

**LEANDRO TEIXEIRA DE CARVALHO**

**USO DE MODELO REGIONAL NA MITIGAÇÃO DOS EFEITOS DA  
IONOSFERA EM OBSERVAÇÕES COM RECEPTORES GPS DE UMA  
FREQUÊNCIA**

Dissertação apresentada à  
Universidade Federal de Viçosa,  
como parte das exigências do  
Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Civil, para obtenção do  
título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA  
MINAS GERAIS - BRASIL  
2010

**LEANDRO TEIXEIRA DE CARVALHO**

**USO DE MODELO REGIONAL NA MITIGAÇÃO DOS EFEITOS DA  
IONOSFERA EM OBSERVAÇÕES COM RECEPTORES GPS DE UMA  
FREQUÊNCIA**

Dissertação apresentada à  
Universidade Federal de Viçosa,  
como parte das exigências do  
Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Civil, para obtenção do  
título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 26 de março de 2010.

---

Prof. João Francisco Galera Monico

---

Prof. Gilberto Chohaku Sedyama

---

Prof. Antônio Simões Silva  
(Coorientador)

---

Prof. Dalto Domingos Rodrigues  
(Coorientador)

---

Prof. Moisés Ferreira Costa  
(Orientador)

A todas as pessoas que  
contribuíram de alguma forma para  
a realização deste trabalho e a  
todos aqueles que acreditaram em  
sua concretização.

“Um sonho que se sonha só  
é só um sonho que se sonha só  
mas sonho que se sonha junto é realidade”

**Raul Seixas**

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais Francisco e Abigail, aos meus irmãos, Antônio, Damásio, Fátima e José, pelo apoio, incentivo e compreensão.

A Universidade Federal de Viçosa, pela oportunidade e à cidade de Viçosa pelo acolhimento.

À Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pelo apoio financeiro.

Ao Professor Dr. Moisés Ferreira Costa, pela confiança, apoio e incentivo, o que já vem ocorrendo desde a graduação e no trabalho final de curso.

Aos professores do Setor de Engenharia de Agrimensura, que contribuíram fortemente para a minha formação acadêmica.

Ao IBGE, pela colaboração com a disponibilização dos dados das estações da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo – RBMC.

Aos amigos Heber e João Felipe pela ajuda com a parte de programação deste trabalho.

Ao amigo Alberto que sanou dúvidas e problemas durante a utilização do PPP-IBGE.

A todos os amigos da pós-graduação pelas conversas, horas de estudo e bons momentos de descontração.

A todos os amigos, amigos estes que se tornaram irmãos, e que foram presentes ganhos nestes oito anos em viçosa.

A todos aqueles que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho e a aqueles que não por omissão, mas por esquecimento não foram citados aqui, mas de mesma forma dos descritos, têm a mesma estima e gratidão.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>vii</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>x</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS .....</b>	<b>xii</b>
<b>RESUMO .....</b>	<b>xiv</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>xv</b>
<b>1 – INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	1
1.2 – CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA.....	11
1.3 – OBJETIVOS .....	12
1.4 – CONTEÚDO DO TRABALHO.....	13
<b>2 – A IONOSFERA .....</b>	<b>14</b>
2.1 – CONSIDERAÇÕES GERAIS .....	14
2.2 – REFRAÇÃO IONOSFÉRICA.....	17
<b>3 – MODELOS DE MINIMIZAÇÃO DOS EFEITOS IONOSFÉRICOS .....</b>	<b>23</b>
3.1 – INTRODUÇÃO .....	23
3.2 – MODELO <i>BROADCAST</i> OU DE KLOBUCHAR.....	25
3.3 – MODELOS QUE USAM OBSERVAÇÕES DE UMA FREQUÊNCIA.....	26
<b>3.3.1 - Modelo da lâmina ionosférica .....</b>	<b>27</b>
<b>3.3.2 - Modelo do ponto ionosférico .....</b>	<b>28</b>
<b>3.3.3 - Modelo diário da função cosseno.....</b>	<b>28</b>
<b>3.3.4 - Outros Modelos .....</b>	<b>29</b>
3.4 – MODELOS QUE USAM OBSERVAÇÕES DE DUPLA FREQUÊNCIA.....	30
<b>3.4.1 – Correção a partir das medidas de pseudodistância.....</b>	<b>30</b>
<b>3.4.2 – Correção a partir das medidas da fase portadora .....</b>	<b>31</b>
<b>3.4.3 – Modelos para calcular a correção da ionosfera .....</b>	<b>32</b>
<b>4 - MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>34</b>
4.1 – ÁREA DE ESTUDO E DADOS .....	34
4.2 – O APLICATIVO CICALC .....	37
4.3 – IMPLEMENTAÇÃO DA METODOLOGIA.....	40
<b>5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>43</b>
5.1 – COEFICIENTES DO MODELO .....	43
5.2 – VALIDAÇÃO DO MODELO .....	51
5.3 – COMPARAÇÃO ENTRE VALORES DE VTEC.....	56

<b>6 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....</b>	<b>62</b>
<b>7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>64</b>
<b>APÊNDICE A – MODELO DE KLOBUCHAR .....</b>	<b>67</b>
<b>APÊNDICE B – MATRIZES DO AJUSTAMENTO .....</b>	<b>71</b>
<b>APÊNDICE C – COEFICIENTES ESTIMADOS PARA O MODELO.....</b>	<b>75</b>
<b>APÊNDICE D – COMPARATIVO ENTRE AS COORDENADAS OFICIAIS E AS ENCONTRADAS NO PROCESSAMENTO UTILIZANDO O PPP-IBGE - TABELAS COM VALORES DIÁRIOS .....</b>	<b>78</b>
<b>APÊNDICE E – COMPARATIVO ENTRE AS COORDENADAS OFICIAIS E AS ENCONTRADAS NO PROCESSAMENTO UTILIZANDO O PPP-IBGE - GRÁFICOS DIÁRIOS .....</b>	<b>84</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estrutura básica do sinal GPS .....	2
Figura 2 – Estações da RBMC, em operação e em implantação.....	8
Figura 3 – Principais camadas da ionosfera .....	15
Figura 4 – Número médio mensal de manchas solares – período de 1850 a 2008 .....	16
Figura 5 – Geometria do atraso ionosférico .....	21
Figura 6 – Representação da ionosfera no modelo <i>broadcast</i> .....	25
Figura 7 - Estações da RBMC utilizadas para a estimativa dos parâmetros do modelo. ....	34
Figura 8 – Tela principal do aplicativo CiCalc .....	37
Figura 9 – Valores do coeficiente a1 para os dias em estudo .....	43
Figura 10 – Valores do coeficiente a2 para os dias em estudo .....	44
Figura 11 – Valores do coeficiente a3 para os dias em estudo .....	44
Figura 12 – Valores do coeficiente a4 para os dias em estudo .....	44
Figura 13 – Valores do coeficiente a5 para os dias em estudo .....	44
Figura 14 – Valores do coeficiente a6 para os dias em estudo .....	45
Figura 15 – Valores do coeficiente a7 para os dias em estudo .....	45
Figura 16 – Valores do coeficiente a8 para os dias em estudo .....	45
Figura 17 – Valores do coeficiente a9 para os dias em estudo .....	45
Figura 18 – Valores do coeficiente a10 para os dias em estudo .....	46
Figura 19 – Valores do coeficiente a11 para os dias em estudo .....	46
Figura 20 – Valores do coeficiente a12 para os dias em estudo .....	46
Figura 21 – Valores do coeficiente a13 para os dias em estudo .....	46
Figura 22 – Valores do coeficiente a14 para os dias em estudo .....	47
Figura 23 – Valores do coeficiente a15 para os dias em estudo .....	47
Figura 24 – Valores médios das discrepâncias para o verão .....	54
Figura 25 – Valores médios das discrepâncias para o outono .....	54
Figura 26 – Valores médios das discrepâncias para o inverno.....	54
Figura 27 – Valores médios das discrepâncias para a primavera.....	55
Figura 28 – Valores de VTEC, para 0°S 45°O, do IGS e CiCalc para o dia 31 (Verão).....	56
Figura 29 – Valores de VTEC, para 10°S 45°O, do IGS e CiCalc para o dia 31 (Verão).....	57

Figura 30 – Valores de VTEC, para 20°S 45°O, do IGS e CiCalc para o dia 31 (Verão).....	57
Figura 31 – Valores de VTEC, para 30°S 45°O, do IGS e CiCalc para o dia 31 (Verão).....	57
Figura 32 – Valores de VTEC, para 0°S 45°O, do IGS e do CiCalc para o dia 133 (Outono).....	57
Figura 33 – Valores de VTEC, para 10°S 45°O, do IGS e do CiCalc para o dia 133 (Outono).....	58
Figura 34 – Valores de VTEC, para 20°S 45°O, do IGS e do CiCalc para o dia 133 (Outono).....	58
Figura 35 – Valores de VTEC, para 30°S 45°O, do IGS e do CiCalc para o dia 133 (Outono).....	58
Figura 36 – Valores de VTEC, para 0°S 45°O, do IGS e do CiCalc para o dia 221 (Inverno).....	58
Figura 37 – Valores de VTEC, para 10°S 45°O, do IGS e do CiCalc para o dia 221 (Inverno).....	59
Figura 38 – Valores de VTEC, para 20°S 45°O, do IGS e do CiCalc para o dia 221 (Inverno).....	59
Figura 39 – Valores de VTEC, para 30°S 45°O, do IGS e do CiCalc para o dia 221 (Inverno).....	59
Figura 40 – Valores de VTEC, para 0°S 45°O, do IGS e do CiCalc para o dia 311 (Primavera).....	60
Figura 41 – Valores de VTEC, para 10°S 45°O, do IGS e do CiCalc para o dia 311 (Primavera).....	60
Figura 42 – Valores de VTEC, para 20°S 45°O, do IGS e do CiCalc para o dia 311 (Primavera).....	60
Figura 43 – Valores de VTEC, para 30°S 45°O, do IGS e do CiCalc para o dia 311 (Primavera).....	61
Figura E.1: Valores das discrepâncias para o dia 002.....	85
Figura E.2: Valores das discrepâncias para o dia 010.....	85
Figura E.3: Valores das discrepâncias para o dia 022.....	85
Figura E.4: Valores das discrepâncias para o dia 031.....	85
Figura E.5: Valores das discrepâncias para o dia 041.....	86
Figura E.6: Valores das discrepâncias para o dia 050.....	86
Figura E.7: Valores das discrepâncias para o dia 060.....	86
Figura E.8: Valores das discrepâncias para o dia 070.....	86
Figura E.9: Valores das discrepâncias para o dia 080.....	87
Figura E.10: Valores das discrepâncias para o dia 090.....	87
Figura E.11: Valores das discrepâncias para o dia 102.....	87

