

Uma Análise da Influência da Escolha de Modelos Ionosféricos na Determinação de Coordenadas Planas através do Sistema GPS

Eng. Rodrigo Figueiredo Leandro¹
Prof. Dr. Paulo César Lima Segantine²

EESC/USP – Departamento de Transportes
Av. Trabalhador São-Carlense, 400
São Carlos - SP
CEP 13566-590

¹ ✉ rleandro@sc.usp.br

¹ ✉ rleandro@hotmail.com

² ✉ seganta@sc.usp.br

Conteúdo	
	1. Introdução
	2 A Ionosfera terrestre e os Sinais GPS
	2.1 Modelos Ionosféricos
	3 Estudo de Caso
	3.1 Materiais e Métodos
	4 Resultados
	4.1 Análise 1
	4.2 Análise 2
	5 Conclusões e Recomendações
	6 Bibliografia

Resumo: No Brasil pretende-se adotar no ato do registro de imóveis, coordenadas georreferenciadas em um sistema de referência único adotado para todo o território nacional. A determinação de tais coordenadas através do sistema GPS poderá ser feita pelos métodos de posicionamento por ponto simples ou de posicionamento relativo. Neste último caso, devido à escassez de marcos geodésicos no território nacional, as linhas de base são em sua maioria extensas. Nessas duas situações os usuários de receptores de simples frequência ficam sujeitos à utilização de modelos ionosféricos para estimativa da influência da ionosfera nos sinais. Sendo assim, a escolha adequada de tal modelo vem a ser um importante fator a ser considerado durante o processamento dos dados. Neste trabalho foi feita a comparação de resultados de processamento de dados GPS obtidos com a utilização de diferentes modelos ionosféricos a partir de posicionamento por ponto simples.

Palavras chave: ionosfera, coordenadas, GPS

Abstract: In Brazil, it is intended to adopt at the act of record of properties, coordinates associated to an only adopted reference system for all the national territory. The determination of such coordinates, through GPS system, could be made by methods of single point positioning or relative positioning. In this last case, due to geodetic landmarks scarcity in national territory, the baselines are, in its majority, extensive. In these two situations, the users of single frequency receivers are submitted to the use of ionospheric models to estimate the influence of the ionosphere in the signs. Being thus, the adequate choice of such model comes to be an important factor to be considered during the data processing. In this paper was made a matching of results of GPS data processing with the use of different ionospheric models through single point positioning.

Keywords: ionosphere, coordinates, GPS

1 Introdução

No Brasil pretende-se adotar no ato do registro de imóveis, coordenadas georreferenciadas em um sistema de referência único adotado para todo o território nacional. Neste trabalho será abordada a utilização do sistema GPS, que, por demonstrar uma grande aplicabilidade a diferentes níveis de precisão, se consolidou como um sistema padrão para georreferenciamento em todo o mundo.

As observáveis GPS, tal como todas as outras envolvidas nos processos de medições, estão sujeitas aos erros aleatórios, sistemáticos e grosseiros. Para obter resultados confiáveis, os modelos matemáticos utilizados durante o processamento devem ser válidos e capazes de detectar problemas, (Ishikawa/Iatme 2000). Desta forma, as fontes de erros envolvidas durante o processo de coleta de dados devem ser bem conhecidas para que sejam modeladas o mais próximo possível da realidade.

Um dos efeitos degradantes do sinal GPS, a disponibilidade seletiva – SA (*Selective Availability*), foi desativada no dia 02 de maio de 2000. Segundo Santos (2000), após isso, constatou-se um aumento considerável na precisão de levantamentos GPS, seja pelo método de posicionamento absoluto ou relativo.

A precisão do posicionamento absoluto, quando ligada a Disponibilidade Seletiva, apresenta valores em torno de 100 metros no plano horizontal. Entretanto quando este efeito está desativado a precisão horizontal e vertical apresenta uma melhora de aproximadamente 85%, (Matsuoka et al. 2000). Esta mudança vem tornar interessante a utilização do posicionamento por ponto simples em algumas situações. Um exemplo seria a determinação das coordenadas de um ponto de referência para um levantamento topográfico, em um local que não possua nenhum marco geodésico próximo, ou em que o marco esteja danificado, ou ainda no georreferenciamento de imagens cuja resolução seja compatível com a precisão deste tipo de posicionamento.

