

## EFEITOS DA CINTILAÇÃO IONOSFÉRICA NA AGRICULTURA DE PRECISÃO: UM ESTUDO DE CASO

MARCO AURÉLIO MORAES DE MENDONÇA<sup>1</sup>  
JOÃO FRANCISCO GALERA MONICO<sup>2</sup>  
GILBERTO MAKOTO MOTOKI<sup>3</sup>

<sup>1 2</sup> Universidade Estadual Paulista - Unesp  
Faculdade de Ciências e Tecnologia - FCT  
<sup>1</sup> Programa de Pós Graduação em Ciências Cartográficas  
<sup>2</sup> Departamento de Cartografia FCT UNESP

Presidente Prudente – SP  
<sup>1</sup> mammendonca@gmail.com  
<sup>2</sup> galera@fct.unesp.br

<sup>3</sup> Consultgel Ltda.  
gmakoto@gmail.com

**RESUMO** – Esse artigo visa dar um panorama geral da problemática causada pela Cintilação Ionosférica (CI) no posicionamento por GNSS RTK voltado para a Agricultura de Precisão (AP). Para isso, foi realizado um estudo de caso na unidade Cruz Alta da usina de refinamento de açúcar e etanol Guarani S.A., onde dois receptores, ligados a uma mesma antena através de um *splitter* foram conectados a um trator, sendo, um deles, um sistema comercial e consolidado no mercado, e outro experimental com alterações no firmware que permitem, teoricamente, um melhor desempenho sob eventos de cintilação ionosférica. Os resultados mostraram um melhor desempenho do receptor experimental, mas que há mudanças que podem ser feitas no hardware e firmware para melhorar seu desempenho. Com a chegada do próximo pico de atividade solar (previsto para Março de 2013), os eventos de cintilação se tornarão cada vez mais frequentes e os sistemas de posicionamento devem se adequar para garantir a integridade das soluções apresentadas.

**Palavras chave:** Ionosfera, Cintilação, Agricultura, RTK.

**ABSTRACT** – This paper aims to provide an approach to the problem of Ionospheric Scintillation (IS) in the GNSS RTK positioning used in Precision Farming (PF). A case study was realized in the “Cruz Alta” unity of sugar and ethanol refining of the Guarani S.A. refinery, where two receivers were deployed sharing the same antenna through a signal splitter equipment, and then connected to a tractor. One of those equipment is a commercial brand, with a consolidated position in the PF market, and, the other one, an experimental receiver with a firmware tuning that gives, at least theoretically, better results during IS events. The results show a better performance of the experimental receiver, but also shows that some changes in the hardware and firmware can improve the receiver performance. With the upcoming solar activity maximum (March 2013), the scintillation events will become more frequent, and the positioning system must be adequate to ensure the integrity of the presented solutions.

**Key words:** Ionosphere, Scintillation, Farming, RTK.

### 1 INTRODUÇÃO

O GNSS (*Global Navigation Satellite System*), consiste num conjunto de satélites que enviam sinais eletromagnéticos, com informações embutidas, em direção à Terra visando proporcionar condições para o posicionamento na superfície terrestre. Esses sinais, enviados pelo GPS (*Global Positioning System*),

GLONASS (*GLO*bal'naya *NA*vigatsionnaya *S*putnikovaya *S*istema) e outros sistemas futuros, sofrem algumas interferências ao refratarem sobre a atmosfera terrestre, pois esta é composta de diferentes elementos, em diferentes densidades e diferentes comportamentos, causando assim, certa contribuição a algumas alterações que ocorrem na propagação da onda eletromagnética

modulada que chega à superfície terrestre (MONICO, 2008).

Por todo o caminho que o sinal percorre entre o satélite e a antena do receptor, há uma série de efeitos que acabam por interferir no sinal. No contexto da propagação de sinais, esses efeitos vão desde a atenuação da potência do sinal, até alterações na direção de propagação e velocidade da onda. Um desses efeitos que mais danifica o sinal é a Cintilação Ionosférica (CI) (MONICO, 2008).

