

# INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO ESPACIAL DO TEC NA DEFINIÇÃO DO COMPRIMENTO DE LINHA DE BASE: ABORDAGEM TEÓRICA E PRÁTICA.

*Influence of the Spatial Variation of TEC in the definition of the baseline length: theoretical and practical considerations.*

**William Rodrigo Dal Poz<sup>1</sup>**  
**Paulo de Oliveira Camargo<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

Rua Roberto Simonsen, 305 - CEP: 19060-900, Presidente Prudente, SP, Brasil  
dalpoz@gmail.com, paulo@fct.unesp.br

## RESUMO

Um dos principais problemas no posicionamento relativo com GNSS é a variação espacial do Conteúdo Total de Elétrons (TEC), que representa o número de elétrons contidos em uma coluna, cuja área da seção transversal é unitária ( $1\text{m}^2$ ). O TEC varia no tempo e no espaço, sendo altamente influenciado por variações diurnas e sazonais, ciclos solares, campo geomagnético, dentre outras variáveis. Devido à variação espacial do TEC, a dupla diferença das observáveis GNSS não cancela os erros devido à ionosfera, e sim minimiza. Este valor remanescente é denominado de resíduo ionosférico da dupla diferença. Durante períodos de alta variação espacial do TEC, este resíduo pode afetar de forma significativa os resultados obtidos no posicionamento relativo, fazendo com que possam ocorrer algumas inconsistências na definição do comprimento de linha de base. Este trabalho pretende apresentar para a comunidade geodésica a influência da variação espacial do TEC na definição do comprimento de linha de base, a partir de uma abordagem teórica e prática. Os resultados mostraram que se deve evitar classificar uma linha de base como curta ou média, visto que tal classificação é altamente dependente da variação espacial do TEC.

**Palavras chaves:** Posicionamento Relativo, TEC, GNSS.

## ABSTRACT

One of the main problems in the relative positioning using GNSS is the spatial variation of the Total Electron Content (TEC), that is a measure of the total number of electrons in a column with a cross-sectional area of  $1\text{m}^2$ . The TEC varies in time and space, and it is influenced by the diurnal variations, season, solar cycle, geomagnetic field, among others. Due to spatial variation of TEC, the double difference of the GNSS observations do not cancel the errors due to ionosphere, only minimize. During periods of high spatial variation of TEC, the residual ionospheric error remaining in the double difference may affect significantly the obtained result. Consequently, due to TEC variations, it has been verified, in practice, the complexity of defining whether a given baseline length is short or medium. The aim of this paper is to show to geodesic community the influence of the spatial variation of TEC in the definition of the baseline length, from point of theoretical and practical view. The results to show that we must avoid to denote one baseline as short or medium, since that denotation is highly dependent of the spatial variation of TEC.

**Key Words:** Relative Positioning, TEC, GNSS.

## 1. INTRODUÇÃO

A ionosfera é uma das maiores fontes de erro no posicionamento com GNSS, principalmente no posicionamento por ponto, com uso de receptores de simples frequência. O erro devido à ionosfera é diretamente proporcional ao Conteúdo Total de Elétrons (TEC – *Total Electron Content*), presente ao longo da trajetória percorrida pelo sinal na ionosfera. Em períodos de alta variação espacial do TEC, ou em períodos de irregularidades ou anomalias, fortes efeitos ionosféricos também podem ocorrer no posicionamento relativo (DAL POZ, 2005 e DAL POZ e CAMARGO, 2006).

Até mesmo com a utilização de receptores de dupla frequência pode-se observar efeitos significativos no posicionamento relativo, em períodos de máxima atividade solar, devido à altos gradientes do TEC (WANNINGER, SEEBER e CAMPOS, 1991).

Devido à variação espacial do TEC, o fato de uma linha de base ser mais longa do que outra, não implica, necessariamente, que na linha de base mais longa os erros devido à ionosfera estejam menos correlacionados do que na mais curta. Isto pode causar um forte impacto na definição do comprimento de uma linha de base.

Neste trabalho estão apresentados os experimentos com dados coletados no período de declínio da atividade solar (2003-2004), nas quatro estações do ano, formando nove (9) linhas de base que variam de 05 à 120 km com relação à estação UEPP (atualmente designada de PPTE) da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC). O principal objetivo deste trabalho é mostrar para a comunidade usuária e científica do GNSS a influência da variação espacial do TEC na definição do comprimento de uma linha de base, a partir de uma abordagem teórica e prática.

## 2. IONOSFERA

A ionosfera pode ser definida como a parte superior da atmosfera onde existe ionização suficiente para afetar a propagação de ondas de rádio (DAVIES, 1990). Ao contrário da troposfera, a ionosfera é um meio dispersivo, ou seja, neste meio a propagação de sinais depende da frequência. Caracteriza-se, principalmente, pela formação de íons e liberação de elétrons, e inicia-se por volta de 50 km acima da superfície terrestre e estende-se até, aproximadamente, 1000 km de altura.

Os íons e elétrons livres na ionosfera são criados principalmente pelo processo de fotoionização. Este processo consiste na absorção de radiação solar, predominantemente na faixa do extremo ultravioleta e raios-X, por elementos atmosféricos neutros (KIRCHHOFF, 1991). Quando a energia dos fótons incidentes sobre o elemento neutro é maior do que o seu potencial de fotoionização, ocorre a perda de

elétrons deste elemento, dando origem a um íon positivo e elétrons livres.

Devido às diferentes taxas de absorção e aos diferentes constituintes da atmosfera, distintas camadas ionosféricas são formadas. Desta forma, a ionosfera é dividida em três camadas, denominadas por D, E e F, que são caracterizadas pelas variações da densidade de elétrons e à medida que aumenta a altitude. A camada F é a que apresenta a maior densidade de elétrons e os maiores efeitos nos sinais GNSS.

A ionosfera, como um meio dispersivo, afeta a modulação e a fase da portadora, fazendo com que sofram, respectivamente, um retardo e um avanço (LEICK, 1995). O retardo é referido, também, como atraso ionosférico e aumenta o comprimento aparente do caminho percorrido pelo sinal. Mais detalhes sobre a ionosfera pode ser consultado, por exemplo, em Davies (1990), MacNamara (1991), Kirchoff (1991) e Schunk e Nagy (2000).

### 2.1 Variações do TEC

O principal problema no posicionamento relativo é a variação espacial da densidade de elétrons da ionosfera. Na prática, é quantificado o TEC presente na ionosfera, que representa o número total de elétrons contidos numa coluna, cuja área da seção transversal é unitária ( $1m^2$ ) (LEICK, 1995).

O TEC é influenciado pelas variações diurnas e sazonais, ciclos de longos períodos (ciclos solares), variações do campo geomagnético, dentre outras variáveis.

As variações diurnas são provocadas por mudanças que ocorrem em certas regiões da ionosfera, que desaparecem à noite, devido à recombinação e junção dos elétrons e íons. A principal razão da existência da variação diurna é devida à iluminação do Sol, ou seja, à radiação solar, fazendo com que a densidade de elétrons diminua de forma acentuada no período noturno. Ao longo do dia a densidade de elétrons depende da hora local, sendo que seu valor máximo ocorre entre as 12 e 16 horas local (WEBSTER, 1993).