Na ausência da limitação imposta aos usuários civis pelo Departamento de Defesa (DoD) dos Estados Unidos, através da disponibilidade seletiva, a ionosfera se tornou a maior fonte de erro no posicionamento com GPS, (Camargo et al. 2000).

Os receptores de dupla frequência permitem efetuar correções do efeito da refração ionosférica, devido ao fato de que este efeito depende da frequência do sinal. Esta estratégia permite obter resultados que são praticamente isentos da influência ionosférica, desde que realizada em épocas de atividade solar mínima. Entretanto, tais receptores são equipamentos caros, fazendo com que os de simples frequência, a maioria de uso civil, sejam amplamente empregados para determinação de linhas de base, mesmo em condições não totalmente adequadas.

A determinação de coordenadas georreferenciadas de um determinado ponto através do sistema GPS pode ser feita através de dados de um único receptor (posicionamento por ponto simples) ou de dois receptores (posicionamento relativo). Neste último caso, devido à escassez de marcos geodésicos no território nacional, as linhas de base são em sua maioria extensas. Nesses dois casos os usuários de receptores de simples frequência ficam sujeitos à utilização de modelos ionosféricos (modelos matemáticos que estimam a influência da camada ionosférica nos sinais GPS). Sendo assim, a escolha adequada de tal modelo vem a ser um importante fator a ser considerado durante o processamento dos dados.

2 A Ionosfera Terrestre e os Sinais GPS

Os sinais emitidos pelas antenas dos satélites GPS iniciam sua trajetória no espaço, que é essencialmente vácuo na cobertura atmosférica terrestre. A ionosfera é a primeira camada relevante encontrada pelos sinais GPS em sua propagação, (Brunner/Welsch 1993).

Um súbito acréscimo nas emissões de raios-X resultante de explosões solares causa um grande aumento na ionização nas camadas baixas da ionosfera, mais especificamente do lado da Terra iluminado pelo sol.

A radiação solar contém suficiente energia, para que as ondas eletromagnéticas de curto comprimento de onda causem apreciável fotoionização da atmosfera terrestre nas altas altitudes, criando, na atmosfera superior, regiões parcialmente ionizadas (Figura 1). Todavia, as partes ionizadas da atmosfera estendem-se ao espaço interplanetário e misturam-se com o vento solar e com o plasma interplanetário, com um decréscimo da densidade de elétrons.

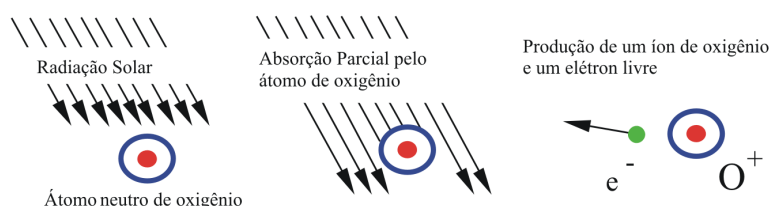


Figura 1: Formação de elétrons livres na camada ionosférica
(Adaptado de <http://w3.nrl.navy.mil/projects/sharp/ion1.html>)

As propriedades da ionosfera variam de acordo com as coordenadas geográficas ou geomagnéticas, com a hora local, a altitude, a estação do ano, o ciclo de manchas solares e tempestades geomagnéticas, (Osório 1992). A posição, hora local e estação do ano modificam o ângulo que o Sol faz com o zênite do ponto de observação; e a energia recebida por uma superfície dada é proporcional ao co-seno do ângulo zenital. Contudo a influência da longitude, devido à não coincidência dos pólos geográficos ou magnéticos, é sensível somente nas camadas ionosféricas mais altas, (Picquenard 1974).