Tendo em vista tal problemática, foi realizado, pela primeira vez no Brasil, um experimento na unidade Cruz Alta da Usina Guarani S.A., visando identificar a ocorrência de CI e analisar o desempenho de dois receptores GNSS atuando em condições semelhantes de ambiente. Um deles, um sistema comercial de piloto automático de tratores, que utiliza essencialmente o GNSS/RTK (*Real Time Kinematics*), bem consolidado no mercado, e o outro, um sistema experimental, com melhorias no firmware (versão beta) que, teoricamente, possibilitariam um melhor desempenho sob eventos de CI, atuando da mesma forma de processamento (RTK). Esses receptores serão identificados neste trabalho como receptor dos fabricantes A e B, respectivamente.

Visando alcançar esses objetivos, apresenta-se a seguir uma breve descrição da Ionosfera, CI e Agricultura de Precisão, seguidos de uma breve explanação dos experimentos e resultados obtidos.

### 1.1 Ionosfera

A ionosfera é a camada da atmosfera terrestre composta por elementos não neutros que interagem com o campo magnético terrestre e são solidários aos acontecimentos também da atmosfera solar (KELLEY, 2009).

Essa camada da atmosfera se torna ionizada devido a interações entre seus gases componentes, que apesar de rarefeitos continuam presentes, e as partículas lançadas pelo Sol devido à suas atividades de transformação de massa em energia, principalmente nas bandas dos raios-X e ultravioleta (DAVIES, 1990; KIRCHOFF, 1991; McNAMARA, 1991). Essas partículas lançadas são trazidas pelo chamado “vento solar”, que, nada mais é, do que uma onda de partículas subatômicas livres atiradas ao espaço que acabam por colidir com a atmosfera terrestre e, excitando os átomos vizinhos, acaba por ionizar a camada externa da atmosfera, aumentando o TEC (*Total Electron Content*), que, representa a densidade de elétrons livres em uma parte da atmosfera (KELLEY, 2009).

Deve-se ainda levar em conta os efeitos da Anomalia e Ionização Equatorial (AIE), e da Anomalia Magnética do Atlântico Sul (AMAS), que acabam por criar uma mecânica diferente de ionização e de comportamento da ionosfera (JASKULSKI et al. 2006; KELLEY, 2009).

### 1.2 Cintilação Ionosférica

A CI é um dos efeitos que ocorre na ionosfera, que acaba por degradar o sinal enviado, devido a variações na

quantidade de elétrons livres pelos processos de ionização e, conseqüentemente, na formação do campo magnético local (CONKER et al. 2003). Quando o campo magnético é, portanto, alterado durante a passagem do sinal, este pode sofrer variações diretamente proporcionais à intensidade dessas mudanças.

Essas alterações que degradam o sinal podem ser estimadas através de parâmetros de cintilação. Os mais utilizados na literatura são os índices S4, e Phi60 (CONKER et al. 2003).

O índice S4 (Equação 1) dá uma ideia de como a intensidade do sinal (I) que chega ao receptor está variando, o que está diretamente correlacionado com o efeito da CI.

$$S4 = \frac{\langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2}{\langle I \rangle^2} \quad (1)$$

Já o índice phi60 (ou sigma-phi), mostra a variação da medida de fase da onda portadora ( $\phi$ ) no receptor nos últimos 60 segundos, e é calculado como mostra a Equação 2.

$$\sigma\phi = \sqrt{\langle \phi^2 \rangle - \langle \phi \rangle^2} \quad (2)$$

Esses parâmetros serão utilizados para analisar os erros no posicionamento.

### 1.3 Agricultura de Precisão

A Agricultura de Precisão (AP) consiste na abordagem dos campos de colheita da forma como realmente são: Não-Homogêneos. Isso afeta a forma com que deve ocorrer o plantio, a colheita e a adubação e manutenção do solo. Dessa forma, deve-se levar em conta a variabilidade espacial das lavouras, e é aí que a tecnologia de posicionamento por satélites apresenta papel fundamental para que seja feita a correta administração desses atributos, da forma mais otimizada possível, reduzindo assim o uso de insumos agrícolas e melhorando a qualidade e a produção dos campos de plantio (MOLIN, 2010).