As estações do ano também têm sua influência na variação da densidade de elétrons, devido à mudança do ângulo zenital do Sol e da intensidade do fluxo de ionização, caracterizando as variações sazonais.

As variações de longo período, com ciclos de aproximadamente 11 anos, são associadas às ocorrências de manchas solares, e o aumento de ionização é proporcional ao número de manchas. As manchas solares são regiões mais frias e escuras, que aparecem na superfície do Sol. Elas são rodeadas por regiões mais brilhantes que emitem um nível mais alto de radiação ultravioleta. Assim, o aumento desta radiação ocasiona uma mudança na densidade de elétrons presente na ionosfera.

O campo magnético da Terra (campo geomagnético) exerce grande influência na variação

da densidade de elétrons. Na ionosfera e na magnetosfera, o campo geomagnético controla o movimento das partículas ionizadas e, portanto, qualquer perturbação no campo geomagnético resultará em modificações nas condições de transporte do meio ionizado. As variações mais comuns associadas ao campo geomagnético são aquelas produzidas através das correntes elétricas que fluem na parte inferior da ionosfera. Além destas, podem ocorrer variações bruscas e muito intensas, provocadas pelas tempestades solares (KIRCHHOFF, 1991).

Além dessas variações, na região ionosférica equatorial ocorre uma anomalia que provoca uma alta variação espacial e temporal no TEC, conhecida como anomalia equatorial ou anomalia de Appleton, podendo afetar de forma significativa no posicionamento relativo. Trata-se do principal fenômeno da ionosfera equatorial (APPLETON, 1946). Consiste em dois picos de ionização que são formados nas regiões subtropicais ao norte e ao sul do equador geomagnético, entre 10 e 20 graus de latitude. No equador geomagnético a ionização fica menos intensa.

A anomalia equatorial varia ao longo do dia, passando por um máximo por volta das 17 TU (14 horas local), e por um segundo máximo, nas horas que precedem a meia noite, geralmente maior que o primeiro. Este segundo máximo em geral não ocorre durante períodos de baixa atividade solar (BATISTA, 2003).

### 3. CONSIDERAÇÕES TEÓRICAS SOBRE A INFLUÊNCIA DA IONOSFERA NA DEFINIÇÃO DO COMPRIMENTO DE LINHA DE BASE

No posicionamento relativo a observável normalmente utilizada nos processamentos é a dupla diferença da fase. Após a aplicação do processo da dupla diferenciação os efeitos da ionosfera não são cancelados, e sim minimizados. O valor remanescente do erro devido à ionosfera é denominado de resíduo ionosférico da dupla diferença. Quanto maior a correlação ionosférica entre as estações que forma a linha de base, menor será o resíduo ionosférico da dupla diferença. No entanto, o fato de uma linha de base ser mais longa do que outra não implica, necessariamente, que na linha de base mais longa os erros devido à ionosfera estejam menos correlacionados do que na mais curta. Isso depende de vários fatores, como localização geográfica, hora local, ciclo solar, etc.

Goad (1998) mostra um bom exemplo da dependência da solução da ambigüidade em função dos ciclos solares. Em 1983, quando o número de manchas solares foi baixo, foi possível solucionar o vetor ambigüidade como número inteiro para linhas de base de até 60 km com receptores de simples frequência. Em contrapartida, entre 1990 e 1991, período de máxima atividade solar, às vezes foi difícil solucionar o vetor ambigüidade para linhas de base de 10 km. Pode ser verificada a dificuldade em definir uma linha

de base curta. Mais complicado ainda fica definir qual linha de base pode ser considerada como média, pois esta se encontra entre a curta e a longa. Bock (1998) afirma que é impossível definir precisamente uma distância que possa ser chamada de “média”.

Recomenda-se evitar atribuir valor numérico a uma determinada linha de base com o objetivo de qualificá-la como curta, média ou longa. Uma solução para o problema consiste em uma definição genérica. Assim, a partir de tal definição, pode-se definir se uma linha de base é curta, média ou longa, independente da região geográfica da ionosfera, do ciclo solar, da hora local, etc.

Dois propostas são apresentadas por Bock (1998) com o objetivo de diferenciar uma linha de base curta de uma média. A primeira forma leva em consideração os resíduos ionosféricos e os erros de caráter local, tais como efeitos de multicaminho, ruído do receptor, atraso de hardware, etc. Uma linha de base passa a ser considerada como média a partir do momento em que o resíduo ionosférico da dupla diferença passa a ser maior do que o resíduo dos erros de caráter local. Seguindo essa linha de raciocínio, pode-se considerar, se uma linha de base é curta ou média, da seguinte forma:

- Linha de base curta: o resíduo dos erros de caráter local é maior do que o resíduo ionosférico da dupla diferença;
- Linha de base média: o resíduo ionosférico da dupla diferença é maior do que o resíduo dos erros de caráter local.

A segunda forma de definição de linha de base é baseada no tipo de receptor utilizado. Com receptores de dupla frequência é possível combinar as observações das duas portadoras ( $L_1$  e  $L_2$ ) de tal forma que os efeitos de primeira ordem da ionosfera sejam cancelados. Como resultado se obtém a observação denominada livre dos efeitos da ionosfera (*ionospheric free linear combination*) (LEICK, 1995). É importante ressaltar que o ruído desta combinação é dominante em linhas de base curtas. Assim, a segunda proposta de definir se uma linha de base é curta ou média pode ser adotada da seguinte forma: quando a observável livre dos efeitos da ionosfera, obtida a partir de receptores de dupla frequência começa a proporcionar melhores resultados do que os obtidos com receptores de simples frequência, a linha de base pode ser considerada média. Assim, seguindo essa linha de raciocínio, pode-se considerar, se uma linha de base é curta ou média, da seguinte forma:

- Linha de base curta: ruído da observável livre da ionosfera ( $L_0$ ) é dominante;
- Linha de base média: resíduo ionosférico da dupla diferença é dominante.

Vale ressaltar que é possível definir outros critérios. Por exemplo, se o vetor ambigüidade da dupla diferença é fixado com alta confiança (baseada em algum critério de análise de validação), a linha de base é considerada curta. Caso contrário, a linha de base é considerada média.

Diante do exposto pode-se verificar a complexidade em qualificar determinada linha de base como curta ou média. A partir dos experimentos realizados neste trabalho foi possível verificar que uma linha de base, tradicionalmente considerada “média”, pode apresentar melhores resultados do que uma linha de base considerada “curta”.

#### 4. EXPERIMENTOS, RESULTADOS E ANÁLISES

Nesse experimento foram coletados dados GPS ao longo de um trecho da rodovia Raposo Tavares (RT), próximo à região de Presidente Prudente, nas quatro estações do ano, formando nove (9) linhas de base que variam de 05 à 120 km. O tempo de rastreamento adotado para coleta de dados GPS em função do comprimento da linha de base é dado na tabela 1.

TABELA 1 – RELAÇÃO ENTRE TEMPO DE RASTREIO E COMPRIMENTO DA LINHA DE BASE.