Figura E.12: Valores das discrepâncias para o dia 111 .....	87
Figura E.13: Valores das discrepâncias para o dia 118 .....	88
Figura E.14: Valores das discrepâncias para o dia 133 .....	88
Figura E.15: Valores das discrepâncias para o dia 141 .....	88
Figura E.16: Valores das discrepâncias para o dia 151 .....	88
Figura E.17: Valores das discrepâncias para o dia 161 .....	89
Figura E.18: Valores das discrepâncias para o dia 171 .....	89
Figura E.19: Valores das discrepâncias para o dia 181 .....	89
Figura E.20: Valores das discrepâncias para o dia 191 .....	89
Figura E.21: Valores das discrepâncias para o dia 201 .....	90
Figura E.22: Valores das discrepâncias para o dia 211 .....	90
Figura E.23: Valores das discrepâncias para o dia 221 .....	90
Figura E.24: Valores das discrepâncias para o dia 231 .....	90
Figura E.25: Valores das discrepâncias para o dia 240 .....	91
Figura E.26: Valores das discrepâncias para o dia 251 .....	91
Figura E.27: Valores das discrepâncias para o dia 261 .....	91
Figura E.28: Valores das discrepâncias para o dia 271 .....	91
Figura E.29: Valores das discrepâncias para o dia 281 .....	92
Figura E.30: Valores das discrepâncias para o dia 291 .....	92
Figura E.31: Valores das discrepâncias para o dia 301 .....	92
Figura E.32: Valores das discrepâncias para o dia 311 .....	92
Figura E.33: Valores das discrepâncias para o dia 321 .....	93
Figura E.34: Valores das discrepâncias para o dia 331 .....	93
Figura E.35: Valores das discrepâncias para o dia 341 .....	93
Figura E.36: Valores das discrepâncias para o dia 351 .....	93
Figura E.37: Valores das discrepâncias para o dia 357 .....	94
Figura E.38: Valores das discrepâncias para o dia 366 .....	94

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Frequências e comprimentos de onda do sistema GPS .....	2
Tabela 2: Fontes de erro e efeitos no sistema GPS .....	4
Tabela 3: Correção do efeito ionosférico em metros .....	5
Tabela 4: Características das principais camadas da ionosfera .....	15
Tabela 5: Efeito máximo da ionosfera na direção da vertical.....	21
Tabela 6: Dias e estações da RBMC utilizadas na estimativa dos parâmetros no período do verão.....	35
Tabela 7: Dias e estações da RBMC utilizadas na estimativa dos parâmetros no período do outono.....	35
Tabela 8: Dias e estações da RBMC utilizadas na estimativa dos parâmetros no período do inverno.....	36
Tabela 9: Dias e estações da RBMC utilizadas na estimativa dos parâmetros no período da primavera.....	36
Tabela 10: Estatísticas dos coeficientes estimados para os dias em estudo no período do Verão .....	48
Tabela 11: Estatísticas dos coeficientes estimados para os dias em estudo no período do Outono .....	49
Tabela 12: Estatísticas dos coeficientes estimados para os dias em estudo no período do Inverno.....	49
Tabela 13: Estatísticas dos coeficientes estimados para os dias em estudo no período da Primavera .....	50
Tabela 14: Estatísticas das discrepâncias no eixo X para os dias em estudo .....	51
Tabela 15: Estatísticas das discrepâncias no eixo Y para os dias em estudo .....	52
Tabela 16: Estatísticas das discrepâncias no eixo Z para os dias em estudo .....	52
Tabela 17: Estatísticas das discrepâncias na altura geométrica para os dias em estudo .....	53
Tabela 18: Estatísticas das discrepâncias na resultante para os dias em estudo .....	53
Tabela C.1: Coeficientes estimados para os dias em estudo no período do Verão .....	76
Tabela C.2: Coeficientes estimados para os dias em estudo no período do Outono .....	76

Tabela C.3: Coeficientes estimados para os dias em estudo no período do Inverno .....	77
Tabela C.4: Coeficientes estimados para os dias em estudo no período da Primavera .....	77
Tabela D.1: Discrepâncias no eixo X para os dias em estudo .....	79
Tabela D.2: Discrepâncias no eixo Y para os dias em estudo .....	80
Tabela D.3: Discrepâncias no eixo Z para os dias em estudo .....	81
Tabela D.4: Discrepâncias na altura geométrica para os dias em estudo ....	82
Tabela D.5: Discrepâncias na resultante para os dias em estudo .....	83

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<b>Abreviatura/Sigla</b>	<b>Significado</b>
C/A	<i>Coarse Aquisition</i>
CODE	<i>Centre for Orbit Determination in Europe</i>
DoD	<i>Department of Defense</i>
ESA	<i>European Space Agency</i>
GIM	<i>Global Ionospheric Maps</i>
GLONASS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GSD	<i>Geodetic Survey Division</i>
IBGE	Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IGS	<i>International GPS Service</i>
IONEX	<i>Ionosphere Map Exchange Format</i>
ITRF	<i>International Terrestrial Reference Frame</i>
JPL	<i>Jet Propulsion Laboratory</i>
MMQ	Método dos Mínimos Quadrados
MVC	Matriz Variância Covariância
NAVSTAR – GPS	<i>Navigation Satellite with Time And Ranging – Global Positioning System</i>
NRCan	<i>Natural Resources Canada</i>
P	<i>Precise/Protected</i>
PPP	Posicionamento por Ponto Preciso
PRN	<i>Pseudo Random Noise</i>

RBMC	Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo
RINEX	<i>Receiver Independent Exchange Format</i>
SA	<i>Selective Availability</i>
SGB	Sistema Geodésico Brasileiro
SIRGAS	Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas
TEC	<i>Total Electron Content</i>
TECU	<i>Total Electron Content Unit</i>
UPC	<i>Universitat Politècnica de Catalunya</i>
VTEC	<i>Vertical TEC</i>

## RESUMO

CARVALHO, Leandro Teixeira de, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, Março de 2010. **Investigação de um modelo regional para mitigação dos efeitos da ionosfera na propagação do sinal em receptores GPS de uma frequência.** Orientador: Moisés Ferreira Costa, Coorientadores: Dalto Domingos Rodrigues, Antônio Simões Silva e Carlos Antônio Oliveira Vieira.

Atualmente, a maior fonte de erro sistemático no posicionamento com receptores de uma frequência é a refração ionosférica. Desta forma é necessário dispor de uma estratégia mais efetiva para minimizar os efeitos da ionosfera, que tem sido investigada a partir do uso de modelos regionais. Neste trabalho, foi implementado um modelo utilizando uma série do tipo Fourier para representar a ionosfera na região brasileira. Os parâmetros do modelo foram estimados por ajustamento de observações, tendo como entrada os dados coletados de algumas estações da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC). A fim de validar o modelo foram realizados Posicionamentos por Ponto Preciso da estação VICO da RBMC em alguns dias do ano utilizando quatro estratégias, que são:  $L_1$  e  $L_2$ ,  $L_1$  sem correção,  $L_1$  com correção pelo modelo proposto neste trabalho e  $L_1$  com correção pelos mapas de VTEC do IGS. As coordenadas obtidas foram comparadas com as coordenadas oficiais, fornecidas pelo IBGE, obtendo uma melhora média por meio do modelo proposto, em relação ao posicionamento sem nenhuma correção, de 65% e 90% para as discrepâncias da resultante e para a altura geométrica, respectivamente.

## **ABSTRACT**

CARVALHO, Leandro Teixeira de, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, March 2010. **Investigation of a regional model for mitigation of the ionospheric effects on propagation of the signal in GPS receptors at a given frequency.** Advisor: Moisés Ferreira Costa, Co-advisors: Dalto Domingos Rodrigues, Antônio Simões Silva and Carlos Antônio Oliveira Vieira.

Currently, the greatest source of systematic error in positioning with frequency receptors is ionospheric refraction. Therefore it is necessary to provide a more effective strategy to minimize ionospheric effects which has been investigated using regional models. In this study, a model using a Fourier series to represent the ionosphere in Brazil was utilized. Parameters of the model were estimated by adjusting to observed data, where input data were those collected from stations of the *Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo* (RBMC). With the objective of validating the model, Precise Point Positioning of the VICO station of the RBMC was performed on certain days of the year using four strategies which are:  $L_1$  and  $L_2$ ,  $L_1$  without correction,  $L_1$  with correction by the model proposed in this study and  $L_1$  with correction by the VTEC maps of the IGS. The obtained coordinates were compared with the official coordinates provided by the IBGE, showing a better average given by the proposed model in relation to positioning with no correction, of 65% and 90% for the resultant discrepancies and geometric height, respectively.

## 1 – INTRODUÇÃO

### 1.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O NAVSTAR – GPS (*NAVigation Satellite with Time And Ranging – Global Positioning System*), ou simplesmente GPS, é um sistema de posicionamento global, desenvolvido pelo departamento de defesa dos Estados Unidos da América (DoD – *Department of Defense*), visando ser o principal sistema de navegação das forças armadas americanas. Nos últimos anos, devido à sua alta acurácia, do grande desenvolvimento da tecnologia envolvida nos equipamentos GPS e da abertura deste sistema à comunidade civil, uma grande comunidade usuária surgiu dos mais variados segmentos, dentre os quais pode-se citar: navegação, posicionamento topográfico e geodésico, meteorologia, agricultura, etc (MONICO, 2000).