Segundo Molin (2010), a AP deve atravessar as seguintes etapas:

- Acompanhamento da Lavoura;
- Geração dos mapas de colheita;
- Amostragem do solo;
- Análise do conjunto de dados;
- Interpretação dos mapas gerados;
- Medidas de correção;
- Acompanhamento da lavoura;
- etc...

Durante esse processo, em todas as fases o uso de informações georreferenciadas é importante, se não imprescindível, evidenciando assim a necessidade de informações confiáveis e integras, advindas dos sistemas de posicionamento por satélites.

No caso desse estudo, na Usina Guarani, há tratores guiados por sistemas de piloto automático

funcionando basicamente por posicionamento GNSS. Em um caso desses, erros acima da especificação dos equipamentos podem causar prejuízos no serviço (pisoteamento de cana, linhas de plantio tortas e etc), bem como interrupção total do serviço quando uma solução para a posição não é encontrada.

Portanto, para aplicações de AP em tempo real, a CI é um efeito que deve ser levado em consideração durante as etapas supracitadas.

## 2 EXPERIMENTO

O estudo de caso proposto, compõe-se de um experimento de campo, do pós-processamento dos dados e da avaliação dos resultados obtidos.

Primeiramente, na unidade Cruz Alta da Usina Guarani, foi instalada uma base de referência com o receptor PolaRxS da fabricante belga Septentrio, para que fossem calculados os parâmetros de atividade na ionosfera (S4 e Phi60). A figura 1 mostra a base instalada em primeiro plano, e, ao fundo, a instalação onde o receptor e o computador para coleta dos dados se encontravam.



Figura 1 – Base utilizada para a inferência dos parâmetros de atividade da ionosfera.

Em um dos tratores cedidos pela usina (figura 2), foram instalados os dois sistemas de posicionamento que dividiam a mesma antena através de um equipamento divisor de sinais (*splitter*).



Figura 2 – Trator utilizado no experimento. Destaque para as antenas GNSS e RTK (rádio) no topo da máquina.

Dessa forma, para que fosse feita a análise comparativa entre os fabricantes A e B, ambos os receptores foram ligados ao sistema elétrico do trator e coletaram dados no período das 22h 00m do dia 02/02/2012, até às 08h 49m do dia 03/02/2012, contemplando assim um período de aproximadamente 10 horas, com taxa de coleta de 5 segundos, com o trator parado em uma localidade que apresentava as dificuldades típicas da AP: terreno mal nivelado, pássaros ao redor, vegetação no entorno e etc. Apesar disso, o trator foi mantido próximo à antena (cerca de 100 metros), para que possíveis problemas de perda de sinal de rádio fossem eliminados das hipóteses.

Nessa configuração, o equipamento do fabricante A fornecia energia à antena, e gravava num arquivo a posição do trator. Já o equipamento do fabricante B, gravava apenas os dados brutos de observações GNSS, os quais foram processados posteriormente com as mesmas condições do receptor A: posicionamento por RTK, máscara de elevação de 10 graus e os sistemas GPS e GLONASS presentes na solução. A única diferença remanescente entre ambos os receptores, é que cada um utilizou sua própria base para o posicionamento. O receptor A utilizou a base existente da Usina Guarani, e o receptor B, a base que foi instalada em campo (figura 1). Isso se deve ao fato de a base já existente da usina estar em um sistema de referência próprio, e, além disso, não gravar os dados brutos para um pós-processamento, o que não possibilitaria análise dos resultados do receptor B.

## 3 RESULTADOS OBTIDOS

O primeiro resultado de interesse foram os parâmetros da ionosfera (S4 e Phi60) obtidos a partir do receptor PolaRxS, que indicam o comportamento da CI. Paralelamente obtiveram-se os resultados do posicionamento advindos dos receptores A e B equipados no trator, e que deveriam, em tese, marcar a mesma posição durante o período do levantamento. Serão apresentados os dois resultados, e uma seção com a análise comparativa entre as circunstâncias citadas.

