

Avaliação da influência da ionosfera no erro de localização de plataformas de coleta de dados nos períodos de alta e baixa atividade solar

Áurea Aparecia da Silva¹
Wilson Yamaguti¹
Hélio Koiti Kuga²
Cláudia Celeste Celestino³

¹DSE – Divisão de Sistemas Espaciais, INPE, Brasil
aurea.silva@dss.inpe.br;
yamaguti@dss.inpe.br

²DMC – Divisão de Mecânica Espacial e Controle, INPE, Brasil
hkk@dem.inpe.br

³UFABC – Universidade Federal do ABC, Brasil
claudiacelestec@yahoo.com.br

Abstract: The location of Data Collection Platforms (DCPs) is obtained by Doppler shift measurements, considering the Brazilian System of Environmental Data Collection. The ionosphere can be considered as an important error source to the platforms location, due to its dispersive environment characterized by ions and free electrons. The representation of ionosphere is made by the measurement of Total Electron Content (TEC). The ionospheric effects are related to the geographical location, the season, hour of the day, geomagnetic and solar activities, and others. This work analyzes two different ionospheric models that describe TEC values (IONEX and IRI), considering high and low solar activity periods and using Doppler shift measurement related to SCD-2 satellite. The first analyses show that, in high solar activity, one of the models (IONEX) describes better the TEC values than other. So, the platform location errors can be minimized when IONEX model represents the ionosphere. On the other hand, in low solar activity periods both models represent TEC values in a similar way. Results of the analyses show that the ionospheric effects on transmission delays are significant (between ten to hundred meters) and should be considered to reduce DCP location errors, mainly in high solar activity periods, using the IONEX model.

Palavras-chave: Brazilian System of Environmental Data Collection, Data Collection Platforms, Total Electron Content, location, ionosphere, Sistema Brasileiro de Coletas de Dados Ambientais, Plataforma de Coleta de Dados, Conteúdo Total de Elétrons, localização, ionosfera.

1. Introdução

O Sistema Brasileiro de Coleta de Dados Ambiental é atualmente composto pelos satélites SCD-1 e SCD-2, pelas plataformas de coleta de dados e por estações brasileiras de recepção de coletas de dados ambientais que estão localizadas em Cuiabá e Alcântara. Na Figura 1a é apresentada uma típica plataforma de coleta de dados enquanto nas Figuras 1b e 1c são apresentadas uma ilustração do Sistema de Coleta de Dados Ambientais Brasileiro e o segmento espacial do sistema, respectivamente.

Neste sistema, o satélite trabalha como um retransmissor de mensagem. Uma ligação de comunicação entre uma Plataforma de Coleta de Dados (PCD) e uma estação de recepção é estabelecida por um dos satélites. As mensagens das PCDs retransmitidas pelos satélites e recebidas pelas estações de Cuiabá ou Alcântara são enviadas ao Centro de Missão de Coleta de Dados localizado no Centro Regional do Nordeste, Natal, RN, onde os dados são processados, armazenados e distribuídos para os usuários. Os usuários recebem os dados processados em torno de 30 minutos após a passagem do satélite.

A localização geográfica da PCD pode ser feita usando o desvio Doppler. As PCDs emitem sinais contendo dados para os satélites na frequência UHF (401 MHz), enlace de subida ou ascendente, afetado pelo efeito Doppler. Estes sinais podem ser retransmitidos por um satélite para a estação de recepção. Na estação de recepção são feitas as medidas de frequência do enlace de subida, bem como recuperação dos dados das PCDs. Os dados coletados na estação são retransmitidos, após a passagem do satélite, para o Centro de Missão de Coleta de Dados. Os efeitos da ionosfera e da troposfera no enlace descendente (satélite para a estação de recepção, realizada em banda S (2.267,52 MHz) foram desprezados.

Como os sinais transmitidos pelas PCDs se espalham na atmosfera terrestre, entre outros fatores, estes são influenciados pelos elementos químicos que compõem a extensa camada da atmosfera terrestre resultando em atrasos de propagação. Em consequência, podem ser gerados erros nas coordenadas finais providas aos usuários do sistema.