O sistema consiste de pelo menos 24 satélites distribuídos em seis planos orbitais igualmente espaçados, com quatro satélites em cada plano, numa altitude aproximada de 20.200 km. Os planos orbitais tem inclinação de 55° em relação ao Equador e o período orbital é de aproximadamente 12 horas siderais. Esta configuração garante que, no mínimo, quatro satélites GPS sejam visíveis em qualquer local da superfície terrestre, a qualquer hora (SILVA, 2006).

Todos os satélites da constelação GPS transmitem sinais em duas frequências da banda L, denominadas L1 e L2, que são obtidas a partir da frequência fundamental ( $f_0$ ) de 10,23 MHz multiplicada por 154 e 120 respectivamente. Em 1998, foi anunciado pelo DoD a modernização do sistema GPS, em que os novos satélites colocados em órbita, passariam a transmitir um novo código civil modulado na portadora L2, além de uma nova portadora denominada L5, que teria frequência de 115 vezes a frequência fundamental (MONICO, 2008). As frequências ( $f$ ) e os comprimentos de onda ( $\lambda$ ) resultantes são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Frequências e comprimentos de onda do sistema GPS. Fonte: Adaptado de ODIJK, 2003

Portadora	Frequência f (MHz)	Comprimento de onda $\lambda$ (cm)
L1	1575,42	19,03
L2	1227,60	24,42
L5	1176,45	25,48

O código C/A (*Coarse/Aquisition* – Fácil Aquisição) é modulado apenas na portadora L1 e tem comprimento de onda de aproximadamente 300 m e frequência de 1,023 MHz. O código P (*Precise* ou *Protected* – Preciso ou Protegido), que é reservado ao uso militar americano e a usuários autorizados, tem comprimento de onda de aproximadamente 30 m e é transmitido com uma frequência de 10,23 MHz além de ser modulado nas duas portadoras (L1 e L2). A geração dos sinais GPS é ilustrada na Figura 1.

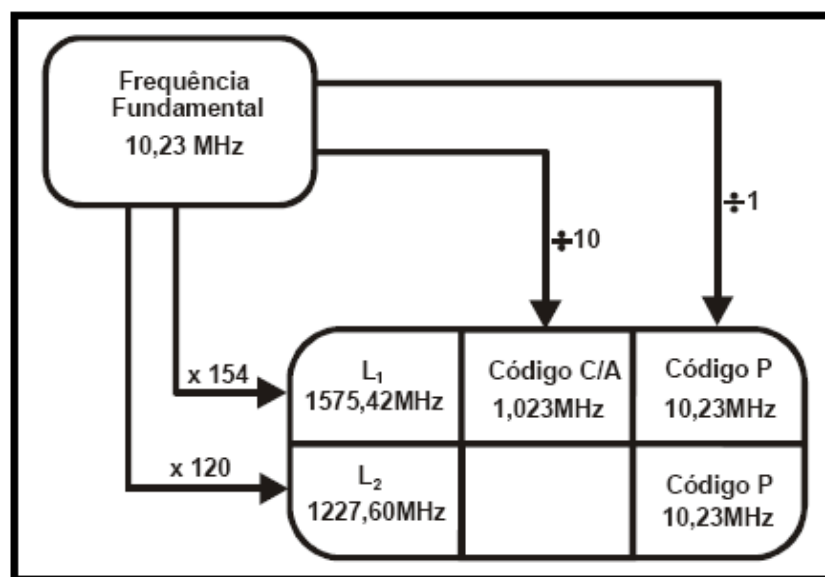


Figura 1 – Estrutura básica do sinal GPS. Fonte: Adaptado de MONICO, 2000

Os satélites GPS emitem, modulando as portadoras L1 e L2, duas variedades de informações. Um dos tipos, a mensagem de navegação, consiste em *bits* de dados que contém os parâmetros orbitais (elementos keplerianos e suas variações), dados para correção da propagação na atmosfera, parâmetros para correção do erro dos relógios dos satélites, saúde dos satélites, etc. Estas informações espaciais e temporais contidas nas mensagens de navegação são determinadas pelo segmento de controle do sistema GPS em terra.

O segundo tipo de informação é um conjunto de códigos de ruídos pseudo-aleatórios (PRN), uma sequência de impulsos digitais em um padrão inconfundível. Essas transmissões não transportam dados no sentido tradicional. Os códigos são concebidos para possibilitar a unidade receptora medir o instante exato de chegada do sinal de cada satélite à antena do receptor. As portadoras L1 e L2 são moduladas por todos os satélites. Entretanto, os códigos são perfeitamente distinguíveis, devido a sua baixa correlação, ou seja, sua assinatura digital individualizada. Os receptores modernos são dotados de, no mínimo, 12 canais de recepção.

Cada sequência de código PRN é sintonizada por um canal, de modo similar às emissoras de rádio FM. Digamos que uma determinada música esteja sendo tocada tanto pelo satélite quanto pelo receptor, exatamente, ao mesmo tempo. O usuário ouvirá ambas as versões, mas a versão do satélite chegará atrasada na medida em que o som terá de percorrer seu caminho da órbita do satélite até a superfície da Terra. Se o usuário medir o lapso de tempo de atraso entre os momentos em que cada versão da música tiver chegado a uma determinada nota musical, usando um cronômetro, ele poderá, então, calcular a distância até o satélite. O sistema GPS executa um procedimento análogo, quando um receptor monitora um código PRN transmitido de um satélite. Ao emparelhar a sequência de código recebida com uma réplica da sequência de código PRN referente ao satélite em questão, o dispositivo pode estimar o atraso no tempo de chegada do sinal de radiofrequência desse satélite (SILVA E CÂMARA, 2005, p.10).

As observáveis básicas do GPS, que permitem determinar posição, velocidade e tempo, podem ser identificadas como: pseudodistância a partir do código e fase da onda portadora ou diferença de fase da onda portadora. Estas são passíveis de erros aleatórios, sistemáticos e grosseiros, sendo que parte desses erros podem ser modelados ou reduzidos, se técnicas adequadas de rastreamento e processamento forem adotadas. A Tabela 2 apresenta as principais fontes de erro e seus efeitos.

Tabela 2: Fontes de erro e efeitos no sistema GPS. Fonte: Adaptado de MONICO, 2000

Fontes	Fonte de erros e efeitos
Satélites	Erro da órbita, erro do relógio, relatividade e atraso entre as duas portadoras no <i>hardware</i> do satélite.
Propagação do sinal	Refração troposférica, refração ionosférica, perdas de ciclos e multicaminhamento ou sinais refletidos.
Receptor/antena	Erro do relógio, erro entre os canais e centro de fase da
Estação	Erro nas coordenadas, multicaminhamento, marés terrestres, movimento do pólo, carga dos oceanos e

A disponibilidade seletiva - SA (*Selective Availability*), é uma técnica que consiste na manipulação das mensagens de navegação e da frequência dos relógios dos satélites, de forma que a precisão obtida pelos usuários civis seja deteriorada. Com a desativação dessa limitação imposta aos usuários civis pelo DoD, a ionosfera passou a ser a maior fonte de erro no posicionamento com GPS (CAMARGO, 1999).

Para fins práticos, a atmosfera pode ser considerada como um conjunto de camadas de gases, esféricas e concêntricas à terra. A sua estrutura está relacionada com diversos parâmetros térmicos, químicos e eletromagnéticos, cujos valores geralmente combinados, variam em função da hora, da época do ano, da latitude, da longitude e atividade solar (MATSUOKA, 2007).

Com respeito à propagação de sinais, a atmosfera pode ser dividida em troposfera e ionosfera, uma vez que as condições de propagação são distintas. As camadas mais baixas da atmosfera compreendida entre a superfície da terra e aproximadamente 40 km / 60 km, recebe o nome de troposfera. Constitui a zona neutra da atmosfera e a propagação do sinal depende principalmente do conteúdo do vapor d'água, da pressão do ar e da temperatura. Neste caso, a refração do sinal independe da frequência, desde que a mesma seja inferior a 30 GHz. Já na parte superior da atmosfera, estendendo-se de 50 km / 70 km até 1000 km esta localizada a ionosfera, que é formada por partículas livres e carregadas (íons). A geração destes está ligada à intensidade da radiação solar e a densidade do gás. Nesta camada a propagação do sinal depende da frequência (FONSECA JÚNIOR, 2002).

O erro associado à refração ionosférica depende do conteúdo total de elétrons (TEC) na camada ionosférica, que corresponde ao número de elétrons livres no caminho percorrido pelo sinal entre as antenas do satélite e do receptor. O TEC varia no tempo e no espaço, influenciado por diversas variáveis, tais como: ciclo solar, época do ano, hora do dia, localização geográfica e atividade geomagnética, etc (LEICK, 1995). A Tabela 3 mostra a correção a ser feita em algumas frequências devido à refração ionosférica.

Tabela 3: Correção do efeito ionosférico em metros. Fonte: Adaptado de LEICK, 1995

<b>Frequência</b>	<b>TEC = <math>10^{16}</math> elétrons/m<sup>2</sup></b>	<b>TEC = <math>10^{18}</math> elétrons/m<sup>2</sup></b>
100 MHz	40	4000
400 MHz	2,5	250
$f_{L_2}=1227,60$ MHz	0,26	26
$f_{L_1}=1557,42$ MHz	0,16	16
2GHz	0,1	10
10GHz	0,004	0,4

Pela Tabela 3, pode-se perceber que a propagação do sinal realmente depende da frequência, e que quanto maior a frequência menor será o efeito causado pela ionosfera no sinal. Portanto, a portadora  $L_2$  tem maior influência da ionosfera do que a portadora  $L_1$ , pois esta última possui maior frequência do que a portadora  $L_2$ .