Comprimento da linha de base	Tempo de rastreamento (minutos)
< 20 km	40
20...50	120
50...100	180
>100	240

O tempo adotado na coleta de dados teve como base a Norma Técnica para Georreferenciamento de Imóveis Rurais, que trata da relação entre tempo de ocupação e distância entre as estações para levantamento de controle (INCRA, 2003).

##### 4.1 Estratégia de Processamento

No processamento dos dados GPS foi utilizado o programa GPSurvey, versão 2.35. Todas as linhas de base foram processadas com relação à estação UEPP da RBMC (atualmente designada de PPTE). O receptor desta estação era um Trimble 4000 SSI de dupla frequência.

Com o objetivo de se obter as componentes das linhas de base tomadas como referência, uma primeira coleta de dados GPS foi realizada com um receptor de dupla frequência Ashtech ZXII nas estações móveis no mês de junho. Assim, foi possível aplicar no processamento das linhas de base a combinação linear livre da ionosfera ( $L_0$ ). No entanto, como para linhas de base de até aproximadamente 15 km o ruído da observável  $L_0$  torna-se dominante, então se optou em aplicar o modelo de Klobuchar no

processamento dessas linhas de base. Este modelo utiliza os coeficientes transmitidos nas mensagens de navegação. O modelo de Klobuchar foi desenvolvido especialmente para corrigir os efeitos da ionosfera para receptores de simples frequência, e permite corrigir algo em torno de 50 % do efeito da ionosfera (KLOBUCHAR, 1987).

Com o objetivo de realizar uma análise sazonal da influência da ionosfera também foram coletados dados nas outras três estações do ano (verão, outono e primavera). Na coleta desses dados foram utilizados receptores de simples frequência nas estações móveis (Trimble 4600 LS). No caso do receptor Ashtech ZXII (utilizado no inverno), após o processamento com  $L_0$ , foram reprocessadas as linhas de base somente com dados da portadora  $L_1$  (código e fase), com objetivo de simular um receptor de simples frequência. O procedimento para verificar a influência da ionosfera foi realizado por meio da comparação dos valores tomados como referência das coordenadas das estações móveis estimados com a combinação linear livre da ionosfera ( $L_0$ ) com os seguintes casos:

- Processamento com dupla diferença do código (DDC);
- Processamento com dupla diferença da fase (DDF).

A tabela 2 apresenta várias informações, tais como: linhas de base, período de rastreamento (Tempo Universal - TU) e dia Juliano, com relação aos meses de junho (2003 – próximo ao solstício de inverno), outubro (2003 – próximo ao equinócio de outono), janeiro – fevereiro (2004 – próximo ao solstício de verão) e abril (2004 – próximo ao equinócio de primavera).

No processamento dos dados foram utilizadas as efemérides transmitidas, e o modelo adotado para corrigir o efeito da troposfera foi o de Hopfield (SEEBER, 2003). As observáveis abaixo de 15 graus de elevação não participaram do processamento, e não foi utilizado nenhum modelo ionosférico.

##### 4.2 Resultados e Análises

As figuras 1, 2, 3 e 4 mostram, respectivamente, os valores das discrepâncias nas resultantes planimétricas (N, E) com relação às coordenadas de referência para os processamentos realizados a partir da DDC e da DDF. De acordo com estas figuras pode-se notar a variação sazonal da ionosfera. Próximo aos equinócios, ou seja, nos meses de abril e outubro verifica-se que os valores das discrepâncias, de uma forma geral, são maiores. Com relação ao período de janeiro-fevereiro, foram obtidos os menores valores para as discrepâncias.

TABELA 2 – INFORMAÇÕES SOBRE A COLETA DE DADOS\*.

<b>INVERNO – JUNHO/2003</b>		
<b>Linhas de base</b>	<b>Período de Rastreo (TU)</b>	<b>Dia Juliano</b>
RT05	13:20 – 14:00	08/06/2003
RT15	14:30 – 15:10	08/06/2003
RT20	15:50 – 16:30	08/06/2003
RT30	14:50 – 16:50	15/06/2003
RT40	12:30 – 14:30	15/06/2003
RT60	12:50 – 15:50	28/06/2003
RT80	18:25 – 21:25	28/06/2003
RT100	17:25 – 20:25	29/06/2003
RT120	12:40 – 16:40	29/06/2003
<b>OUTONO – OUTUBRO/2003</b>		
RT05	11:12 – 11:52	18/10/2003
RT15	12:20 – 13:00	18/10/2003
RT20	13:15 – 13:55	18/10/2003
RT30	13:42 – 15:42	18/10/2003
RT40	14:32 – 16:32	18/10/2003
RT60	17:10 – 20:10	18/10/2003
RT80	11:30 – 14:30	19/10/2003
RT100	11:45 – 14:45	19/10/2003
RT120	15:22 – 19:22	19/10/2003
<b>VERÃO – JANEIRO e FEVEREIRO/2004</b>		
RT05	11:20 – 12:00	26/02/2004
RT15	12:40 – 13:20	26/02/2004
RT20	13:05 – 13:45	26/02/2004
RT30	14:00 – 16:00	28/01/2004
RT40	15:00 – 17:00	28/01/2004
RT60	11:05 – 14:05	03/02/2004
RT80	11:45 – 14:45	03/02/2004
RT100	14:50 – 17:50	26/02/2004
RT120	15:40 – 19:40	26/02/2004
<b>PRIMAVERA – ABRIL/2004</b>		
RT05	11:10 – 11:50	14/04/2004
RT15	12:15 – 12:55	14/04/2004
RT20	12:40 – 13:20	14/04/2004
RT30	13:25 – 15:25	14/04/2004
RT40	14:00 – 16:00	14/04/2004
RT60	17:00 – 20:00	14/04/2004
RT80	18:25 – 21:25	14/04/2004
RT100	12:00 – 15:00	28/04/2004
RT120	15:40 – 19:40	28/04/2004

\* Os dois números ao lado direito da sigla RT da primeira coluna indicam o comprimento aproximado (km) das linhas de base com relação à estação UEPP.

Esses resultados já eram esperados, pois nos equinócios os efeitos sistemáticos da ionosfera são mais intensos, enquanto que no solstício de verão são menos intensos. Isto já foi verificado em vários trabalhos, tais como: Camargo e Dal Poz (2002), Fonseca Junior (2002), Oliveira (2003), Matsuoka e Camargo (2004), Matsuoka (2007), Matsuoka e Camargo (2007), dentre outros.

Uma configuração menos favorável ainda para uma alta concentração de elétrons na região brasileira ocorre no solstício de inverno. O valor do TEC nesse período pode cair pela metade, se

comparado com o período próximo aos equinócios. Isto foi verificado em Oliveira (2003), onde foi calculado o TEC para o Brasil em vários períodos do ano de 2002. Em seus experimentos os maiores valores obtidos do TEC para o Brasil compreenderam o período de março/abril e setembro/outubro, ou seja, próximo aos equinócios. Nesse período o valor do TEC chegou a atingir 160 unidades de TEC, ao passo que no período de junho/julho o valor do TEC não ultrapassou 80 unidades. Próximo ao solstício de verão, ou seja, em janeiro e fevereiro, os valores do TEC foram aproximadamente 120 unidades.