A ionosfera e a troposfera podem ser uma fonte importante de erros de localização de plataformas. Os erros devidos à ionosfera podem variar de poucos metros a dezenas de metros, enquanto que na troposfera os erros no zênite estão geralmente entre dois e três metros [1, 2 e 3].

O erro de localização associado à ionosfera é diretamente proporcional ao conteúdo total de elétrons (TEC – Total Electron Content) presente ao longo da trajetória percorrida pelo sinal na ionosfera, e inversamente proporcional ao quadrado da frequência do sinal. O TEC, e consequentemente, o erro devido à ionosfera, varia no tempo e no espaço e é influenciado por diversas variáveis, tais como: ciclo solar, época do ano, hora do dia, localização geográfica, atividade geomagnética, entre outros [4]. Dessa forma, torna-se importante conhecer o comportamento da ionosfera, levando em conta as suas dependências com a localização e o tempo.

Com o propósito de minimizar o erro de localização devido aos efeitos ionosféricos, esse trabalho apresenta um estudo de correção ionosférica na propagação dos sinais do satélite, utilizando diferentes modelos e em períodos de alta e baixa atividade solar, entre outras dependências. Os modelos que descrevem a ionosfera através dos valores de TEC (Total Electron Content) foram obtidos através do IRI - International Reference Ionosphere [5] e do IONEX - IONosphere map Exchange [6].

Devido à alta radiação solar na região equatorial e aos campos magnético e elétrico da Terra, a densidade de elétrons na ionosfera sofre sensíveis consequências principalmente nas regiões brasileira. Após alguns testes observou-se que, para tal região, se faz necessário o uso de um modelo da ionosfera que levasse em conta esse efeito denominado anomalia equatorial, dependendo da intensidade da atividade solar no período em que a localização é realizada. Então, um estudo detalhado apresenta os valores de TEC e as respectivas localizações de modo que esses erros sejam da melhor maneira minimizados. Para tal, houve uma comparação entre os dois modelos citados, levando em conta o período do dia, o ano de alta ou baixa atividade solar e a região em que o efeito ionosférico pode causar o maior erro na localização.

O trabalho consiste em um grupo de dados ideais que utilizam a PCD 32590 (localizada em Cuiabá, a 15.5546°S e 56.0698°W) e o satélite SCD-2, levando se em conta as seguintes condições: horário de passagem do satélite entre 15 e 22 UT; período de alta atividade solar em 2001 e período de baixa atividade solar em 2009.

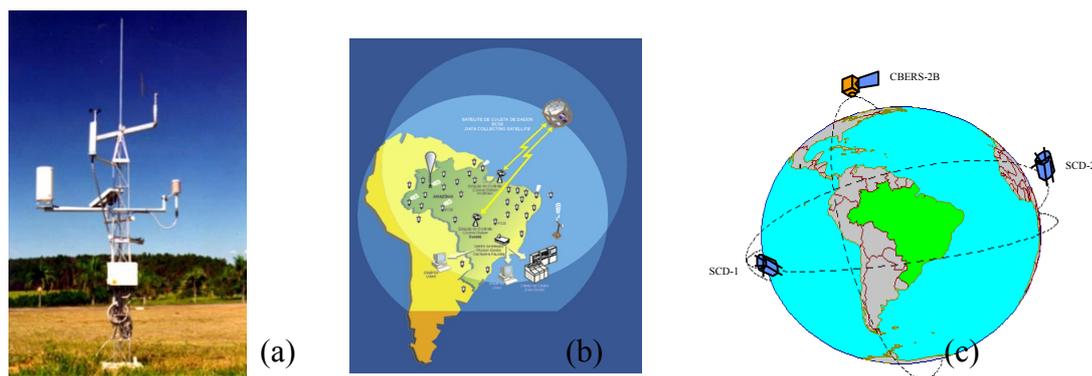


Figura 1 – a) Plataforma de Coleta de Dados típica, b) Ilustração do Sistema Brasileiro de Coleta de Dados Ambientais e c) Segmento espacial do sistema dos satélites SCD-1, SCD-2 e CBERS-2B.

2. A Ionosfera

A ionosfera está localizada entre 50 e 1000 km acima da superfície terrestre, sendo que a radiação solar eletromagnética é a principal responsável pelo processo de ionização. Além disso, o Sol libera um fluxo contínuo de partículas eletricamente carregadas (ventos solares), que contribui para a formação da ionosfera. O vento solar e a radiação solar eletromagnética podem sofrer drásticas alterações na ocorrência de tempestades solares, o que implica na alteração das condições do campo magnético e da ionosfera terrestre.