Klobuchar (1991) afirma que a ionosfera é uma importante fonte de erros das distâncias e de taxa de oscilação desses erros para os usuários do sistema de posicionamento global (GPS), que necessitam de medidas de alta precisão. Os principais efeitos que a ionosfera pode provocar no sinal GPS são os seguintes:

- Atraso de grupo na modulação do sinal;
- Avanço na fase da portadora ou erro na distância relativa;
- Efeito Doppler, erros na taxa da distância;
- Rotação Faraday dos sinais polarizados linearmente;
- Refração ou curvatura da onda de rádio;
- Distorção de pulso nas formas da onda;
- Enfraquecimento da amplitude do sinal ou amplitude de cintilação;
- Cintilações de fase.

Como a ionosfera é um meio dispersivo, os efeitos causados no sinal GPS são funções da frequência do mesmo. Sendo assim a utilização de receptores de dupla frequência permite a eliminação matemática destes efeitos. Aos usuários de receptores de simples frequência resta utilizar modelos matemáticos baseados em dados enviados no arquivo de navegação ou nas observáveis (fase da portadora L1 e código C/A).

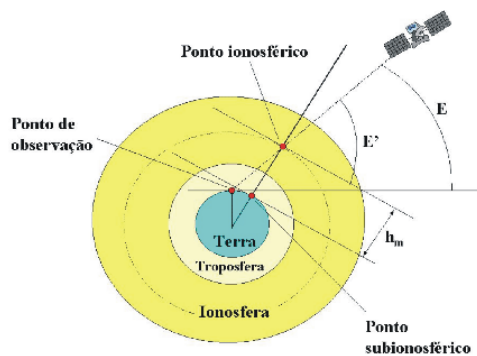
2.1 Modelos Ionosféricos

As mensagens de navegação transmitidas pelos satélites trazem informações que permitem efetuar correções da ionosfera para os receptores de simples frequência, utilizando o modelo ionosférico de Klobuchar, (Klobuchar 1994). Vários estudos realizados mostraram que o modelo de Klobuchar pode remover apenas algo em torno de 50% do efeito total. Os modelos que serão discutidos neste trabalho são os modelos de Klobuchar, da Lâmina Ionosférica, do Ponto Ionosférico e Diário com função Co-seno, sendo que os três últimos são modelos baseados nas observáveis.

O Modelo de Klobuchar estima a influência da ionosfera no sinal GPS através de parâmetros globais transmitidos no arquivo de navegação. Além destes parâmetros, é necessário que se conheça a latitude e a longitude geodésicas aproximadas do local de observação, o ângulo de elevação e azimute de cada satélite em relação à antena do receptor.

Para que a utilização das observáveis na estimativa do atraso ionosférico seja possível, é necessário que se utilize mais de uma época de observação. Como em épocas diferentes os satélites se situam em posições diferentes, os sinais percorrem caminhos distintos a cada momento de observação. Os atrasos causados em diferentes épocas são relacionados entre si através do atraso ionosférico ao longo da direção vertical. Os modelos baseados nas observáveis têm como principal diferença entre si a maneira com a qual relacionam o atraso ionosférico ao longo do caminho percorrido pelo sinal (atraso ionosférico) com o atraso ionosférico ao longo da direção vertical (atraso ionosférico vertical).

O Modelo da Lâmina Ionosférica é, segundo Leick (1995), um dos modelos ionosféricos mais simples, pois considera a ionosfera, para um receptor isolado, como sendo uma lâmina de espessura constante que possui distribuição homogênea de elétrons livres. Neste modelo é desconsiderada a curvatura da Terra. O atraso ionosférico vertical é relacionado com o atraso ionosférico através do ângulo de elevação (E) do satélite em relação ao ponto de observação (Figura 2).



O Modelo do Ponto Ionosférico possui o mesmo princípio do modelo da lâmina ionosférica, porém utiliza o ângulo de elevação (E') do satélite em relação ao ponto ionosférico (Figura 2).