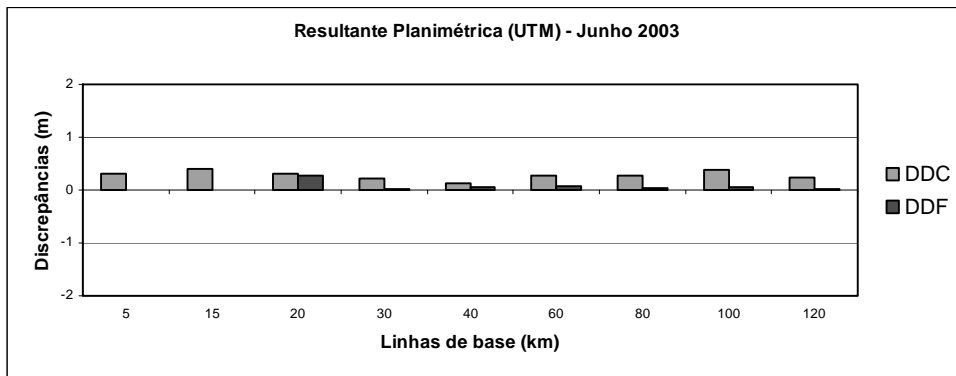


Fig. 1 – Discrepâncias na Resultante Planimétrica (Junho 2003).

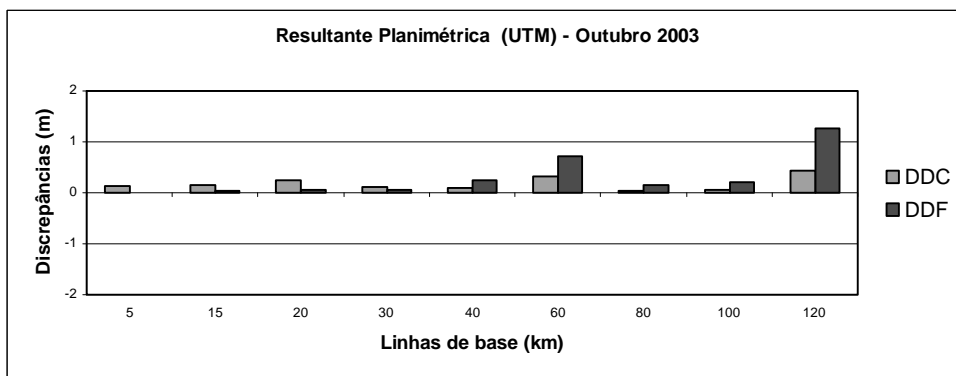


Fig. 2 – Discrepâncias na Resultante Planimétrica (Outubro 2003).

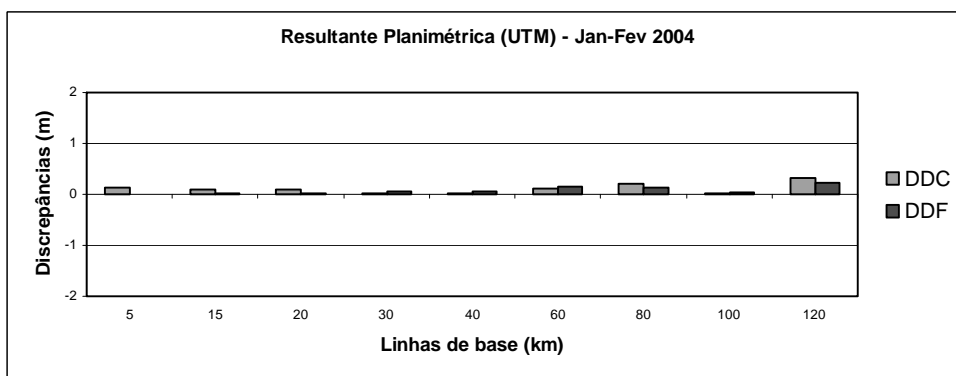


Fig.3 – Discrepâncias na Resultante Planimétrica (Jan-Fev 2004).

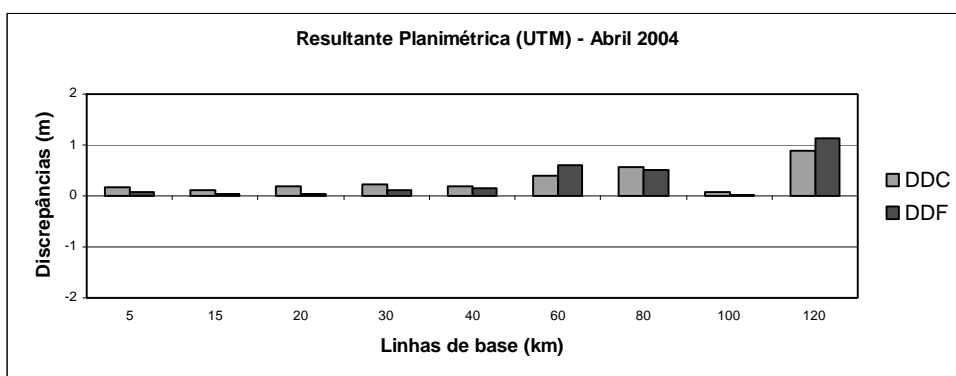


Fig. 4 – Discrepâncias na Resultante Planimétrica (Abril 2004).

Nos experimentos esperava-se que no inverno ocorressem os menores valores para as discrepâncias. Porém, os resultados obtidos não mostraram isto, de acordo com a figura 1, onde os valores das discrepâncias, obtidos a partir da DDC, de uma forma geral, foram maiores do que no verão (figura 3). Provavelmente isto ocorreu devido à coleta de dados em junho ter sido realizada com receptores de diferentes fabricantes (um Trimble 4000 SSI e um Ashtek ZXII). Com isso, o ruído residual da dupla diferença formado a partir do código provavelmente impossibilitou uma análise sazonal no mês de junho, pois as linhas de base absorveram parte deste ruído, juntamente com o resíduo ionosférico da DDC.