### 3.1 Receptor base PolaRxS

Com o monitoramento da ionosfera feito pela estação base, chamada de OLMP, foram obtidos os parâmetros S4 e Phi60 de cintilação para aquela localidade. Nas figuras 3 e 4 esses parâmetros são mostrados. Na figura 3, as linhas amarela e vermelha representam, respectivamente, o limite entre cintilação fraca/moderada (0,25), e cintilação moderada/forte (0,4). Apesar de serem valores empíricos, pode-se observar por esse critério uma clara ocorrência de cintilação durante o período em questão.

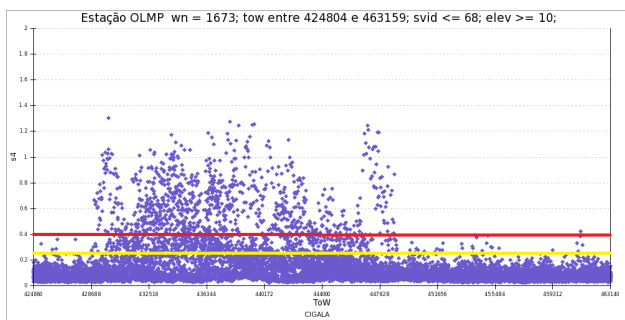


Figura 3 – Parâmetro S4 para o intervalo do experimento.

Na figura 4, a linha vermelha mostra a divisão, também empírica entre a ocorrência ou não de cintilação, mostrando mais uma vez uma bastante provável ocorrência desse evento.

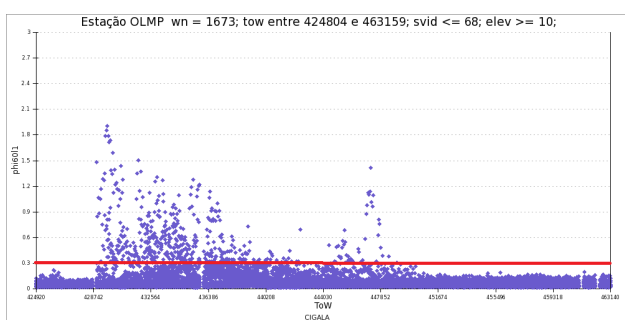


Figura 4 – Parâmetro Phi60 para o intervalo do experimento.

Numa última análise, as figuras mostram-se, visualmente, correlacionadas, evidenciando, mais uma vez, uma possível ocorrência desse evento, tornando assim o conjunto de dados obtidos válido para análise dos efeitos da CI

### 3.2 Receptores A e B

Quanto aos receptores instalados no trator, espera-se que, de alguma forma, mostrem os efeitos da cintilação ionosférica em suas coordenadas.

As figuras 5, 6 e 7 mostram os resultados para o receptor comercial A em suas componentes horizontal E, N, na projeção UTM, e a componente h, no referencial da base da Usina Guarani.

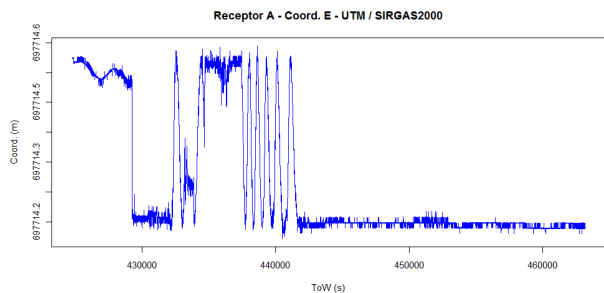


Figura 5 – Coordenada E, referente ao receptor do fabricante A.

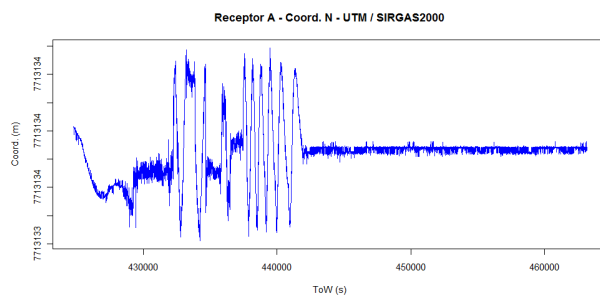


Figura 6 – Coordenada N, referente ao receptor do fabricante A.