O Modelo Diário com Função Co-seno leva em consideração a rotação da Terra e o movimento diário do sol em relação ao local de observação, o que o torna um pouco mais refinado que os modelos da lâmina ionosférica e do ponto ionosférico. Neste modelo, o atraso ionosférico é dependente do atraso ionosférico máximo, sendo os dois relacionados através de uma função co-seno. De acordo com Klobuchar (1987), o atraso ionosférico máximo ocorre próximo às 14 h do horário solar local, podendo, entretanto, este valor variar em função da estação do ano, da latitude e das condições de atividade solar. Neste modelo o atraso ionosférico vertical é relacionado com o atraso ionosférico através do ângulo de elevação (E) do satélite em relação ao ponto de observação (Figura 2).

Figura 2 :
Ângulos de elevação do satélite em relação ao ponto de observação
(Adaptado de Hofmann-Wellenthof, 1997)

3 Estudo de Caso

Neste trabalho foi feita a comparação de resultados de processamento de dados GPS obtidos com a utilização dos diferentes modelos ionosféricos aqui citados. O tipo de processamento utilizado foi o posicionamento por ponto simples.

3.1 Materiais e Métodos

Para a análise proposta foram utilizados arquivos de observação da RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo – IBGE). Foi escolhida apenas uma das estações, como forma de restringir as análises, visando o objetivo proposto. A estação utilizada foi a estação BRAZ, localizada em Brasília - DF.

Foram escolhidos três dias dentro do intervalo de 1° a 30 de Abril do ano de 2002, levando em conta a atividade solar durante o período (alta, média e baixa). A atividade solar foi estimada a partir de índices de emissão solar de raios x, fornecidos pelo SEC (Space Environment Center), através do endereço <http://www.sec.noaa.gov/weekly/weekly00.html>. As Figuras 3 a 5 ilustram estes valores para alguns dias do mês de abril.

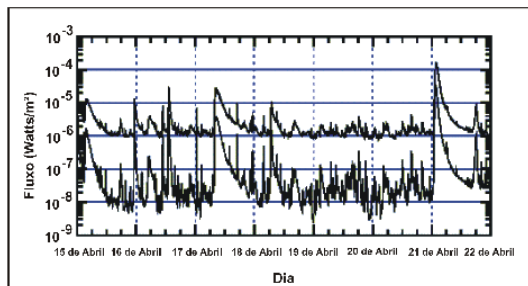


Figura 3 : Emissão solar de raios x (15 a 21 de Abril)
(Adaptado de <http://www.sec.noaa.gov/weekly/weekly00.html>)

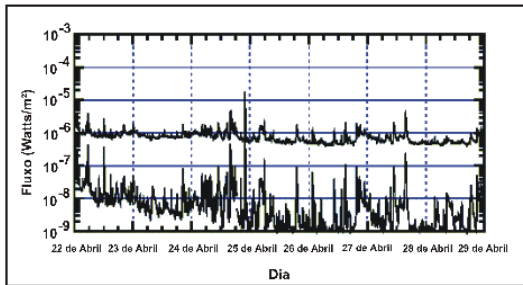


Figura 4 :Emissão solar de raios x (22 a 28 de Abril)
(Adaptado de <http://www.sec.noaa.gov/weekly/weekly00.html>)

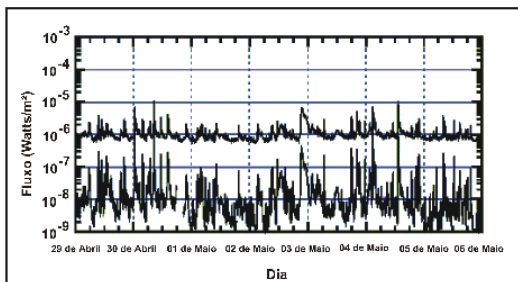


Figura 5 : Emissão solar de raios x (29 de Abril a 5 de Maio)
(Adaptado de <http://www.sec.noaa.gov/weekly/weekly00.html>)

Foram utilizados os dias 21 de Abril (como alta atividade solar), 28 de Abril (como baixa atividade solar) e 30 de Abril (como média atividade solar).