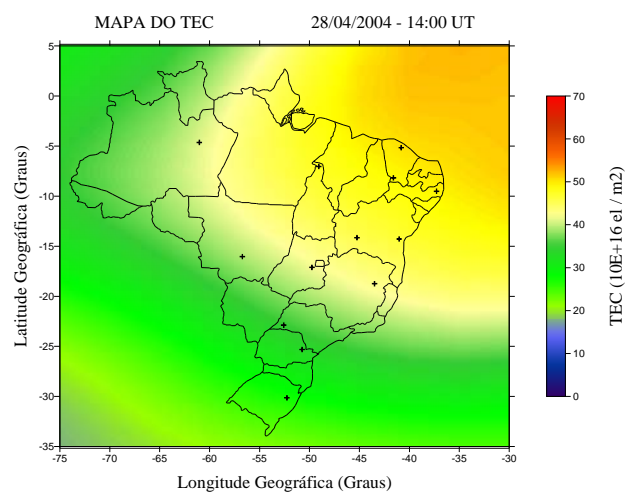
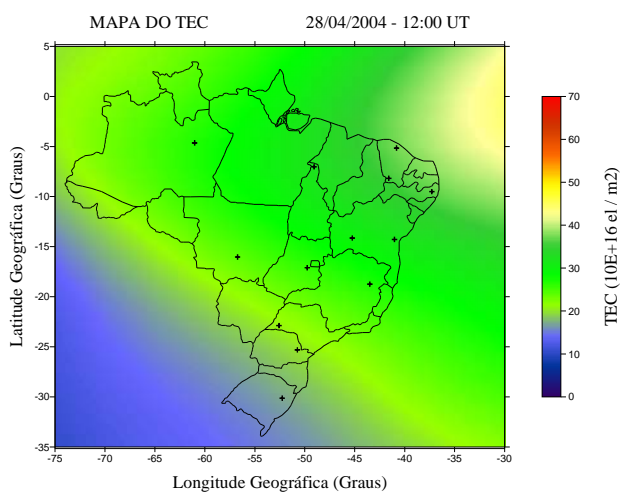
Com relação às discrepâncias obtidas a partir da DDF verifica-se que seus valores de uma forma geral foram similares aos obtidos em janeiro-fevereiro, pois o ruído da medida da fase é da ordem do milímetro. Com isso, as ambigüidades e as linhas de base absorveram um valor menor do ruído residual, fazendo com que os valores obtidos com a DDF sejam compatíveis no período de junho e janeiro-fevereiro. Desta forma as discrepâncias obtidas a partir da DDC, não refletiram a condição ionosférica no mês de junho.

No caso das outras estações do ano foram utilizados receptores da Trimble, sendo um 4600 LS (móvel) e um 4000 SSI (base), que utilizam as mesmas técnicas de correlação de código. Assim, os resultados evidenciaram a variação sazonal, pois os ruídos residuais da DDC e da DDF foram minimizados consideravelmente, tornando os erros residuais ionosféricos dominantes.

Um fato que deve ser salientado diz respeito à dependência da linha de base com relação à variação

diária da ionosfera. Por exemplo, no caso da figura 4, referente ao mês de abril, com relação à linha de base de 100 km, nota-se um caso que merece ser destacado. Esperava-se que esta linha de base apresentasse valores de discrepâncias maiores do que a linha de base de 80 ou 60 km, pois, à medida que o receptor móvel se distancia da estação base espera-se que as condições ionosféricas estejam menos correlacionadas nas duas estações. Assim, um maior valor da discrepância era esperado. Entre todas as linhas de base processadas a de 100 km foi a que proporcionou a menor discrepância, até mesmo melhor do que a linha de base de 05 km. De acordo com a tabela 02 (abril), o período de coleta de dados foi entre às 12 – 15 TU (09 – 12 HL). A partir das 15:40 TU (12:40 HL) se deu início a coleta de dados da estação móvel localizada à 120 km da estação base, com término às 19:40 TU (16:40 HL). Nesse período, de acordo com a variação diária da ionosfera, é um período em que a mesma se encontra no pico da atividade diária. Da mesma forma, nas linhas de base de 60 e 80 km, respectivamente, o tempo de rastreamento foi das 17 – 20 TU (14 – 17 HL) e 18:25 – 21:25 TU (15:25 – 18:25 HL), períodos de alta atividade ionosférica diária.

A figura 5 mostra a baixa variação do TEC no momento de rastreamento dos dados na linha de base de 100 km (12 – 15 TU), bem como a alta variação do TEC no momento de rastreamento da linha de base de 120 km (15:40 – 19:40 TU). Os dados nessas duas linhas de base foram coletados no mesmo dia (28/04/2004). Os mapas do TEC para o Brasil foram elaborados a partir de dados fornecidos pelo CODE (*Centre for Orbit Determination in Europe*) no formato IONEX (*IONosphere map EXchange*).



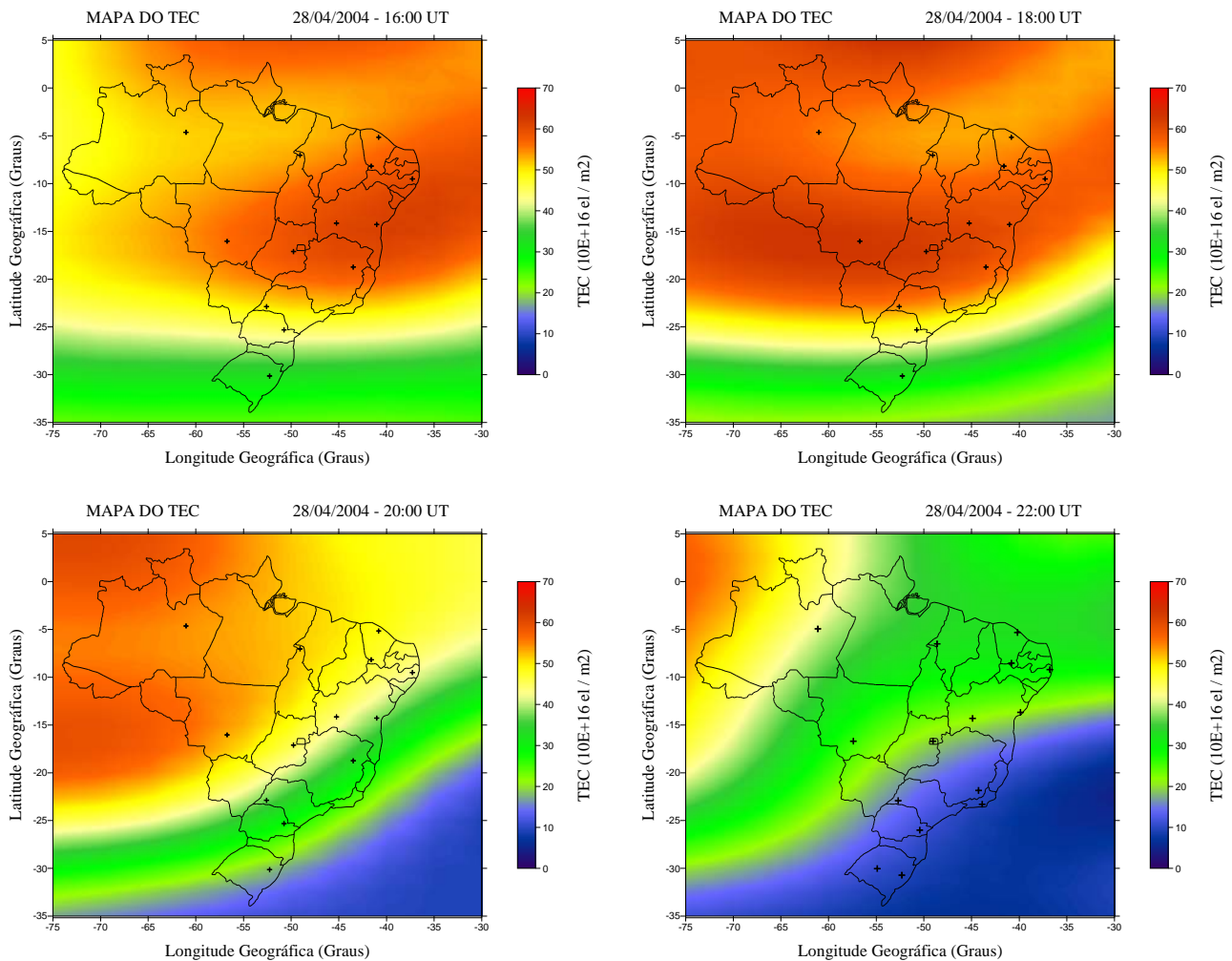


Fig. 5 – Mapas do TEC para o Brasil.