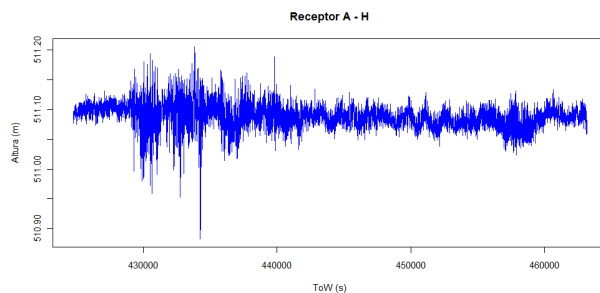


Figura 7 – Coordenada h, referente ao receptor do fabricante A.

Já as figuras 8, 9 e 10 mostram os mesmos resultados para o receptor do fabricante B em E, N na projeção UTM e altura h no referencial Sirgas2000.

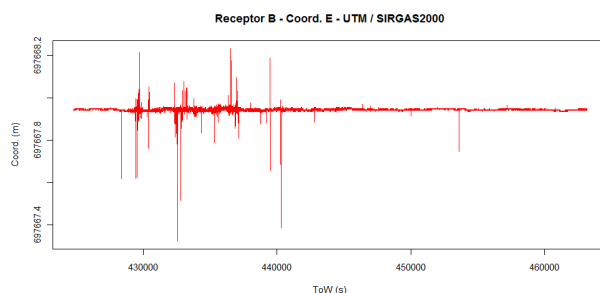


Figura 8 – Coordenada E, referente ao receptor do fabricante B.

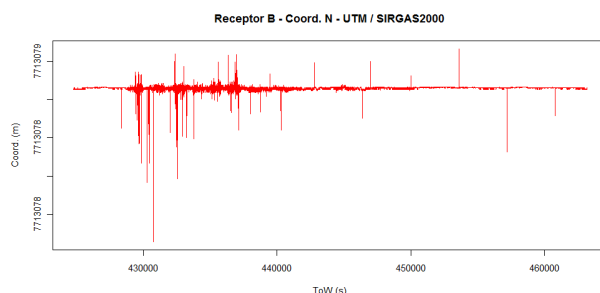


Figura 9 – Coordenada N, referente ao receptor do fabricante B.

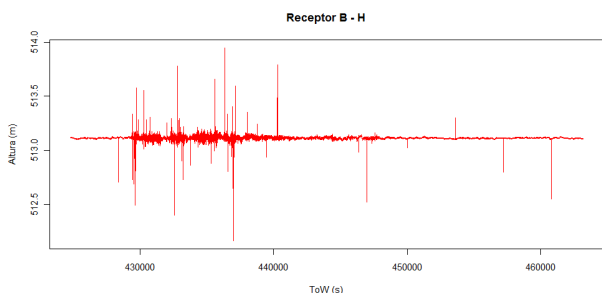


Figura 10 – Coordenada h, referente ao receptor do fabricante B.

Por fim, a tabela 1 mostra um quadro comparativo entre a média das coordenadas obtidas e seus respectivos desvios-padrão. Em verde, quando há melhoria da precisão, e vermelho quando há piora.

Tabela 1 – Sumário das coordenadas dos receptores A e B.

Receptor	E (UTM) (m)	N (UTM) (m)	h (m)
A	697714,3163 ± 0,109	7713133,562 ± 0,05	511,0881 ± 0,020
B	697667,945 ± 0,012	7713078,459 ± 0,013	513,1147 ± 0,023

Por esses resultados, pode-se observar um viés entre as coordenadas estimadas de ambos os receptores. Isso se deve ao fato de terem sido utilizadas bases diferentes para o RTK, com diferentes referenciais. No caso da base OLMP, utilizada no receptor B, as coordenadas foram estimadas no PPP (Posicionamento por Ponto Preciso), obtendo uma acurácia na casa centimétrica para todas as componentes. Já no caso da base da usina Guarani, usada para o receptor A, a coordenada foi obtida por posicionamento por ponto simples, com muito pouca acurácia, mostrando um erro de cerca de 50 metros na planimetria, e 2 metros na altimetria.