Os receptores GPS, de dupla frequência, permitem efetuar correções do efeito da refração ionosférica, devido ao fato da refração ser dependente da frequência do sinal. Esta estratégia permite obter resultados que são praticamente isentos desses efeitos, desde que realizada em épocas de atividade solar mínima. Entretanto, tais receptores são equipamentos caros, fazendo com que os de uma frequência, a maioria de uso civil, sejam amplamente empregados, mesmo em condições não totalmente adequadas.

A desvantagem da utilização dos receptores GPS de uma frequência reside no fato de que os resultados do levantamento, para bases médias e longas, são afetados pelo efeito sistemático, devido à ionosfera. A classificação de linhas base curtas, médias e longas é tema controverso, mas, segundo IBGE (1993) para fins práticos, adotam-se que, as linhas de base curtas tem comprimento menor que 15 km, as médias tem comprimento entre 15 km e 100 km e as linhas de base longas tem comprimento maior que 100 km.

As mensagens de navegação transmitidas pelos satélites do sistema GPS trazem informações que permitem efetuar correções da ionosfera para receptores GPS de uma frequência, utilizando o modelo *Broadcast* ou de Klobuchar. Porém, vários estudos realizados mostraram que o modelo de Klobuchar pode remover apenas algo em torno de 50% do efeito total (LEICK, 1995; KLOBUCHAR, 2000).

No ano de 1998 o IGS, a partir de seu grupo de trabalho da ionosfera, iniciou a produção de Mapas Globais da Ionosfera (*GIM – Global Ionospheric Maps*) que disponibilizam valores de VTEC calculados usando dados GPS coletados pela sua rede de receptores de dupla frequência. Oficialmente, estes mapas são disponibilizados na sua forma final com uma latência de 11 dias. Porém, desde dezembro de 2003, o IGS vem disponibilizando os mapas em uma versão preliminar com uma latência menor do que 24 horas. Os mapas são disponibilizados pelo IGS em arquivos no formato IONEX (*IONosphere map EXchange format*) que fornecem valores de VTEC em uma grade com resolução espacial de  $5^{\circ} \times 2,5^{\circ}$  em longitude e latitude, respectivamente, e com resolução temporal de 2 horas. Além dos valores de VTEC, os arquivos IONEX fornecem valores do atraso instrumental interfrequência dos satélites, bem como, dos receptores envolvidos no processamento (LIU et al, 2005).

Atualmente, o grupo de trabalho da ionosfera do IGS conta com a participação de 4 centros de análises: CODE (*Centre for Orbit Determination in Europe*) na Suíça, ESA (*European Space Agency*) na Alemanha, JPL (*Jet Propulsion Laboratory*) nos Estados Unidos da América e UPC (*Universitat Politècnica de Catalunya*) da Espanha (HERNÁNDEZ-PAJARES et al, 2009).

São estes centros de análise que produzem os mapas de VTEC disponibilizados pelo IGS, cada um com sua estratégia, porém todos utilizam dados GPS e GLONASS (*Global Navigation Satellite System*) das estações ativas do IGS (MATSUOKA e CAMARGO, 2007). Detalhes sobre as estratégias de modelagem adotadas em cada centro podem ser obtidos em CODE (2009), ESA (2009), JPL (2009) e UPC (2009).

A partir de dezembro de 2002, o IGS passou a gerar um arquivo IONEX combinado a partir dos arquivos produzidos em cada um dos centros de análise. Desta forma, para cada dia é disponibilizado pelo IGS um total de cinco arquivos IONEX. Os arquivos de cada centro de análise, bem como do arquivo combinado são disponibilizados pelo IGS, em: <ftp://cddisa.gsfc.nasa.gov/gps/products/ionex/>.

Segundo International GPS service central bureal (2009), a precisão média dos valores de VTEC para os arquivos IONEX finais, 11 dias de latência, é de 2-8 TECU (TEC Unit – Unidade de TEC, sendo 1 TECU =  $10^{16}$  elétrons/m<sup>2</sup>) e para os arquivos rápidos, latência menor do que 24 horas, de 2-9 TECU. Esta precisão pode variar de acordo com a região do globo terrestre e do número de estações GPS que foram utilizadas em determinada região (MATSUOKA e CAMARGO, 2007).

Atualmente, o Brasil dispõe de dados para a realização de estudos relativos à modelagem da ionosfera, uma vez que a Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), órgão gestor do Sistema Geodésico Brasileiro (SGB), estabeleceu a Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC) do Sistema de Posicionamento Global - GPS, que se iniciou com nove estações. Atualmente a RBMC possui mais de 70 estações, e está em constante expansão, espalhadas pelo Brasil, coletando dados continuamente. A Figura 2 ilustra a situação atual da RBMC, mostrando as estações em operação e as em fase de implantação.

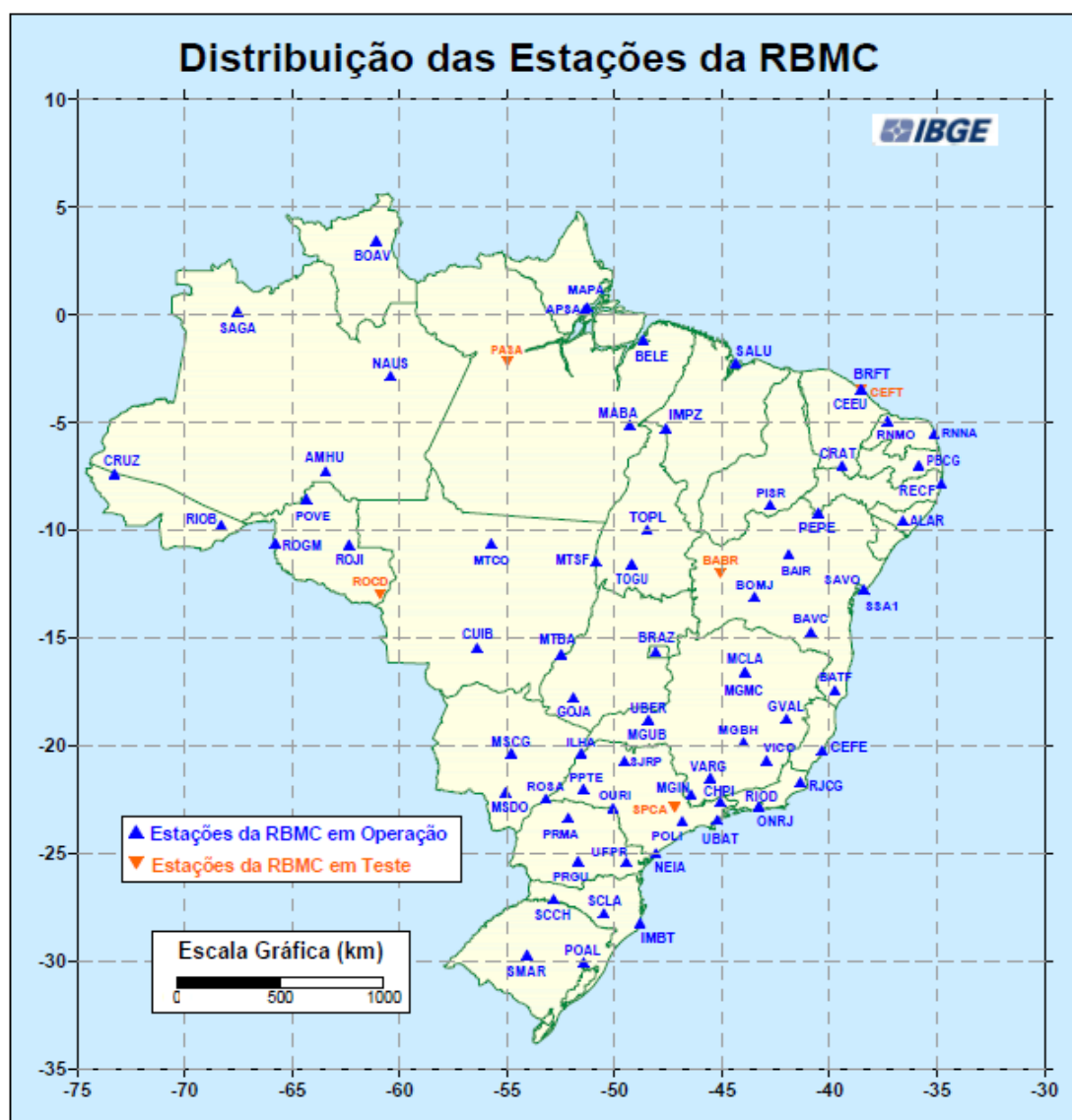


Figura 2 – Estações da RBMC, em operação e em implantação. Fonte: [http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/rbmc/rbmc\\_est.shtm](http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/rbmc/rbmc_est.shtm) e acessado em 10/10/09

As estações RBMC têm como um dos objetivos principais servir de base para o uso de posicionamento relativo e operam com receptores GPS de dupla frequência. Utilizando-se dos dados das estações da RBMC, torna-se possível calcular os coeficientes de um modelo regional, os quais podem ser utilizados em conjunto com receptores GPS de uma frequência, contemplando a área abrangida pela RBMC.

Camargo (1999) desenvolveu um modelo (Mod\_Ion), que permite calcular o erro sistemático devido à ionosfera na portadora L1, bem como o TEC, que foram representados pela série de Fourier, onde se obteve melhora de até 80,7 % na acurácia em posicionamento de pontos de forma absoluta.

Fonseca Júnior (2002) elaborou uma série histórica entre 1997 e 2001 dos valores do TEC para as estações da RBMC, em intervalos de duas horas. Este trabalho contribuiu para a melhor compreensão da ionosfera no Brasil, servindo de suporte para novas pesquisas e para o aprimoramento de modelos ionosféricos.

Aguiar et al (2003) fizeram uma comparação da performance do mod\_ion e do modelo de Klobuchar. Os resultados dos experimentos mostraram que o mod\_ion removeu aproximadamente 91,7% do efeito da ionosfera, enquanto o modelo de Klobuchar removeu algo em torno de 53,7%.