De acordo com a figura 5 pode-se notar a alta variação do TEC no momento de rastreamento dos dados da linha de base de 120 km (15:40 – 19:40 TU). Nesse momento verifica-se que parte da anomalia equatorial passa sobre a região de Presidente Prudente, proporcionando alta variação do TEC. Com isso, as discrepâncias obtidas nesse caso são as maiores (com relação ao mês de abril), para a DDF e DDC. Os valores das discrepâncias nesse caso atingiram aproximadamente 1 metro. No caso da linha de base de 100 km nota-se a baixa variação do TEC (12 – 15 TU). Conseqüentemente foram obtidos os menores valores das discrepâncias, até mesmo se comparado com as linhas de base mais curtas. Os valores foram, respectivamente, para a DDF e DDC, de 0,027 e 0,072 m.

Diante do exposto, verifica-se a complexidade de se definir o comprimento de uma linha de base como curta ou média. Era de se esperar que a discrepância da linha de base de 100 km fosse consideravelmente maior do que, por exemplo, a linha de base de 05 km, que, tradicionalmente é considerada como curta. Isso mostra a alta dependência da definição de linha de base com a variação espacial do TEC. Vale salientar que a alta variação verificada nos mapas apresentados na figura 5 ocorre devido à

passagem da anomalia equatorial sobre a região brasileira, que corresponde ao primeiro pico da anomalia.

Outro fato importante é quando a ionosfera está mais ativa, ou seja, próximo aos equinócios (abril e outubro) e nos períodos de máxima atividade diária da ionosfera, onde o gradiente espacial é mais acentuado, entre as 15 e 19 TU, (12 até 16:00 HL). Nesse período os resultados obtidos a partir da DDC são melhores dos obtidos a partir da DDF. Isto pode ser verificado na figura 2, onde nas linhas de base de 60 e 120 km as discrepâncias obtidas a partir da DDC são melhores do que a partir da DDF. Nas linhas de base de 60 e 120 km os períodos de rastreamento foram respectivamente das 17:10 às 20:10 TU (14:10 às 17:10 HL) e 15:22 às 19:22 TU (13:22 às 17:22 HL - horário de verão) Esses horários compreendem um período de alta atividade ionosférica. Situação semelhante ocorreu em abril, de acordo com a figura 4, com relação às mesmas linhas de base. Nesse caso os resultados obtidos a partir da DDC também foram melhores do que os obtidos a partir da DDF. Nessas linhas de base o período de rastreamento também compreendeu o período de máxima atividade diária da ionosfera. Na linha de base de 60 km o período foi das 17 até 20 TU (14 até 17 HL), enquanto que na linha de base de 120 km o



período foi das 15:40 até 19:40 TU (12:40 até 16:40 HL). Diante do exposto, verifica-se que, em períodos de pico da atividade ionosférica é preferível processar os dados a partir da DDC.

Em contrapartida, quando o vetor ambigüidade é solucionado como números inteiros, os resultados obtidos a partir da DDF são significativamente melhores do que os obtidos a partir da DDC. A tabela 3 mostra os casos em que o vetor ambigüidade foi solucionado como números inteiros

(*fixed*), bem como a solução do vetor ambigüidade como números reais (*float*). Foi adotado o valor “3” para o *Ratio Test* (teste da razão). Trata-se de um teste de discriminação da solução das ambigüidades que se tornou muito popular. Em suma, este teste compara a melhor solução do vetor das ambigüidades com a segunda melhor na forma de uma razão, sendo que esta razão deve ser maior ou igual a 3 (MONICO, 2007).

TABELA 3 – SOLUÇÃO DO VETOR AMBIGÜIDADE PARA AS QUATRO CAMPANHAS DE COLETA DE DADOS GPS.

Solução do Vetor Ambigüidade				
Linhas de base	Junho	Outubro	Jan - Fev	Abril
UEPP – RT05	Fixed	Fixed	Fixed	Fixed
UEPP – RT15	Fixed	Fixed	Fixed	Fixed
UEPP – RT20	Float	Fixed	Fixed	Fixed
UEPP – RT30	Float	Fixed	Float	Float
UEPP – RT40	Float	Float	Float	Float
UEPP – RT60	Float	Float	Float	Float
UEPP – RT80	Float	Float	Float	Float
UEPP – RT100	Float	Float	Float	Float
UEPP – RT120	Float	Float	Float	Float

De acordo com a tabela 3 e as discrepâncias apresentadas nas figuras 1, 2, 3 e 4 verifica-se que quando o vetor ambigüidade é solucionado, os valores das discrepâncias obtidas a partir da DDF são os menores.

No caso do mês de janeiro (solstício), onde normalmente a variação espacial do TEC é menor do que as outras estações do ano (com exceção do solstício de inverno), as discrepâncias obtidas a partir da DDC também são as menores, para linhas de base de até 20 km. Isso ocorreu, provavelmente, devido ao resíduo ionosférico da dupla diferença ser de pequena magnitude em janeiro. Com isso, as componentes das linhas de base absorveram um baixo valor do resíduo ionosférico, proporcionando valores compatíveis com os obtidos a partir da fase da onda portadora. Outro fator importante foi o período de coleta dos dados, realizado pela manhã, que corresponde a um período de menor atividade da ionosfera.

No caso do mês de junho o vetor ambigüidade foi solucionado para linhas de base de até 15 km. Esperava-se que no caso dos resultados referentes a este período o vetor ambigüidade da dupla diferença fosse solucionado para mais linhas de base. No entanto, como já mencionado, nesse caso foram utilizados dois receptores de diferentes fabricantes, fazendo com que a ambigüidade da dupla diferença absorvesse parte do ruído residual da DDF, juntamente com o resíduo ionosférico. Nas linhas de base de 05 e 15 km a coleta de dados foi realizada num período da ionosfera em que se encontrava em um baixo gradiente (13:20 até 15:10 TU – 10:20 até 12:10 HL). Em contrapartida, na linha de base 20 km a coleta de dados foi realizada no

período das (15:50 até 16:30 TU - 12:50 até 13:30 HL), período em que a ionosfera começa a ficar mais ativa.

No caso do mês de outubro, vetores ambigüidades foram solucionados em linhas de base de até 30 km. O período de coleta desses dados foi realizado entre 11:12 – 15:42 TU (08:12 – 12:42 HL), período de baixa variação do TEC. No entanto, o período de coleta de dados referente à linha de base de 40 km foi das 14:32 até 16:32 TU (11:32 até 13:32 HL), período em que a ionosfera começa a ficar mais ativa. Vetores das ambigüidades foram solucionados em linhas de base de até 20 km no mês de janeiro. O período de coleta de dados referente à linha de base de 30 km foi entre 14:00 e 16:00 TU (12:00 e 14:00 HL – horário de verão), período da ionosfera mais ativa. Com relação ao mês de abril, vetores das ambigüidades também foram solucionados até linha de base de 20 km.