Observando então apenas os desvios-padrão das coordenadas estimadas, vê-se uma significativa melhoria na planimetria obtida pelo receptor B: quase 90% de precisão melhor em E e 60% em N. Apenas na componente h, os resultados se mostraram um pouco menos instáveis (cerca de 10% menos precisos). Essa deterioração na precisão da altura do receptor deve-se, provavelmente, a um algoritmo interno do receptor A que remove possíveis outliers da solução em tempo real.

### 3.3 Análise comparativa dos resultados

Para se comparar os dados de ambos os receptores, e também da base que coleta dados de atividade da ionosfera, realizou-se uma abordagem que avalia apenas a precisão das medidas, e não a acurácia, já que o receptor A encontra-se em um referencial desconhecido. Para tal, todas as séries temporais de coordenadas foram subtraídas de suas respectivas médias, compatibilizando assim os referenciais. Dessa forma, podem-se visualizar ambas as séries e analisar seus comportamentos conjuntamente.

A figura 11 mostra – nessa ordem – o índice S4, o índice Phi60 e as séries temporais de E, N e h de ambos os receptores (azul para o receptor A, e vermelho para B), e uma linha atravessando todos os gráficos marcando o início do evento da cintilação ionosférica, apenas para referência.

Pode-se observar pela Figura 11, que os parâmetros S4 e Phi60 começam a apresentar algum distúrbio um pouco antes do início dos efeitos nas coordenadas. A princípio, isso pode significar uma espécie de alerta para o usuário a respeito do efeito de CI, porém, mais experimentos estão sendo feitos para corroborar essa informação.