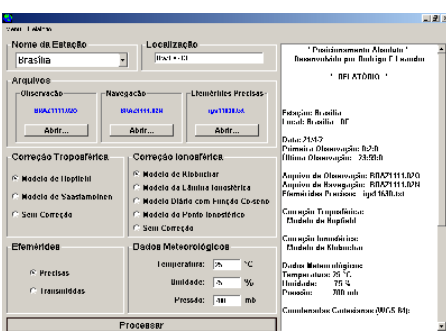


Figura 6 :
Programa utilizado para o processamento dos dados.
- para ampliar clicar na imagem -

Para o processamento dos dados foram utilizadas efemérides precisas, disponibilizadas pelo *International GPS Service for Geodynamics* – USA através da internet. As correções troposféricas foram estimadas a partir do Modelo de Hopfield. O programa utilizado para o processamento dos dados foi desenvolvido pelo próprio autor, em linguagem Visual Basic 5.0 (Figura 3).

Os dados foram processados de forma a se obter resultados parciais para períodos de observação de duas horas, ao longo de cada um dos três dias. Este procedimento foi adotado para cada um dos quatro modelos ionosféricos. As coordenadas obtidas em cada processamento foram comparadas às coordenadas oficiais divulgadas pelo Departamento de Geodésia do IBGE, resultando desvios de posição. Tais desvios foram computados apenas para o plano, ou seja, as alturas obtidas não foram consideradas.

4 Resultados

Cada uma das figuras abaixo ilustra os desvios obtidos para cada dia de observação. Os gráficos representam os resultados para observações de duas horas, utilizando os quatro modelos.

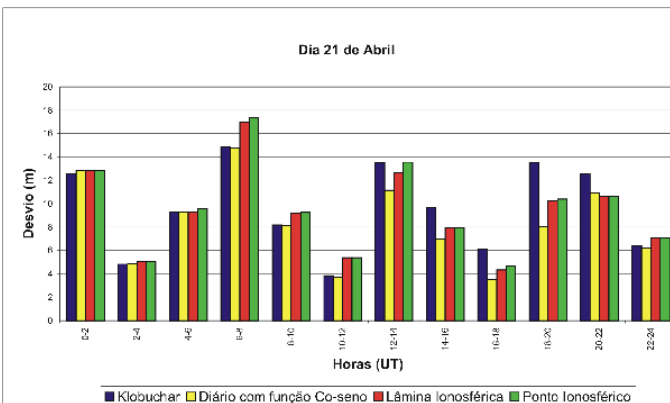


Figura 7 : Resultado do processamento.

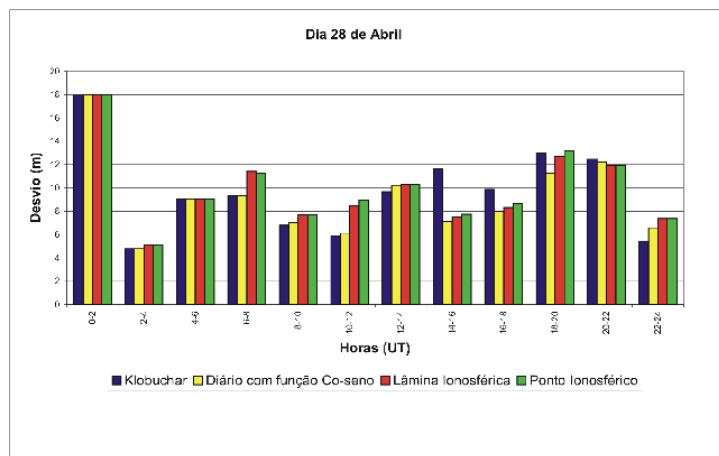


Figura 8 : Resultado do processamento.