Deve ser salientado que mesmo com o baixo valor de discrepância obtido com a linha de base de 100 km (abril), o vetor ambigüidade não foi solucionado como números inteiros. Isto provavelmente ocorreu devido à utilização das efemérides transmitidas no processamento dos dados GPS. Assim, o erro residual de órbita pode ter propagado para o vetor ambigüidade, impossibilitando, desta forma, a solução do vetor como números inteiros.

As figuras 6, 7, 8 e 9 mostram respectivamente, os valores das discrepâncias das coordenadas altimétricas (h) com relação às coordenadas tomadas como referência, calculados a partir dos processamentos da DDC e DDF.

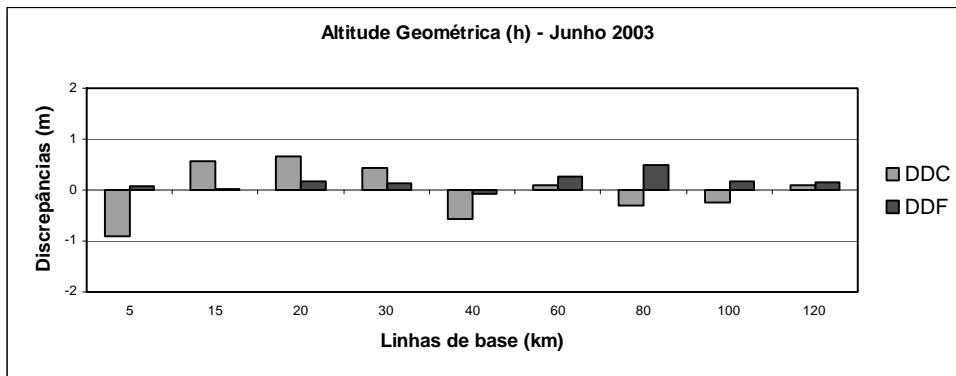


Fig. 6 – Discrepâncias na Componente Altimétrica (Junho 2003).

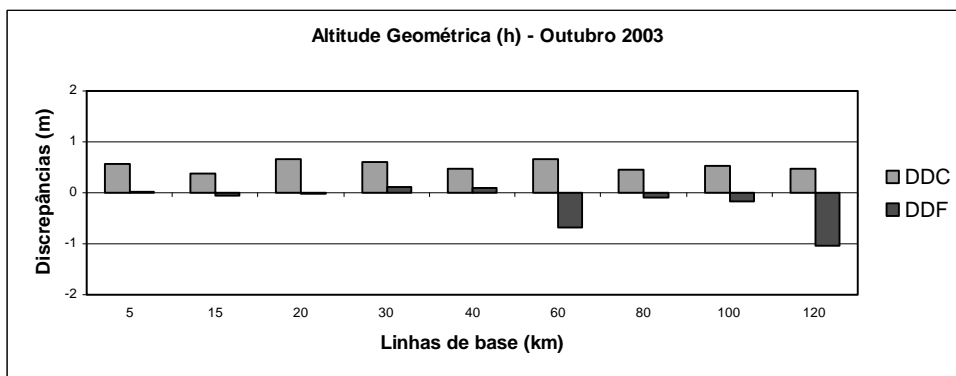


Fig. 7 – Discrepâncias na Componente Altimétrica (Outubro 2003).

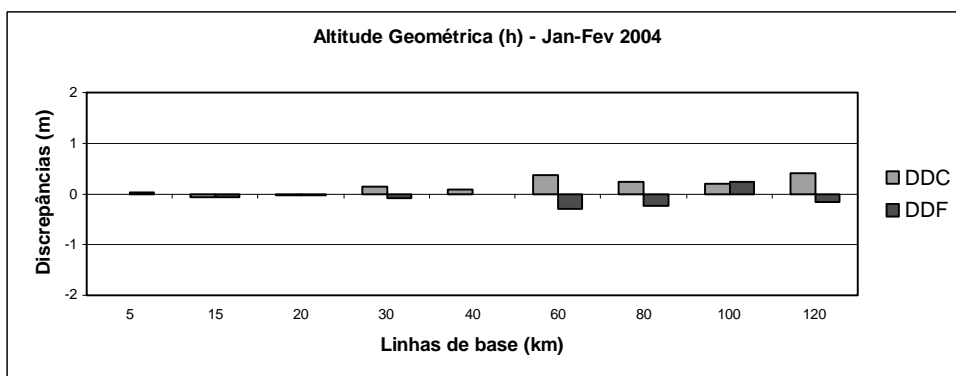


Fig. 8 – Discrepâncias na Componente Altimétrica (Jan-Fev 2004).

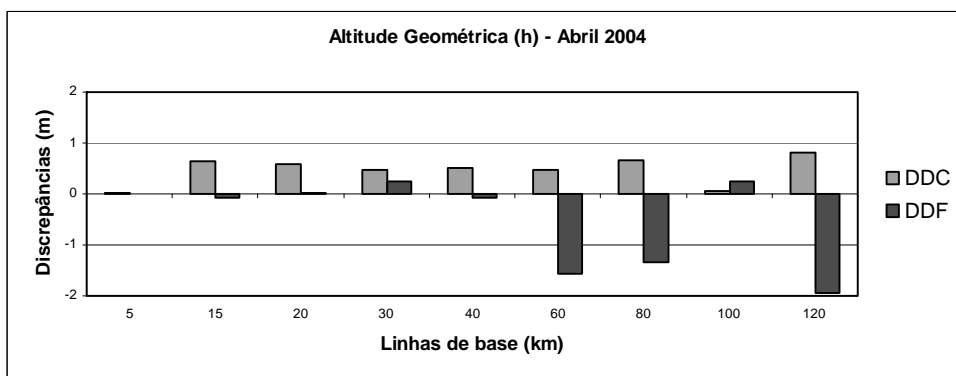


Fig. 9 – Discrepâncias na Componente Altimétrica (Abril 2004).

De acordo com as figuras 6, 7, 8 e 9, além da variação diária da ionosfera, pode-se notar também a variação sazonal da ionosfera de forma mais acentuada do que os resultados obtidos na resultante planimétrica (com exceção do mês de junho). Nota-se também que o efeito sistemático da ionosfera é mais intenso na altitude geométrica, fazendo com que os valores das discrepâncias atinjam aproximadamente, em alguns casos, 2,0 metros (figura 9). Este alto valor de discrepância, referente à linha de base 120 km, como já mencionado na análise planimétrica, se deve a passagem do primeiro pico da anomalia equatorial.