Matsuoka (2003) implementou no mod\_ion outras funções de modelagem, além da série de Fourier. Foi feito um estudo destas funções onde os resultados dos experimentos mostraram que as funções série de Fourier, série de Taylor e a polinomial, foram as mais eficazes na correção do efeito ionosférico, proporcionando uma melhora da ordem de 80% no posicionamento por ponto.

Veronez (2004) desenvolveu um modelo regional para a correção do erro ionosférico com o uso de ajustamento de observações sequencial, onde o erro foi representado por um modelo polinomial, que proporcionou respectivamente uma melhora de 33% e 39% para o posicionamento por ponto e relativo em relação ao modelo de Klobuchar.

Aguiar (2005) adaptou o mod\_ion para que o modelo fizesse a correção do efeito ionosférico em tempo real, denominado de Mod\_ion\_FK. Neste modelo, foi alterada a função de modelagem além da implementação do filtro de Kalman, que é o algoritmo utilizado para calcular a correção ionosférica em tempo real. Os resultados dos experimentos realizados mostraram que o uso do modelo proporcionou uma melhora na acurácia resultante, no posicionamento por ponto em tempo real, de 90,75 %, no período diário de máxima atividade ionosférica.

Entre os vários trabalhos, além dos já citados que tratam da ionosfera e seus efeitos em observações GPS na região brasileira pode-se citar: (MATSUOKA e CAMARGO, 2007), (DAPPER, 2005), (ABREU, 2007), (AGUIAR et al, 2007) (MATSUOKA, 2007), (MARQUES, 2008), entre outros.

## 1.2 – CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

Conforme comentado na seção anterior, os receptores GPS de dupla frequência permitem efetuar correções do efeito ionosférico, pois este é dependente da frequência, mas devido ao alto custo dos receptores de dupla frequência, a maioria das atividades que utilizam do sistema GPS para o posicionamento de pontos atualmente ainda é feita por receptores de uma frequência. Para os usuários de receptores GPS de uma frequência, o principal modelo para a minimização dos efeitos ionosféricos é o modelo de Klobuchar. Mas como visto, este modelo remove algo em torno de 50% a 60% do efeito total da ionosfera.

É necessário dispor de uma estratégia mais efetiva para minimizar os efeitos da ionosfera, a qual tem sido investigada a partir do uso de modelos regionais para a ionosfera. Desta forma, uma vez estabelecido um determinado modelo, com a introdução de observações realizadas com receptores GPS de dupla frequência, pode-se estimar parâmetros que descrevem este modelo. De posse do modelo parametrizado, pode-se fazer as devidas correções nas observações feitas com receptores GPS de uma frequência.

Baseado no exposto, a hipótese que formula é: “Uso de modelos regionais para aumento da eficiência na correção do erro sistemático devido à refração ionosférica”.

### 1.3 – OBJETIVOS

O principal objetivo deste trabalho consiste na modelagem regional, para a correção dos efeitos da ionosfera na propagação dos sinais GPS. Como resultado, esta modelagem deve melhorar o posicionamento de pontos realizados com receptores GPS de uma frequência, no âmbito da RBMC.

Mais especificamente, objetiva-se:

1. Realizar experimentos com o uso da série de Fourier para modelar o atraso ionosférico em âmbito regional;
2. Validar o modelo gerado por meio do processamento de dados a partir do método de Posicionamentos por Ponto Preciso, comparando-se as coordenadas obtidas com as oficiais;
3. Estimar valores de VTEC e compará-los com os valores fornecidos pelo IGS.

#### 1.4 – CONTEÚDO DO TRABALHO

Este trabalho está dividido em sete capítulos, de forma a atingir os objetivos propostos. No segundo capítulo aborda-se a estrutura da ionosfera e sua influência na transmissão dos sinais GPS, bem como as causas das variações do conteúdo total de elétrons. O terceiro capítulo trata das formas de minimização dos efeitos da ionosfera nos sinais GPS, com dados das mensagens de navegação e com dados provenientes tanto de receptores GPS de simples frequência quanto de dupla frequência. No quarto capítulo é descrita a metodologia, bem como os materiais utilizados para a realização deste trabalho. Os resultados obtidos e as discussões sobre estes são apresentados no quinto capítulo. Com base nas análises realizadas, considerações, conclusões e recomendações são apresentadas no sexto capítulo.

## 2 – A IONOSFERA

### 2.1 – CONSIDERAÇÕES GERAIS

A radiação solar contém energia suficiente, para as ondas eletromagnéticas de curto comprimento, causar grande fotoionização das altas altitudes da atmosfera terrestre, criando na parte superior da atmosfera a região parcialmente ionizada, conhecida como ionosfera, que vai de aproximadamente 50 km acima da superfície da terra, atingindo até 1000 km de altitude (CAMARGO, 1999).

Em grandes altitudes, num ambiente rarefeito, os átomos encontram-se distantes uns dos outros e os gases mantêm-se ionizados durante horas. Já em altitudes menores a recombinação acontece mais rapidamente. A recombinação é o processo inverso da ionização, ou seja, quando elétrons livres e íons colidem, combinando-se, e resultando em átomos eletricamente neutros. Estes dois processos dependem da hora do dia. Durante o dia o processo de ionização é maior que o de recombinação, devido à presença da radiação solar. Neste período as camadas ionizadas atingem máxima densidade e tem maior influência nas ondas de rádio. No entanto, ao anoitecer o processo se inverte e o processo de recombinação se torna maior, causando a diminuição da densidade das camadas ionizadas. Este processo continua até atingir o mínimo de densidade das camadas ionizadas, antes do amanhecer (VERONEZ, 2004).

A distribuição espacial dos íons e elétrons depende de dois processos: o processo fotoquímico, que depende da radiação solar e que controla o processo de ionização e de recombinação e o processo de movimentação que causa o transporte das camadas ionizadas. Estes processos criam diferentes camadas em diferentes altitudes. As principais camadas da ionosfera são denominadas de D, E e F que se divide em F<sub>1</sub> e F<sub>2</sub> (FONSECA JÚNIOR, 2002), conforme representado na Figura 3.

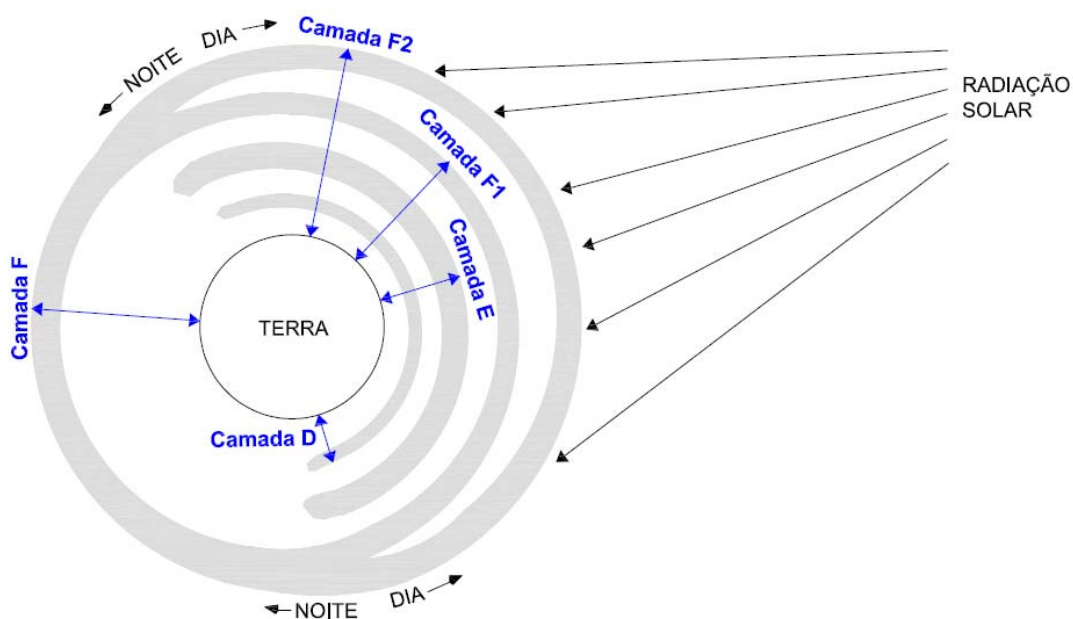


Figura 3 – Principais camadas da ionosfera. fonte: adaptado de: <http://www.geocities.com/capecanaveral/launchpad/9057/images/propag15.jpg> em 20/11/2008

A presença ou ausência dessas camadas e sua altitude depende da radiação solar. Ao meio dia, a radiação solar é máxima, enquanto a noite ela é mínima. Entre essas duas condições, a posição e número de camadas ionizadas mudam. A camada D, após o pôr do sol desaparece devido ao rápido processo de recombinação. As camadas E e F<sub>1</sub> só estão presentes durante o dia. Na realidade, estas camadas não desaparecem completamente à noite, porém para efeitos práticos, assume-se que a densidade de elétrons é nula. Pode ocorrer o aparecimento de outra camada na região da camada E, conhecida como esporádica E, devido principalmente a chuvas de meteoros, atividades geomagnéticas entre outras causas (VERONEZ, 2004). As características das principais camadas são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4: Características das principais camadas da ionosfera. Fonte: Adaptado de SEEBER, 1993

Nome da Camada	Altura (km)	Densidade de elétrons (elétrons/m <sup>3</sup> )	
		Diurno	Noturno
F <sub>2</sub>	200 a 1000	10 <sup>6</sup>	3*10 <sup>5</sup>
F <sub>1</sub>	140 a 200	2*10 <sup>5</sup>	10 <sup>3</sup>
E	90 a 140	10 <sup>5</sup>	2*10 <sup>3</sup>
D	50 a 90	10 <sup>2</sup> a 10 <sup>4</sup>	-

A densidade de elétrons, que descreve o estado da ionosfera, sofre variações devido a fatores como: fluxo de ionização solar, atividade geomagnética, ciclos de manchas solares, estação do ano, localização do usuário, hora local entre outros (CAMARGO, 1999).