Conforme citado anteriormente, a ionosfera tem uma grande dependência temporal, dessa forma, ela se comporta de maneira distinta durante o período noturno e o diurno, observando-se uma queda na densidade de elétrons durante a noite, devido a ausência da radiação solar. A densidade de elétrons na ionosfera varia durante os meses do ano em uma determinada região, em parte porque o ângulo zenital do sol tem uma variação sazonal e, também, devido às mudanças na atmosfera neutra da qual a ionosfera é criada. Valores máximos da densidade de elétrons ocorrem, aproximadamente, nos meses de março, abril, setembro e outubro (equinócio) e valores mínimos nos meses de solstícios de inverno e verão.

Além da variação temporal da ionosfera ao longo do ano, podem-se ressaltar as variações de ciclos de longos períodos na densidade de elétrons, com ciclos de aproximadamente 11 anos. Nesse período, observa-se uma maior ocorrência de manchas solares, levando ao aumento de ionização. Essas manchas são regiões mais frias e escuras que aparecem na superfície do Sol e são rodeadas por regiões mais brilhantes que emitem um nível mais elevado de radiação ultravioleta, ocasionando uma mudança na densidade de elétrons na ionosfera. O valor de TEC é proporcional ao aumento da atividade solar, ou seja, ao aumento de manchas solares. Em período de máxima atividade, o TEC pode atingir valores cerca de duas vezes maiores do que em períodos de mínima atividade solar. Atualmente, o Sol está iniciando o ciclo 24 que deve ter seu período de máxima atividade solar entre os anos 2012 e 2014. Já o ciclo anterior, o 23, teve seu período de máxima entre os anos 2000 e 2002, durante os quais ocorreu um aumento do número de manchas solares e, conseqüentemente, o número de elétrons presentes na camada ionosférica.

A Figura 2 mostra o número de manchas solares do ciclo 23, no período que antecede o ano de 2000 até o primeiro semestre de 2010, data em que se pode observar o início do ciclo 24.

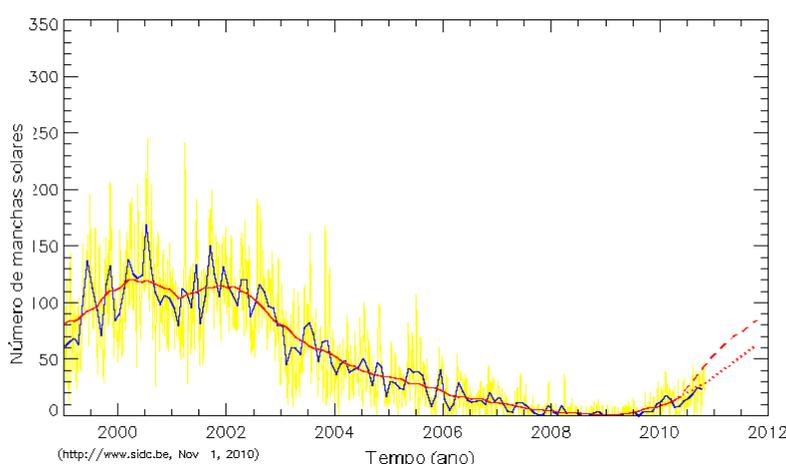


Figura 2 – Número de manchas solares do ciclo 23 e início do ciclo 24. As linhas em amarelo representam o número diário, em azul o número mensal, em vermelho contínuo a média mensal filtrada. As previsões do ciclo 24 para o período de 12 meses realizadas por interpolação de curvas padrões de Waldmeier (pontos em vermelho) e por método combinado proposto por K. Denkmayr (traços em vermelho).

Fonte: <http://sidc.oma.be/html/wolfjmms.html> - Acesso em 03/11/2010

3. Resultados

A localização das PCDs é efetuada através de um programa desenvolvido em Fortran, chamado GEOLOC o qual processa os desvios Doppler sofrido pelo sinal transmitido pelas PCDs, juntamente com um método estatístico de mínimos quadrados. Os sinais de dados são transmitidos pelas PCDs para os satélites em frequência de banda UHF. Então, o software GEOLOC (Geographical Location) desenvolvido pelo INPE é alimentado com os dados de desvio Doppler e as efemérides orbitais dos satélites.