Novamente verifica-se a forte influência do ruído residual da DDC nos resultados obtidos, de acordo com a figura 6, devido a utilização de receptores de diferentes fabricantes na coleta de dados referente ao mês de junho. Próximo aos solstícios de inverno ocorre a menor densidade do TEC, bem como de seu gradiente espacial. No entanto, em junho, nas linhas de base de 05, 15 e 20 km, verifica-se altos valores das discrepâncias nos resultados obtidos a partir da DDC. Em janeiro, cuja densidade do TEC é maior do que junho verifica-se que, mesmo assim, os valores das discrepâncias para linhas de base de 05, 15 e 20 km foi baixo, compatível com os resultados obtidos a partir da DDF. No mês de junho os resultados eram para serem similares ou melhores, pois o gradiente espacial do TEC nesse período, normalmente, é o mais baixo do ano. No entanto não foi verificado este fato, devido ao ruído residual da DDC, que provavelmente foi dominante para essas linhas de base.

## 5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

De acordo com os resultados apresentados, foi possível realizar uma análise parcial da variação sazonal da ionosfera, devido ao ruído residual da DDC ter afetado os resultados no mês de junho. Isto ocorreu devido à utilização de dois receptores de diferentes fabricantes na coleta de dados em junho. Nesta campanha foram utilizados um receptor Trimble 4000 SSI e um Ashtech ZXII.

Neste experimento foi possível verificar na prática que em uma linha de base mais curta os erros devido à ionosfera podem estar menos correlacionados do que numa linha de base mais longa, devido à variação diária da ionosfera. Com isso, conclui-se na prática que se deve evitar qualificar determinada linha de base como sendo curta ou média, sem antes conhecer as condições ionosféricas na região de interesse. Contudo, esta tarefa não é fácil, principalmente no Brasil, onde várias irregularidades e anomalias ocorrem, sendo que estas variam de acordo com a época do ano e da hora local, bem como a localização geográfica.

Próximo aos equinócios (abril e outubro) e em períodos de máxima atividade diária da ionosfera (15 – 19 TU), ou seja, em períodos em que a ionosfera está mais ativa, que se encontra sob o efeito da anomalia equatorial, os valores das discrepâncias obtidas a partir

da DDC foram melhores do que os obtidos a partir da DDF.

É importante destacar que a anomalia equatorial varia em intensidade, de acordo com vários parâmetros, como por exemplo, à época do ano. Assim, mesmo considerando que a anomalia equatorial ocorre em toda época do ano, em janeiro sua intensidade é menor do que os meses de outubro ou abril. Com isso, não foi verificado efeitos significativos no mês de janeiro, mesmo considerando a linha de base de 120 km, cuja coleta de dados ocorreu no período de máxima atividade ionosférica (15:40 – 19:40 TU), que coincide com a passagem do primeiro pico da anomalia equatorial. Desta forma, o efeito da anomalia equatorial no posicionamento relativo irá depender da época do ano, dentre outros fatores, como por exemplo, o ciclo solar.

Por fim, com base nos experimentos realizados, recomenda-se aos usuários do GNSS realizar um planejamento adequado da coleta de dados GPS. Pois, dependendo do período de coleta de dados, em função da variação diária da ionosfera e com a época do ano, a anomalia equatorial pode estar menos intensa, fazendo com que a variação espacial do TEC seja menor. Assim, resultados satisfatórios podem ser obtidos com a utilização de receptores de simples frequência no posicionamento relativo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

APPLETON, E.V. Two anomalies in the ionosphere. *Nature*, 157, 691.1946.

BATISTA, I.S.. Notas de aula do curso “**Introdução à ionosfera e a propagação de ondas**” ministrado no Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual Paulista, 2003.

BOCK, Y.. Medium Distance GPS Measurements. In: Teunissen, P.J.; Kleusberg, A. **GPS for Geodesy**. 2.ed. Delft: Netherlands Geodetic Commission, 1998. p.483-536.

CAMARGO, P. O.; DAL POZ, W. R.. Produção de mapas da ionosfera para o Brasil: primeiras experiências na FCT/UNESP. In: **Mitshita, E. A. ed. Série em Ciências Geodésicas**. Curitiba: Imprensa Universitária, 2002. 395p. Vol. 2, p. 80-99.

DAL POZ, W.R. **Posicionamento Relativo na Região Equatorial em Diversas Condições Ionosféricas**. 2005. 161p. Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, SP.

DAL POZ, W.R.; CAMARGO, P.O. Conseqüências de uma Tempestade Geomagnética no Posicionamento Relativo com Receptores GPS de Simples Frequência.

**Boletim de Ciências Geodésicas**, 2006, v.12, n.2, p. 275-294.

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

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

GOAD, C. C.. Short Distance GPS Models. In: Teunissen, P.J.; Kleusberg, A. **GPS for Geodesy**. 2.ed. Delft: Netherlands Geodetic Commission, 1998. p.457-481.

INCRA (Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária) – **Norma Técnica para georreferenciamento de imóveis rurais**. 1º.ed. 2003.

KIRCHHOFF, V.W.J.H.. **Introdução à geofísica espacial**. São Paulo: Nova Stella, Ed. USP/FAPESP, 1991. 149p.

KLOBUCHAR, J.A.. Ionospheric time-delay algorithm for single-frequency GPS users. **IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems**, v.23, n.3, p.325-331, 1987.

LEICK, A. **GPS Satellite Surveying**. New York, John Wiley & Sons, 1995, 560p.

MACNAMARA, L.F. **The ionosphere: communications, surveillance, and direction finding**. Florida, Krieger Publishing Company, 1991. 237p.

MATSUOKA, M.T.; CAMARGO, P.O.. Cálculo do TEC usando dados de receptores GPS de dupla frequência para a produção de mapas da ionosfera para a região brasileira. **Revista Brasileira de Cartografia**, n.56/01, p.14-27, julho/2004.

MATSUOKA, M.T.. **Influência de diferentes condições da ionosfera no posicionamento por ponto com GPS: Avaliação na região brasileira**. 2007. 263p. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) - Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, 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 de Ciências Geodésicas**, v.13, n.2, p.253-270, 2007.

MONICO, J.F.G.. **Posicionamento pelo GNSS: descrição, fundamentos e aplicações**. 2º ed. São Paulo: Ed. da Unesp, 2007. 476p.

OLIVEIRA, A.B.V.. **Uso do GPS para o estudo da anomalia equatorial**. 2003. 144p. Tese (Mestrado na Área de Concentração em Telecomunicações) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Eletrônica e Computação, Instituto Tecnológico da Aeronáutica (ITA), São José dos Campos, SP.

SCHUNK, R.W.; NAGY, A.F.. **Ionosphere: Physics, Plasma Physics, and Chemistry**. Cambridge, Cambridge University Press, 2000. 554p.

SEEBER, G.. **Satellite Geodesy**. 2º ed. Berlin-New York: Walter de Gruyter, 2003. 589p.

WANNINGER, L.; SEEBER, G.; CAMPOS, M.A. Use of GPS in the south of Brazil under severe ionospheric conditions. In: **IAG Symposium 111, Heidelberg, Aug. 13, 1991**.

WEBSTER, I.. **A Regional Model for Prediction of Ionospheric Delay for Single Frequency Users of the Global Positioning System**. New Brunswick. 1993. Thesis, Department of Surveying Engineering, University of New Brunswick.