O movimento da Terra em relação ao Sol, ou a mudança na atividade solar, pode resultar em variações na ionosfera. Estas variações classificam-se em dois tipos: as que ocorrem regularmente e podem ser previstas com alguma precisão e as que são irregulares e, portanto, não podem ser previstas (VERONEZ, 2004).

As variações regulares podem ser divididas em: ciclo de 11 anos, variações sazonais, ciclo de 27 dias e variações diárias. O período de 11 anos é o tempo de um ciclo regular entre o mínimo e o máximo de manchas solares. A Figura 4 ilustra todos os ciclos solares desde 1850. As variações sazonais estão relacionadas com a inclinação dos raios solares, resultantes do movimento de translação da Terra em torno do Sol o que proporciona diferentes graus de ionização da ionosfera durante as quatro estações do ano. O ciclo de 27 dias está relacionado com o número de manchas solares que mudam constantemente devido ao movimento de rotação do sol, cujas manchas são visíveis a intervalos de 27 dias, que é aproximadamente o tempo que o sol leva pra dar uma volta em torno do seu eixo. E por fim, as variações diárias são devidas ao fluxo de ionização solar, sendo que o máximo de ionização ocorre em torno das 14 horas locais e o mínimo em torno das 5 horas locais.

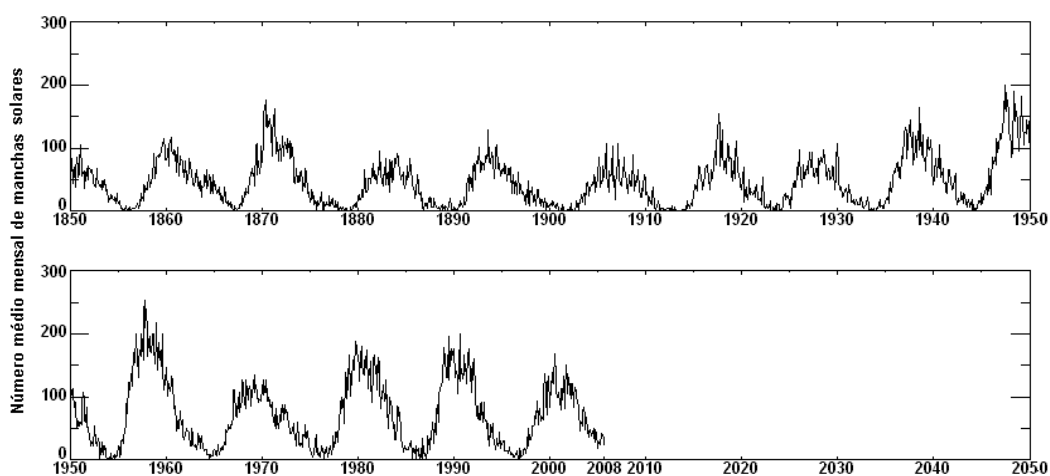


Figura 4 – Número médio mensal de manchas solares – período de 1850 a 2008. Fonte: <http://science.msfc.nasa.gov/ssl/pad/solar/images/zurich.gif> e acessado em 19/11/08

Entre as variações regulares expostas anteriormente, verifica-se que as variações diárias na ionosfera tem o efeito mais pronunciado nos sinais, mas as outras variações regulares também exercem bastante influência, bem como outros fenômenos de natureza irregular, entre os quais podem ser destacados: manchas solares, perturbações ionosféricas repentinas, tempestades ionosféricas, cintilação e campo magnético da Terra (VERONEZ, 2004).

## 2.2 – REFRAÇÃO IONOSFÉRICA

É possível perceber, pelo exposto anteriormente, a complexidade da ionosfera quanto a sua composição e dinâmica de mudança. As ondas de rádio ao se propagarem pela ionosfera podem ser absorvidas, refratadas, refletidas e difratadas. Neste trabalho, será abordada apenas a refração ionosférica, por ser o principal parâmetro a afetar os sinais transmitidos pelos satélites do GPS.

A refração pode ser definida como a modificação da forma ou direção de uma onda ao passar por uma interface que separa dois meios, fazendo que esta onda tenha velocidade de propagação diferente em cada meio. A quantidade de refração que uma onda sofre ao atravessar a ionosfera depende de sua frequência e do índice de refração da camada ionosférica, que é proporcional ao TEC, que é o número de elétrons ao longo do caminho entre satélite e o receptor (VERONEZ, 2004).

O problema é que o TEC varia no tempo e no espaço, em função do fluxo de ionização solar, atividade magnética, ciclo de manchas solares, estação do ano, posição do usuário e direção do raio vetor do satélite (LEICK, 1995).

Descreve-se a seguir uma modelagem matemática, com a finalidade de estabelecer o índice de refração e a refração da ionosfera. Esta modelagem foi baseada em (HOFMANN-WELLENHOF et al, 2008) e (MONICO, 2000).

Quando o índice de refração, nas diferentes camadas da ionosfera, é diferente da unidade, isso faz com que a velocidade da fase portadora sofra um retardo sendo a velocidade da fase portadora ( $V_f$ ) dada por:

$$V_f = \lambda f, \quad (2.1)$$

sendo que  $\lambda$  corresponde ao comprimento de onda e  $f$  corresponde a sua frequência.

Já a velocidade para um grupo ( $V_g$ ) de ondas, como é o caso dos códigos modulados no sistema GPS, que devido à ionosfera este sofre um avanço durante a propagação do sinal entre o satélite e o receptor, é dado por:

$$V_g = -\frac{df}{d\lambda} \lambda^2. \quad (2.2)$$

Diferenciando a equação (2.1) e substituindo-se na equação (2.2), obtêm-se uma expressão que relaciona a velocidade do grupo com a velocidade da fase, que é conhecida como a equação de *Rayleigh*:

$$V_g = V_f - \frac{dV_f}{d\lambda} \lambda. \quad (2.3)$$

Os índices de refração para a velocidade da fase ( $n_f$ ) e do grupo ( $n_g$ ) são dados respectivamente, por:

$$n_f = \frac{c}{V_f}; \quad (2.4)$$

e

$$n_g = \frac{c}{V_g}, \quad (2.5)$$

em que  $c$  corresponde a velocidade da luz no vácuo.

A equação modificada de *Rayleigh* que relaciona estes dois índices de refração é dada por meio da equação:

$$n_g = n_f - \lambda \frac{dn_f}{d\lambda}; \quad (2.6)$$

ou

$$n_g = n_f + f \frac{dn_f}{df}. \quad (2.7)$$

O índice de refração da fase pode ser aproximado pela seguinte série (SEEBER, 1993):

$$n_f = 1 + \frac{c_2}{f^2} + \frac{c_3}{f^3} + \frac{c_4}{f^4} + \dots, \quad (2.8)$$

sendo que os coeficientes  $c_2$ ,  $c_3$  e  $c_4$  dependem somente da densidade de elétrons.

Considerando somente os efeitos de primeira ordem o índice de refração é dado por:

$$n_f = 1 + \frac{c_2}{f^2}. \quad (2.9)$$

Derivando-se a equação (2.9) e substituindo na equação (2.7) obtém-se o índice de refração para o código que é dado por:

$$n_g = 1 - \frac{c_2}{f^2}. \quad (2.10)$$

Pode-se observar que os índices de refração da fase e do grupo se diferenciam apenas pelo sinal do coeficiente  $c_2$ , e este por sua vez só depende da densidade de elétrons ( $n_e$ ) que é dada por:

$$c_2 = -40,3n_e. \quad (2.11)$$

Logo, tem-se que:

$$n_f = 1 - \frac{40,3n_e}{f^2}; \quad (2.12)$$

e

$$n_g = 1 + \frac{40,3n_e}{f^2}. \quad (2.13)$$

As equações (2.12) e (2.13) resultam em diferentes velocidades para a fase e para o grupo, o que causa um avanço na fase e um atraso no grupo, pois a velocidade do grupo é menor que a velocidade da fase. Isto acarreta um aumento nas distâncias obtidas a partir do código e uma diminuição nas distâncias obtidas a partir da fase de uma mesma quantidade.

A distância ( $S$ ) entre o satélite ( $s$ ) e o receptor ( $r$ ) desprezando outros erros sistemáticos é dada por:

$$S = \int_r^s n ds, \quad (2.14)$$

em que  $n$  representa o índice de refração da fase ou do grupo.

A diferença da distância medida e da distância geométrica ( $\rho$ ) entre o receptor e o satélite é chamada de refração ionosférica e é dada por:

$$I_{fr}^s = -\frac{40,3}{f^2} \int_r^s n_e ds, \quad (2.15)$$

onde a parcela variável caracteriza a densidade de elétrons ao longo do caminho entre o satélite e o receptor, denominado de TEC, ou seja:

$$TEC = \int_r^s n_e ds. \quad (2.16)$$

Logo:

$$I_{fr}^s = -\frac{40,3}{f^2} TEC. \quad (2.17)$$

De forma similar se obtém a refração ionosférica para os sinais modulados pelo código:

$$I_{gr}^s = \frac{40,3}{f^2} TEC. \quad (2.18)$$

Nas equações (2.17) e (2.18), o valor do TEC é dado ao longo da direção entre o satélite e o receptor. Já para as quantidades do TEC na direção vertical (VTEC), a refração para a fase e para o grupo são dadas, respectivamente, por:

$$I_{fr}^s = -\frac{1}{\cos z'} \frac{40,3}{f^2} VTEC; \quad (2.19)$$

e

$$I_{gr}^s = \frac{1}{\cos z'} \frac{40,3}{f^2} VTEC. \quad (2.20)$$

O valor de  $z'$  pode ser calculado pela equação:

$$\sin z' = \frac{R_m}{R_m + H_m} \sin z, \quad (2.21)$$

sendo  $z$  o ângulo zenital do satélite em relação ao receptor, e  $z'$  representa o ângulo zenital do satélite em relação ao ponto ionosférico,  $R_m$  representa o raio médio da terra e  $H_m$  representa a altura média da ionosfera. A Figura 5 ilustra as quantidades que estão contidas na equação (2.21).