Diante das verificações de dependência da ionosfera com o ciclo solar, época do ano, hora do dia, localização geográfica, atividade geomagnética, entre outros, torna-se importante uma análise de diferentes modelos que descrevem os valores de TEC para a localização geográfica e data em que a localização da PCD será efetuada.

Dessa forma, duas modelagens da ionosfera foram analisadas: o IRI (International Reference Ionosphere) e o IONEX (IONosphere map Exchange). O valor apresentado corresponde ao TECU que significa TEC Unitary e seu valor é dado por: $1 \text{ TECU} = 1 \text{ TEC} \times 10^{16} \text{ elétrons/m}^2$ [7].

O período escolhido para a localização foi de outubro de 2001 e outubro de 2009, períodos que se destacam pela alta e baixa atividade solar, respectivamente. O mês de outubro, especificamente, está dentro da época em que o TEC tem seus valores máximos (equinócio de primavera), principalmente no ano de 2001. Além disso, existe um grupo de dados de passagem do satélite SCD-2 nos horários mais intensos de TEC (18 UT) para esse mês, nos anos de 2001 e de 2009. Este fato torna-se importante para as localizações com dados reais.

No primeiro grupo de resultados são apresentados os valores de TEC para os dias 18 a 22 de outubro de 2001 e de 2009 na localização geográfica onde se encontra a PCD 32590. Os dados de desvio Doppler são simulados a partir da localização real dessa PCD e o efeito ionosférico é somado ao modelo que gera tais dados. Assim, é possível verificar na simulação qual é a influência da ionosfera no erro de localização. Os valores de TEC inseridos são adquiridos através dos modelos IRI e IONEX.

A Figura 3 apresenta uma seqüência de mapas do TEC para a região compreendida entre as latitudes de 0° a 90° Norte e Sul, e longitudes de -180° a 0°, região onde se encontra o continente americano. Essa Figura mostra os mapas para os dias 19 e 22 de outubro de 2001, período caracterizado por alta atividade solar, e onde se pode ver o efeito da anomalia equatorial, levando aos maiores valores de TEC na região do Brasil, por volta de 18-19 UT (Universal Time). Através do código de cores verifica-se que nesse período de tempo o TEC atinge valores próximos de 150 TECU na região da anomalia equatorial, região em vermelho. Por outro lado, na Figura 4, que representa o período de 19 e 22 de outubro de 2009, verifica-se que praticamente não há diferença nos valores de TEC para o mesmo período, 18-19 UT. O código de cores se mantém entre o azul escuro e o claro, o que representa cerca de 10 a 40 TECU. Tal fato se dá pelo período de baixa atividade solar.

As Figuras 5 e 6 representam os valores de TEC na localização geográfica onde se encontra a PCD 32590 e para o mesmo período citado anteriormente, tanto para 2001 quanto para 2009, usando o IRI (linha rosa) e o IONEX (linha azul). Além disso, os símbolos em triângulo contidos nas Figuras representam os momentos de passagens do satélite SCD-2, que ocorrem num período entre 15 e 22 UT. O TEC é representado com intervalo de 2 horas e um período completo de um dia. Na Figura 5 é verificada a discrepância entre os valores de TEC principalmente no final do dia, tendo seu valor aumentado em até 3 vezes em relação aos modelos, ou seja, o IONEX representa melhor o conteúdo total de elétrons em períodos de alta atividade solar. Essa diferença leva a um aumento de erro de aproximadamente 50% na localização, quando os desvios ionosféricos são acrescidos aos dados Doppler simulados. Na Figura 6 tem-se a mesma representação da Figura anterior, porém, para o ano de 2009. Neste caso verifica-se que ambos, IONEX e IRI, representam o conteúdo total de elétrons de maneira similar. Assim, o acréscimo no erro de localização das PCDs será compatível para qualquer modelo escolhido para a obtenção do TEC. Ressalta-se a importância da correção ionosférica nos períodos de alta atividade solar, pois, de acordo com a Figura 5, os valores de TEC saltam de aproximadamente 40 para mais de 120 TECU no final do dia.