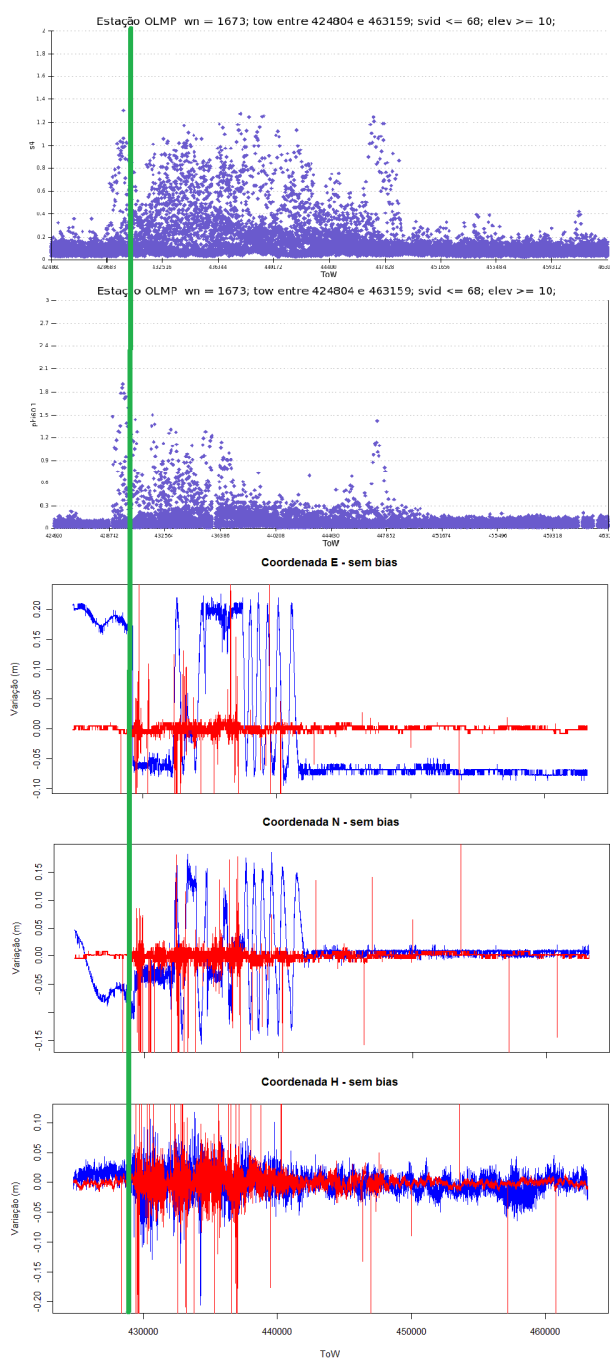


Figura 11 – Análise entre os receptores A e B, S4 e Phi60

Observa-se pela análise das figuras com ambos os receptores representados, que o receptor comercial A, antes e depois do evento de CI mostra variações dentro das especificações do equipamento de acordo com o manual, porém, durante o evento de CI por diversas vezes tem variações de aproximadamente 30 centímetros entre uma época e outra, e não se tratam de *outliers*, pois tais variações permanecem por um intervalo considerável. Como não há acesso aos processos internos desse receptor, suspeita-se que isso se deva à solução errada do vetor das ambiguidades dos satélites, causando erros na casa de um ciclo da fase, ou seja, aproximadamente 27 cm.

Já o receptor B, apresenta um comportamento bem mais estável, com exceção dos *outliers* presentes em algumas poucas épocas, que poderiam ser retirados do processamento com testes estatísticos em tempo real e de complexidade relativamente baixa. O que explicaria esse comportamento mais estável, portanto, são as melhorias realizadas no firmware do receptor, alterando parâmetros internos como os da malha de captura de fase, controle automático do ganho entre outros. Como o receptor B tem tecnologia patenteada, não há acesso a detalhes das melhorias desenvolvidas. Sabe-se apenas, que atuam nos parâmetros internos do equipamento.

#### 4 CONCLUSÕES

Com os resultados apresentados, pôde-se mostrar a importância do monitoramento da CI na AP. Foram citados os problemas que podem acontecer, e evidenciada uma situação onde um equipamento comercial – receptor A-, comumente utilizado para a agricultura, provavelmente falhou em resolver a ambiguidade durante um evento de cintilação, gerando um resultado não confiável, ou um falso-positivo, corroborando com a premissa de que a cintilação ainda é um efeito a ser estudado.

Mostrou-se também que o receptor B foi consideravelmente mais eficiente em mitigar o efeito da cintilação ionosférica por intermédio da adaptação de seus parâmetros de rastreamento para tal situação. Como esse receptor também tem tecnologia patenteada, não há acesso a detalhes da implementação dessas melhorias, porém, há o indicativo de que a CI é um problema passível de solução ou, ao menos, atenuação de seus efeitos no contexto da AP sem que seja necessária uma solução mais dispendiosa como integração de outros sensores na solução das coordenadas.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a colaboração da empresa Consultgel Ltda., Guarani S.A. pelo inestimável auxílio na realização desse experimento.

#### REFERÊNCIAS

CONKER, R.S., M.B. EL-ARINI, C.J. HEGARTY and T. HSIAO (2003): Modelling the Effects of Ionospheric

Scintillation on GPS/Satellite-Based Augmentation System Availability, **Radio Sci.**, 38 (1), 1001, doi:10.1029/2000RS002604, 2003.

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

JAKULSKI, T.; AVEIRO, H.C.; MOOR, L.P.; DENARDINI, C.M.; MURALIKRISHNA, P.; SCHUCH, N.J. Estudo do plasma ionosférico da Anomalia Magnética do Atlântico Sul (AMAS) utilizando Riômetros. In: XXI Congresso de iniciação Científica e Tecnologia em Engenharia: **Anais**. 2006

KELLEY, M.C.; **The Earth's ionosphere**: Plasma physics and electrodynamics. International Geophysics Series, vol 43. San Diego: Academic Press, 2006.

KIRCHHOFF V. W. J. H. **Introdução à geofísica espacial**. São Paulo: Nova Stella, Ed. USP/FAPESP, 1991

McNAMARA L.F. **The ionosphere**: communications, surveillance, and direction finding. Florida: Krieger Publishing Company, 1991

MOLIN, J. P. Conceito de Agricultura de Precisão. In: 1ª CONVENÇÃO DA REDE AGRICULTURA DE PRECISÃO, 2010, Piracicaba. **Anais**, 2010

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo GNSS**: descrição, fundamentos e aplicações. 2 ed. São Paulo: Unesp, 2008. 476p.