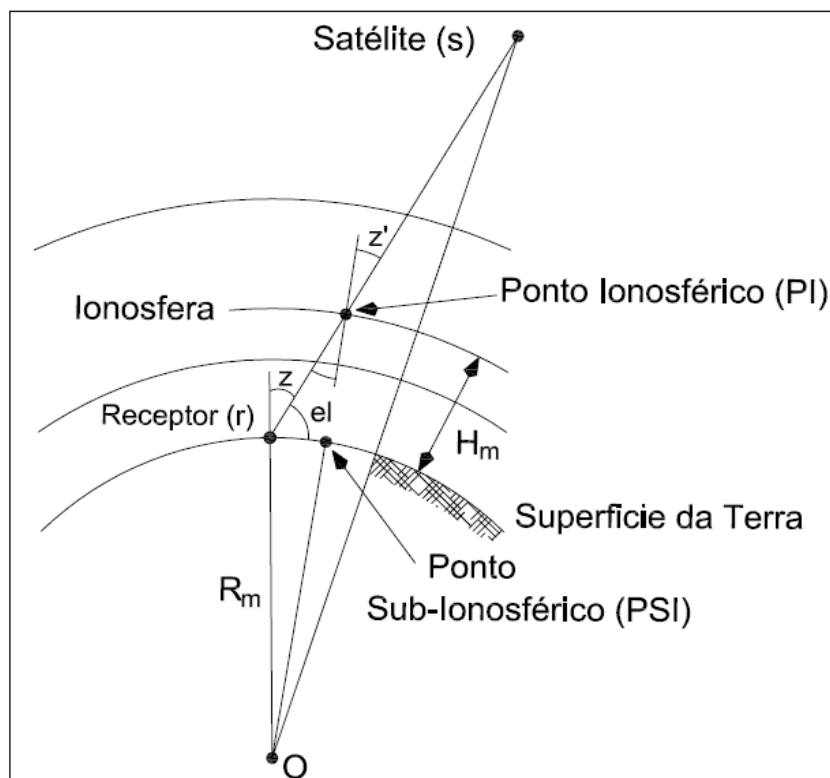


Figura 5 – Geometria do atraso ionosférico. Fonte: adaptada de Hofman-wellenhof et al (2008)

Devido à aproximação feita nas equações (2.9) e (2.10) para se obter o índice de refração, onde se considerou apenas os efeitos de primeira ordem, faz com que as equações (2.17) e (2.18), representem apenas os efeitos de primeira ordem da ionosfera, os quais podem ser modelados com dados obtidos a partir de receptores GPS de dupla frequência.

O erro remanescente representa poucos centímetros como pode ser visto na Tabela 5, que mostra os efeitos máximos devido à ionosfera na direção vertical, para as portadoras  $L_1$  e  $L_2$  e para a combinação linear livre da ionosfera, denominada de combinação íon-free ( $L_0$ ). No caso de direções inclinadas, os efeitos são mais pronunciados (SEEBER, 1993).

Tabela 5: Efeito máximo da ionosfera na direção da vertical. Fonte: adaptado de (Seeber, 1993).

Frequência	Efeitos de 1º Ordem ( $1/f^2$ )	Efeitos de 2º Ordem ( $1/f^3$ )	Efeitos de 3º Ordem ( $1/f^4$ )
$L_1$	32,5 m	0,036 m	0,002 m
$L_2$	53,5 m	0,076 m	0,007 m
$L_0$	0,0 m	0,026 m	0,006 m

No próximo capítulo, são discutidos os principais modelos matemáticos utilizados para a minimização dos efeitos sistemáticos da refração ionosférica, em posicionamentos de pontos com o sistema GPS.

### 3 – MODELOS DE MINIMIZAÇÃO DOS EFEITOS IONOSFÉRICOS

#### 3.1 – INTRODUÇÃO

Como visto no capítulo 2, os sinais GPS em seu trajeto do satélite até o receptor, sofrem um atraso no grupo e um avanço na fase da portadora, devido à refração ionosférica, o que acarreta num aumento das distâncias obtidas a partir do grupo e uma diminuição das obtidas com a fase da portadora.

Devido ao avanço e ao atraso ionosférico serem dependentes da frequência do sinal, torna-se possível a eliminação dos efeitos de primeira ordem com o uso de receptores de dupla frequência, por meio de uma combinação linear entre as fases portadoras denominada de combinação ion-free ( $L_0$ ), sendo obtida por meio da equação (MARQUES, 2008):

$$L_0 = m_1 L_1 + m_2 L_2. \quad (3.1)$$

A nova frequência e o novo comprimento de onda dessa combinação são dados, respectivamente, por:

$$f_{L_0} = m_1 f_1 + m_2 f_2; \quad (3.2)$$

e

$$\lambda_{L_0} = \frac{c}{m_1 f_1 + m_2 f_2}. \quad (3.3)$$

O efeito de primeira ordem da ionosfera é cancelado quando a seguinte condição for satisfeita (GOAD, 1996 apud MARQUES, 2008):

$$\frac{m_1}{f_1} + \frac{m_2}{f_2} = 0. \quad (3.4)$$

Outra condição que pode ser imposta é que a combinação resultante tenha a mesma aparência da equação original da portadora  $L_1$ , porém sem o termo da ionosfera, o que ocorre quando a frequência da combinação é igual à frequência da portadora  $L_1$  (GOAD, 1996 apud MARQUES, 2008):

$$m_1 f_1 + m_2 f_2 = f_1. \quad (3.5)$$

Ao usar as condições das equações (3.4) e (3.5), os coeficientes  $m_1$  e  $m_2$  ficam, respectivamente, da seguinte forma:

$$m_1 = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \cong 2,5457; \quad (3.6)$$

$$m_2 = \frac{f_1 f_2}{f_1^2 - f_2^2} \cong -1,9837. \quad (3.7)$$

Outras combinações também podem ser usadas como, por exemplo, a combinação linear “wide line” (Lw), onde  $m_1 = 1$  e  $m_2 = -1$ . Outra combinação linear possível é a chamada “narrow line” (Ln) onde  $m_1 = m_2 = 1$  (VERONEZ, 2004).

A combinação íon-free tem como desvantagem o realce do nível de ruídos, causando efeitos como, o multicaminhamento e a ambiguidade da combinação, algo que requer técnicas apropriadas para a eliminação desses efeitos (LEICK, 1995).

Alguns modelos foram desenvolvidos e são empregados para corrigir o efeito da refração ionosférica na portadora  $L_1$  em receptores de uma frequência. A determinação dos efeitos da ionosfera pode ser feita por meio de:

- Coeficientes transmitidos nas mensagens de navegação: modelo de Klobuchar ou *broadcast*;
- Observações de receptores de uma frequência;
- Observações de receptores de dupla frequência.

Alguns destes modelos são apresentados e discutidos a seguir.

### 3.2 – MODELO *BROADCAST* OU DE KLOBUCHAR

Este modelo permite calcular o atraso ionosférico para as pseudodistâncias, no caso de ser utilizado para a correção da fase da portadora, o sinal do atraso encontrado deverá ser trocado.

Para a utilização deste modelo há necessidade de se conhecer: a latitude e longitude geodésicas aproximadas do local de observação, ângulo de elevação e azimute de cada satélite em relação à antena do receptor e os coeficientes  $\alpha_n$  e  $\beta_n$  ( $n = 0,1,2$  e  $3$ ), que são transmitidos no arquivo de navegação.

Este modelo utiliza na descrição da variação da ionosfera durante o dia uma função cosseno com amplitude máxima às 14 horas locais. Durante a noite o efeito ionosférico é considerado constante, e equivalente a cinco nanosegundos, que equivalem à aproximadamente 1,5 metros ou 9,24 unidades de TEC (TECU), sendo que  $1 \text{ TECU} = 10^{16}$  elétrons/m<sup>2</sup> (CAMARGO, 1999). A Figura 6 representa a ionosfera de forma simples baseado no modelo de Klobuchar.

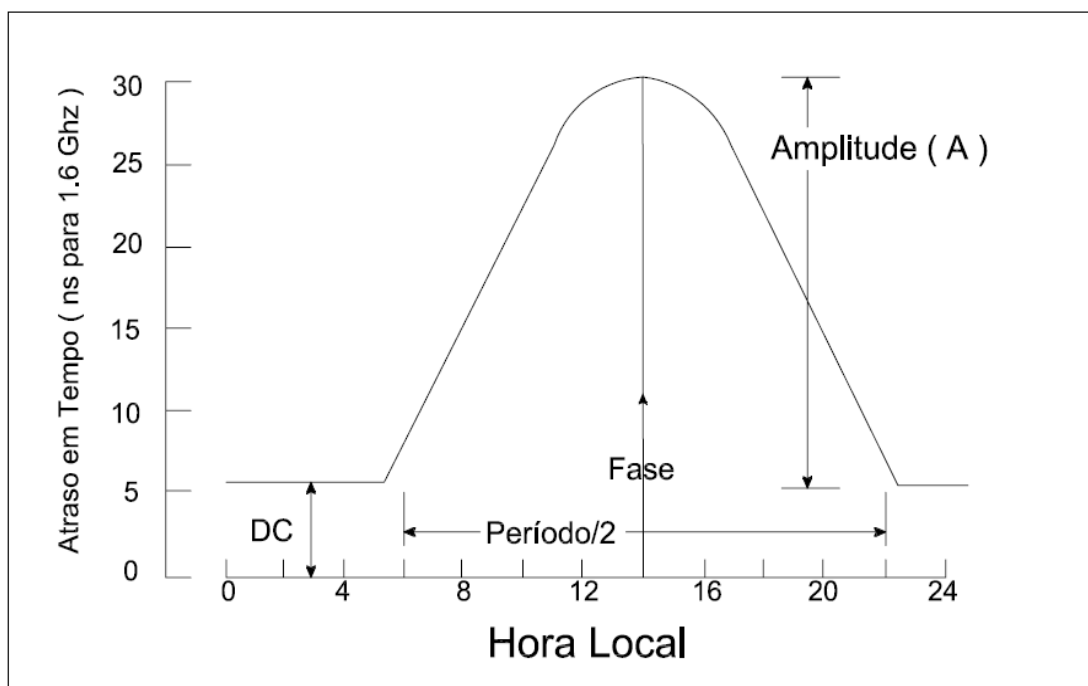


Figura 6 – Representação da ionosfera no modelo *broadcast*. Fonte: adaptado de Klobuchar (1987)

Como citado anteriormente, este modelo compensa algo em torno de 50 % a 60 % do efeito da ionosfera. As etapas para o cálculo do atraso ionosférico por meio deste modelo podem ser vistas no Apêndice A, e para maiores detalhes consultar KLOBUCHAR (1987) e LEICK (1995).