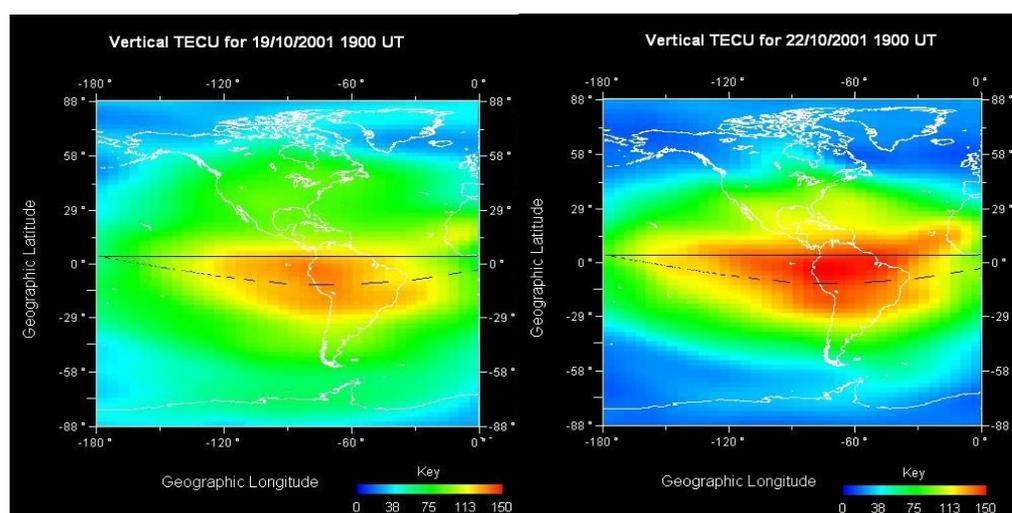


Figura 3 – Mapas de TEC para os dias 19 e 22 de outubro de 2001 - 19 UT. Verificam-se as cristas da anomalia equatorial, na região próxima ao Brasil, levando a valores máximos de TEC. Tem-se o equador geográfico (linha contínua) e o magnético (linha tracejada).

Fonte: Produzido através do software Leica Geosystems / GNSS QC.

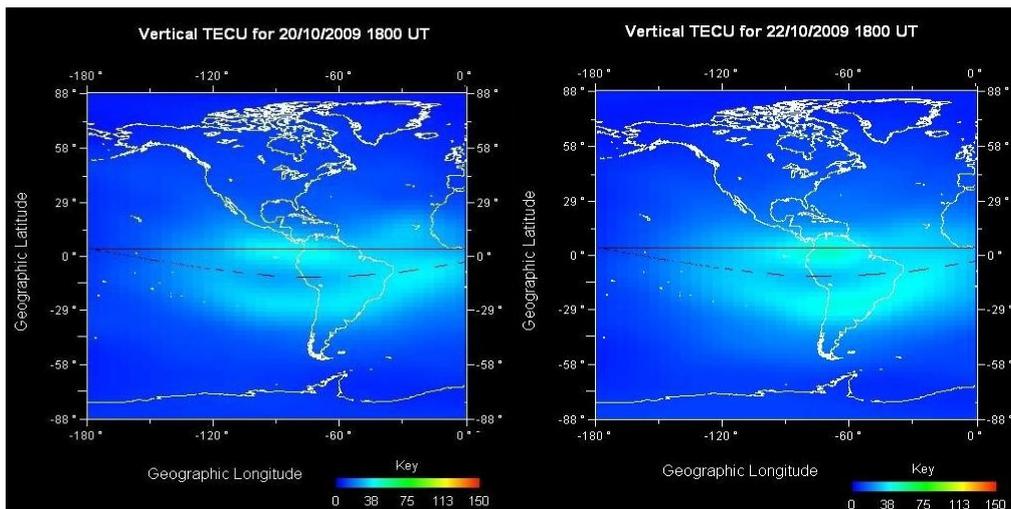


Figura 4 – Mapas de TEC para os dias 19 e 22 de outubro de 2009 - 18 UT. Nestes mapas verificam-se valores mínimos de TEC devido ao período de baixa atividade solar. Tem-se o equador geográfico (linha contínua) e o magnético (linha tracejada).
 Fonte: Produzido através do software Leica Geosystems / GNSS QC.