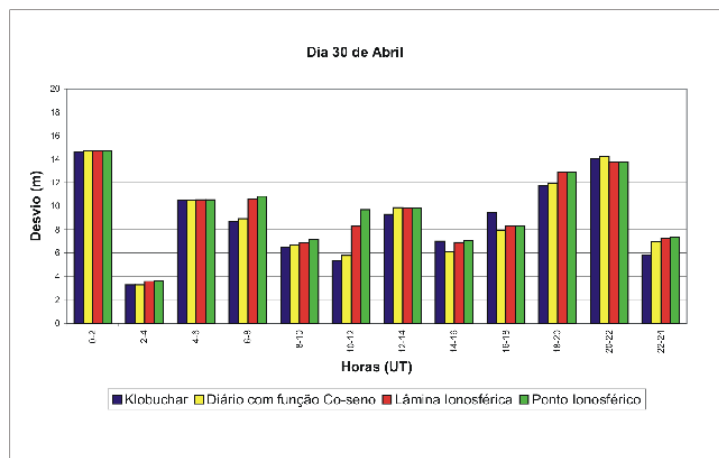


Figura 9 : Resultado do processamento.

4.1 Análise 1

A análise 1 foi feita a partir dos valores médios obtidos considerando todas as observações ao longo de cada dia, para cada um dos modelos utilizados.

No dia 21 de Abril pode-se notar uma diferença entre os resultados obtidos com o modelo diário com função co-seno e com os demais. Esta diferença possui valores médios entre 10% e 13%, o que nesse caso representa distâncias entre 1 m e 1,3 m aproximadamente.

Nos dias 28 e 30 de Abril a utilização modelo de Klobuchar apresentou resultados com desvios que em média foram similares aos obtidos com o modelo diário com função co-seno. Estes dois modelos resultaram em uma melhora média da posição plana de 7% a 8% em relação aos modelos da lâmina ionosférica e do ponto ionosférico

4.2 Análise 2

A análise 2 foi feita considerando apenas o horário considerado como o de máxima atividade ionosférica, que ocorre por volta das 14 horas locais, e, no caso da cidade de Brasília, das 17 horas UT.

Nos dias 28 e 30 de Abril, o modelo diário com função co-seno apresentou resultados melhores que os outros três modelos, com desvios 4% a 7% menores que os dos modelos da lâmina ionosférica e do ponto ionosféricos e 15% a 18% menores que os obtidos com o modelo de Klobuchar. Estas diferenças representam valores em torno de 0,30 m a 0,65 m, e de 1,5 m a 1,9 m respectivamente.

No dia 21 de Abril, o modelo diário com função co-seno também apresentou resultados melhores que os outros três modelos, com desvios 18% a 25% menores que os dos modelos da lâmina ionosférica e do ponto ionosféricos e 42% menores que os obtidos com o modelo de Klobuchar. Estas diferenças representam valores em torno de 0,80 m a 1,15 m e de 2,6 m respectivamente.

5 Conclusões e Recomendações

Verificou-se neste trabalho que, os diferentes modelos ionosféricos se adaptam de maneiras particulares às mesmas situações. Demonstrou-se também que estas diferenças nas adaptações podem significar discrepâncias que podem variar de 4% a 42% na exatidão da determinação da posição plana de um ponto. Estas diferenças podem ser ainda maiores em relação à posição espacial, pois a componente que sofre maior influência da ionosfera é a altura geométrica. (Camargo et. al. 2001).

Uma vez determinada a maneira com a qual cada um desses modelos se adapta às diversas situações, será possível afirmar qual o melhor modelo a se utilizar em cada caso. Para isso recomenda-se que sejam feitas análises detalhadas, considerando diversos fatores, a fim de que sejam constatados comportamentos sistemáticos dos modelos frente às diferentes condições.

Depois que forem feitas análises utilizando as diversas situações que ocorrem em todo o território nacional (estação do ano, latitude, atividade solar, horário do dia e outras), será possível determinar quais modelos se adaptam melhor a cada condição no Brasil. A partir daí, os usuários de receptores GPS de simples frequência terão uma referência para a escolha dos modelos ionosféricos utilizados no processamento dos dados.

