 64/6, p. 767-779, 2012.
- MONICO, J. F. G.. **Posicionamento pelo GNSS: Fundamentos, Definição e Aplicação**. 2 ed. São Paulo: Editora UNESP, 2008. 476p.
- REZENDE, L. F. C., E. R. DE PAULA, S. STEPHANY, I. J. KANTOR, M. T. A. H. MUELLA, P. M. DE SIQUEIRA, and K. S. CORREA. Survey and prediction of the ionospheric scintillation using data mining techniques. **Space Weather**. S06D09, DOI:10.1029/2009SW000532. 1-10p.2010.
- 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 relativo. **Revista Brasileira de Cartografia**, nº 65/1, p. 211-226, 2012.
- SAHAI, Y.; FAGUNDES, P.R.; BITTENCOURT, J.A. Transequatorial F\*region ionospheric plasma bubbles: solar cycle effects. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v.62, n.15, 1377-1383p. Oct. 2000.
- SALOMONI, C. S.; MATSUOKA M. T.; SOUZA, S. F.; CAMARGO, P. O. Análise e comparação do comportamento da ionosfera e do posicionamento por ponto em períodos de alta e baixa atividade solar. **Boletim Ciências Geodésicas**, sec. Artigos, Curitiba, v. 15, nº 3, p.333-351 jul-set, 2009. (<http://ojs.c3sl.ufpr.br/ojs2/index.php/bcg/article/view/15511/10362>).
- SEEBER, G. **Satellite Geodesy: Foundations, Methods, and Applications**. Berlin, New York: Walter de Gruyter, 2003. 589p.
- SILVA, H. A.; MONICO, J. F. G.; MARQUES, H. A., Análise de séries temporais de coordenadas GNSS sob efeitos da cintilação ionosférica, **2012, Anais do III Simpósio Brasileiro de Geomática**, v.1. p. 228-233.
- SKONE, S.; KNUDSEN, K.; DE JONG, M. Limitations in GPS receiver tracking performance under ionospheric scintillation conditions. **Phys. Chem. Earth (A)**, v. 26, n. 6-8, p. 613-621, 2001.
- TIWARI, R.; SKONE, S.; TIWARI, S.; STRANGWAYS, H. J. **3WBM Mod Assisted PLL GPS Software Receiver for Mitigating Scintillation Affect in High Latitude Region. IEEE, 2011**. Disponível em: <<http://www.ursi.org/proceedings/procGA11/ursi/FG-4.pdf>>. Acesso em: mar. 2014.
- VANI, B. C.; SHIMABUKURO, M. H.; MONICO, J. F. G. ISMR query tool: retrieval, visualization and analysis of ionospheric scintillation data. In: **MIMOSA Workshop: "Supporting Space Weather Activities in South America"** in São José dos Campos (Brazil), February 26th. 1-32p. 2013.
- WERNICK, A. W., ALFONSI, L., MATERASSI, M. **Ionospheric irregularities, scintillation and its effect on systems**. Acta Geophysica Polonica. Vol. 52, No 2. 1-13p.2004.