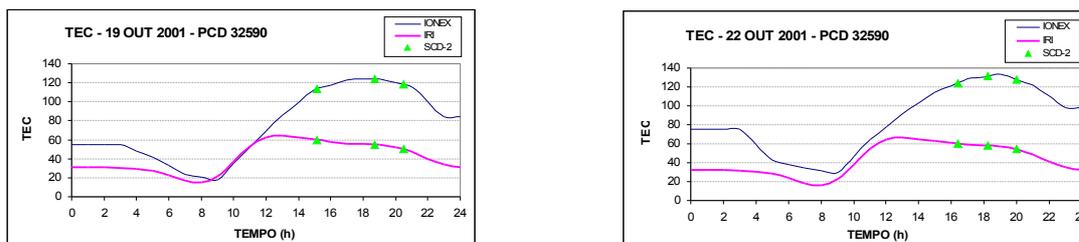


Figura 5 – Valores de TEC para os dias 19 e 22 de outubro de 2001 em um período de 24 horas. Localização geográfica da PCD 32590. Em (azul) – IONEX, (rosa) – IRI e os triângulos representam os momentos de passagem do satélite SCD-2.

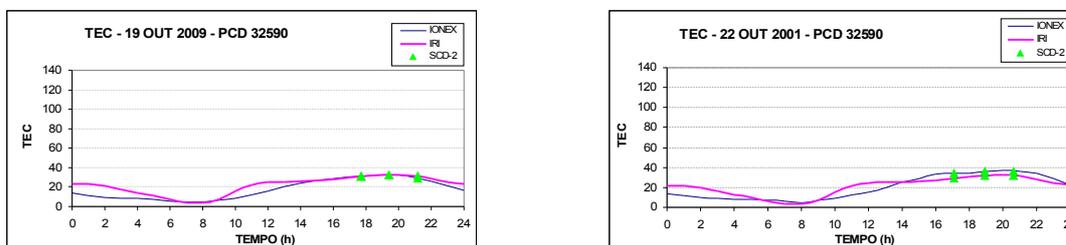


Figura 6 – Valores de TEC para os dias 19 e 22 de outubro de 2009 em um período de 24 horas. Localização geográfica da PCD 32590. Em (azul) – IONEX, (rosa) – IRI e os triângulos representam os momentos de passagem do satélite SCD-2.

Tendo observada a representação do TEC através dos diferentes modelos (IONEX e IRI), nos períodos de alta e baixa atividade solar, o segundo grupo de dados apresenta o erro de localização geográfica da PCD 32590 gerado pelo desvio ionosférico.

Uma primeira análise desses resultados mostra que o erro de localização devido ao efeito ionosférico não pode ser negligenciado, pois o erro acrescido pode ser de aproximadamente 50% e o modelo a ser escolhido depende, principalmente, da intensidade da atividade solar. Verifica-se que em baixa atividade solar, os dois modelos representam bem os valores de TEC, porém, em alta atividade, o IONEX tem os valores melhores representados, principalmente na região denominada anomalia equatorial, próximo ao equador magnético, que pode ser facilmente observado na Figura 3.

As Figuras 7 e 8 mostram os erros de localização da PCD 32590 para os anos de 2001 e 2009, respectivamente, fazendo uso dos valores de TEC dos dois modelos.

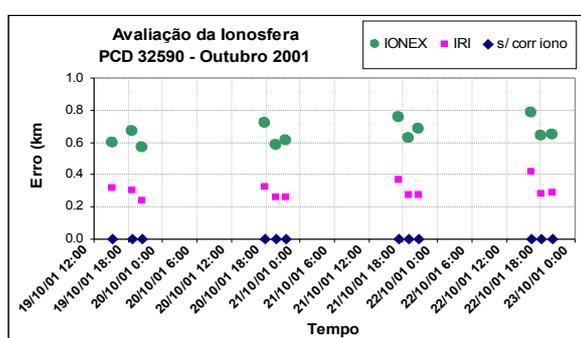


Figura 7 – Avaliação da ionosfera no erro de localização da PCD 32590 para os dias 19 a 22 de outubro de 2001. Em azul os erros sem o efeito do desvio ionosférico, em rosa, com o acréscimo do desvio ionosférico com o modelo IRI e em verde com o acréscimo do desvio ionosférico com os dados do IONEX. Os resultados utilizam desvio Doppler simulado.