6 Bibliografia

1. Brunner, F.K.; Welsch, W.M.: *Effects of Troposphere on GPS Measurements*, GPS WORLD, p 42-44, January, 1993.
2. Camargo, P.; Monico, J.F.; Ferreira, L.D.: *Influência da ionosfera no posicionamento por ponto com GPS*, Cobrac, Anais, Florianópolis, 2000.
3. Camargo, P.; Mônico, J. F. G.; Matsuoka, M. T.; Poz, W. R. D.: *Análise do Posicionamento Por Ponto com Gps Durante o Período de Máxima Atividade da Ionosfera XX Congresso Brasileiro de Cartografia*, Porto Alegre, 2001.
4. Hoffmann-Wellenhof, B. et. al.: *Global Positioning System: Theory and Practice*, Springer-Verlag Wien, New York, 1997.
5. Ishikawa, M.; Itame, O.: *Efeitos de multicaminhamento em levantamentos utilizando GPS aplicados ao cadastro técnico urbano*, Cobrac 2000, Anais, Florianópolis, 2000.
6. Klobuchar, J.A. : *Ionospheric Time-Delay Corrections for Advanced Satellite Ranging System*, AGARD Conference Proceedings – Propagation Limitations of Navigation and Positioning Systems, 1997.
7. Klobuchar, J.A.: *Ionospheric Effects on GPS*, Hancorn Air Force Base, Massachusetts. Global positioning System: Theory and Applications, Volume II, 1991.
8. Klobuchar, J.A.: *Ionospheric Effects on GPS-Global Positioning System*, American Institute of Aeronautics and Astronautics. Washington D.C, 1994.

9. **Leick, A.:** *GPS Satellite Surveying*, John Wiley & Sons, Inc, A Wiley-Interscience Publication, New York, 1995.
10. **Matsuoka, M.; Monico, J.F.; Camargo, P.:** *Avaliação do posicionamento por ponto utilizando efemérides precisas e correções dos relógios dos satélites*, Cobrac, Anais, Florianópolis, 2000.
11. **Osorio, I.M.T.V.P.:** *O Sistema Global de Posicionamento na Orbitografia de Satélites de Baixa Altitude* Tese de Doutorado – Faculdade de Ciências – Universidade do Porto, Portugal, 1992.
12. **Picquenard, A.:** *Propagação das Ondas Radioelétricas nos Meios Naturais*. Rio de Janeiro, 1974.
13. **Santos, M.C.:** *Efeitos e benefícios do fim da Disponibilidade Seletiva*. Revista InfoGEO, Ano 3, nº 14, 2000.
14. **Silva, C.A.U.:** *Análise de precisão dos posicionamentos relativo e por ponto simples para bases curtas, com o Sistema NAVSTAR/GPS: estudo de caso em Belém – PA* Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2000.

Uma Análise da Influência da Escolha de Modelos Ionosféricos na Determinação de Coordenadas Planas através do Sistema GPS

Eng. Rodrigo Figueiredo Leandro - Prof. Dr. Paulo César Lima Segantine

Menu Relatório

Nome da Estação
Brasília

Localização
Brasília - DF

Arquivos

Observação: BRAZ1111.02O [Abrir...]

Navegação: BRAZ1111.02N [Abrir...]

Efemérides Precisas: igs11630.txt [Abrir...]

Correção Troposférica

Modelo de Hopfield

Modelo de Saastamoinen

Sem Correção

Correção Ionosférica

Modelo de Klobuchar

Modelo da Lâmina Ionosférica

Modelo Diário com Função Co-seno

Modelo do Ponto Ionosférico

Sem Correção

Efemérides

Precisas

Transmitidas

Dados Meteorológicos

Temperatura: 25 °C

Umidade: 75 %

Pressão: 700 mb

Processar

*** Posicionamento Absoluto ***
^ Desenvolvido por Rodrigo F Leandro ^
*** RELATÓRIO ***

Estação: Brasília
Local: Brasília - DF

Data: 21/4/2
Primeira Observação: 0:2:0
Última Observação: 23:59:0

Arquivo de Observação: BRAZ1111.02O
Arquivo de Navegação: BRAZ1111.02N
Efemérides Precisas: igs11630.txt

Correção Troposférica:
Modelo de Hopfield

Correção Ionosférica:
Modelo de Klobuchar

Dados Meteorológicos:
Temperatura: 25 °C
Umidade: 75 %
Pressão: 700 mb

Coordenadas Cartesianas (WGS-84):

Figura 6 :
Programa utilizado para o processamento dos dados