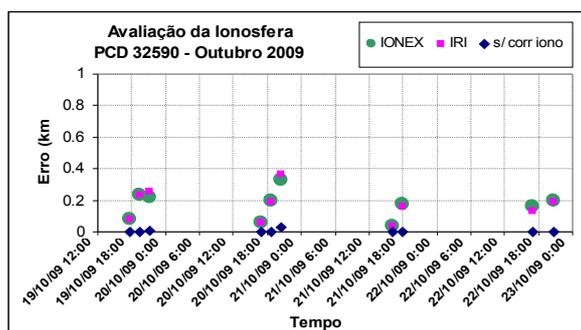


Figura 8 – Avaliação da ionosfera no erro de localização da PCD 32590 para os dias 19 a 22 de outubro de 2009. Em azul os erros sem o efeito do desvio ionosférico, em rosa, com o acréscimo do desvio ionosférico com o modelo IRI e em verde com o acréscimo do desvio ionosférico com os dados do IONEX. Os resultados utilizam desvio Doppler simulado.

4. Comentários Finais

Com essa análise dos valores de TEC, principalmente na região equatorial, onde se encontra o Brasil, observa-se uma grande influência na localização das PCDs, pois quanto melhor modelado o efeito ionosférico, melhor será a localização. E, de acordo com os resultados apresentados, verifica-se que os dados ionosféricos apresentados pelo IONEX são, em geral, melhores do que os dados do IRI, principalmente no período de alta atividade solar. Nesse caso, os valores de TEC do IONEX atingem valores maiores do que 100% em relação ao IRI, o que leva a uma correção ionosférica na localização da ordem de até 700 metros.

Os resultados apresentam diferentes valores de TEC e, conseqüentemente, na localização das PCDs, quando são utilizados os modelos do IRI e do IONEX em períodos de alta atividade solar, enquanto que no período de baixa atividade esses modelos se mostram similares. Para o primeiro caso, o modelo IONEX permite uma melhoria de aproximadamente 50 % na localização no ano de 2001 e por volta das 18 horas locais, em relação ao modelo IRI.

Nesses primeiros resultados são utilizados dados de desvio Doppler simulados, porém observa-se que a localização geográfica tem seu erro aumentado devido ao efeito do ionosférico, o qual não pode ser negligenciado quando a localização de plataformas é feita com dados reais.

6. Referências Bibliográficas

- 1 – KLOBUCHAR, J. A., “Ionospheric Effects on GPS. In: Parkinson, B. W.: Spilker, J. J. Global Positioning System: Theory and Applications”, Cambridge: American Institute of Aeronautics and Astronautics, v.1, p.485-515, 1996.
- 2 – CELESTINO, C.C., Kuga, H.K., Yamaguti, W., Sousa, C.T. Errors Due to the Tropospheric and Ionospheric Effects on the Geographic Location of Data Collection Platforms. Revista Brasileira de Geofísica, v.26, p.427 - 436, 2009.
- 3 – CELESTINO, C.C., Sousa, C.T., Yamaguti, W., Kuga, H.K. Evolution of tropospheric and ionospheric effects on the geographic localization of data collection platforms. Mathematical Problems in Engineering, v.2007, p.11, 2007.
- 4 – MATSUOKA, M. T. Influência de Diferentes Condições da Ionosfera no Posicionamento por Ponto Com GPS: Avaliação na Região Brasileira. Tese de Doutorado. Faculdade de Ciências e Tecnologia – UNESP, Presidente Prudente, p.263, 2007.
- 5 – BILITZA D., International Reference Ionospheric Model – IRI. Disponível em <<http://nssdc.gsfc.nasa.gov/models/iri.html>>.
- 6 – CDDIS – NASA’s Archive of Space Geodesy Data. Disponível em <<ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/pub/gps/products/ionex/>>.
- 7 – SCHAER, S., GURTNER, W. IONEX: The IONosphere Map EXchange Format Version 1. Proceedings of the IGS AC Workshop, Darmstadt, Germany, February 9-11, 1998.