### 3.3 – MODELOS QUE USAM OBSERVAÇÕES DE UMA FREQUÊNCIA

Modelos foram desenvolvidos para calcular a correção devido aos efeitos da ionosfera a partir de observações feitas com receptores de uma frequência. O princípio destes modelos está baseado na diferença das observações da fase da portadora e da pseudodistância. As equações de observação para a pseudodistância e para a fase da portadora, advindas de receptores de uma frequência em uma época  $t$  qualquer são dadas, respectivamente, por:

$$P_r^s = \rho_r^s + c(dt_r - dt^s) + I_r^s + T_r^s + S_p^s + R_p + \varepsilon_p; \quad (3.8)$$

$$\lambda\phi_r^s = \rho_r^s + c(dt_r - dt^s) - I_r^s + T_r^s + \lambda N_r^s + S_\phi^s + R_\phi + \varepsilon_\phi, \quad (3.9)$$

sendo:

$P$  a pseudodistância entre o satélite (s) e o receptor (r);

$\rho$  a distância geométrica entre o satélite (s) e o receptor (r);

$c$  a velocidade da luz no vácuo;

$dt^s$  e  $dt_r$  os erros dos relógios do satélite e do receptor, respectivamente;

$I$  o erro devido à refração ionosférica;

$T$  o erro devido à refração troposférica;

$\varepsilon$  os erros aleatórios e sistemáticos não modelados;

$\lambda$  o comprimento de onda;

$\phi$  a medida da fase portadora;

$N$  a ambiguidade da fase;

$S_p, R_p, S_\phi$  e  $R_\phi$  os erros sistemáticos do *hardware* do satélite e do receptor, para as medidas da pseudodistância e para a fase da portadora.

A diferença entre as equações (3.8) e (3.9), para uma época  $t$ , é dada por

$$P_r^s - \lambda\phi_r^s = 2I_r^s - \lambda N_r^s + S_p^s - S_\phi^s + R_p - R_\phi + \varepsilon_p - \varepsilon_\phi. \quad (3.10)$$

A equação (3.10) está expressa em função do erro devido à ionosfera, da ambiguidade inicial, das tendências instrumentais e outros erros como o multicaminhamento da fase e da pseudodistância entre outros.

A equação (3.10) contém muitas incógnitas, o que demonstra a dificuldade de se calcular o efeito ionosférico. Mesmo desprezando os erros referentes às tendências instrumentais e os demais erros, o erro devido à ionosfera e a ambiguidade não podem ser estimados separadamente, pois a cada época adiciona-se uma nova incógnita, referente ao erro ionosférico (FONSECA JÚNIOR, 2002; CAMARGO, 1999).

Algumas soluções foram propostas para modelar as principais características da ionosfera, porém estas são limitadas, pois as medidas da pseudodistância apresentam baixa acurácia. Alguns destes modelos serão descritos a seguir (LEICK, 1995; CAMARGO, 1999).

### 3.3.1 - Modelo da lâmina ionosférica

Admitido como sendo a forma mais simples de modelar a ionosfera, pois ela é considerada como uma superfície plana de igual espessura e com distribuição homogênea de elétrons livres.

O atraso ionosférico ( $I$ ) ao longo do caminho entre o satélite ( $s$ ) e o receptor ( $r$ ), na portadora  $L_1$  é dado por:

$$I_r^s = \frac{I^v}{\sin el}, \quad (3.11)$$

sendo que  $el$  representa o ângulo de elevação do satélite em relação ao receptor, e  $I^v$  é o atraso da ionosfera na vertical.

Substituindo a equação (3.11) na equação (3.10) e desprezando os erros instrumentais e demais erros, tem-se a seguinte equação:

$$P_r^s - \lambda\phi_r^s = \frac{2I^v}{\sin el} - \lambda N_r^s. \quad (3.12)$$

A equação (3.12) representa um modelo para uma série de observações e utilizando-se o ajustamento de observações por meio do Método dos Mínimos Quadrados (MMQ), torna-se possível estimar as incógnitas do modelo que são o atraso da ionosfera na vertical e a ambiguidade.

### 3.3.2 - Modelo do ponto ionosférico

Este modelo tem basicamente o mesmo princípio do modelo da lâmina ionosférica, porém utiliza uma camada ionosférica de altura média entre 300 e 400 metros e o atraso ionosférico é modelado pela seguinte equação:

$$I_r^s = \frac{I^V}{\text{sen } el'}, \quad (3.13)$$

sendo:  $el' = 90^\circ - z'$ , e representa o ângulo de elevação do satélite em relação ao ponto ionosférico;  $z'$  representa a distância zenital do satélite em relação ao ponto ionosférico, sendo obtido pela equação (2.21). Dessa forma o modelo é dado por:

$$P_r^s - \lambda \phi_r^s = \frac{2I^V}{\text{sen } el'} - \lambda N_r^s. \quad (3.14)$$

Para um conjunto de observações e com o uso do ajustamento de observações, pode-se calcular o efeito ionosférico sofrido pela pseudodistância e pela fase da portadora.

### 3.3.3 - Modelo diário da função cosseno

Este modelo, mais elaborado que o anterior, leva em consideração a rotação da Terra e o movimento aparente do Sol em relação à posição do receptor.

O atraso ionosférico na vertical é modelado por meio de uma função cosseno e dado por:

$$I^V = I_{\text{max}}^V \cos(h_s - 14), \quad (3.15)$$

sendo  $h_s$  o ângulo horário do Sol em horas. O atraso ionosférico máximo na vertical ocorre próximo das 14 horas locais.

Ao substituir a equação (3.15) na (3.12), obtém-se o modelo que será utilizado no ajustamento pelo MMQ para se estimar as incógnitas do modelo dado pela equação:

$$P_r^s - \lambda \phi_r^s = \frac{2I_{\max}^V \cos(h_s - 14)}{\text{sen } e_l} - \lambda N_r^s. \quad (3.16)$$

### 3.3.4 - Outros Modelos

Modelos mais sofisticados que os anteriores foram desenvolvidos para modelar o atraso ionosférico, entre eles pode-se citar (COHEN et al, 1992, apud LEICK, 1995):

$$I_r^s = J_1 + J_1 \text{sen } \varphi^* + C_{11} \cos \varphi^* \cos \lambda^* + S_{11} \cos \varphi^* \text{sen } \lambda^*, \quad (3.17)$$

sendo  $\varphi^*$  e  $\lambda^*$  a latitude e a longitude do ponto sub-ionosférico, como ilustra a Figura 5, em um sistema de coordenadas ligadas ao Sol. Os demais elementos representam parâmetros incógnitos do modelo.

Também, pode-se citar o modelo polinomial, que emprega um polinômio para modelar a ionosfera, sendo este polinômio dado por (COCO et al, 1991, apud LEICK, 1995):

$$I_r^s = C_1 + C_2 \varphi^* + C_3 \lambda^* + C_4 (\varphi^*)^2 + C_5 (\lambda^*)^2 + C_6 \varphi^* \lambda^*. \quad (3.18)$$

Ao se substituir a equação (3.17) ou a equação (3.18) na equação (3.10), obtêm-se novos modelos, que com o auxílio do ajustamento de observações e de posse de uma série de observações da pseudodistância e fase da portadora, torna-se possível calcular os coeficientes das funções (3.17) e (3.18), bem como o atraso ionosférico.

### 3.4 – MODELOS QUE USAM OBSERVAÇÕES DE DUPLA FREQUÊNCIA

Os receptores de dupla frequência possibilitam que o efeito da refração ionosférica seja calculado a partir do código ou da fase da portadora, sendo que as correções feitas desta forma são mais acuradas que as vistas anteriormente. A correção do efeito ionosférico usando como observação a fase da portadora é mais acurada do que usando como observação a pseudodistância. O único inconveniente é o fato de os receptores de dupla frequência ter um custo mais elevado do que os de uma frequência.

#### 3.4.1 – Correção a partir das medidas de pseudodistância

Na derivação dos modelos, os erros devido ao não sincronismo dos relógios do satélite e do receptor, o erro das efemérides e a refração troposférica não serão considerados, pois tais erros contaminam de mesma forma as medidas em ambas as frequências, de tal forma que no processo de diferenciação, estes erros serão cancelados (CAMARGO, 1999).

As equações simplificadas para as pseudodistâncias, nas duas frequências portadoras, são dadas por:

$$P_{1r}^s = \rho_r^s + I_{1r}^s + SP_1^s + RP_1 ; \quad (3.19)$$

$$P_{2r}^s = \rho_r^s + I_{2r}^s + SP_2^s + RP_2 , \quad (3.20)$$

sendo o atraso ionosférico dado por:

$$I_{ir}^s = \frac{40,3TEC^s}{f_i^2}, \quad (3.21)$$

em que o índice  $i$  ( $i=1,2$ ) indica a portadora e o  $s$  sobrescrito representa o satélite rastreado.

Fazendo a diferença entre as equações (3.20) e (3.19) obtém-se:

$$P_{2r}^S - P_{1r}^S = I_{2r}^S - I_{1r}^S + (SP_2^S - SP_1^S) + (RP_2 - RP_1). \quad (3.22)$$

Como:

$$I_{2r}^S - I_{1r}^S = 40,3TEC^S \frac{f_1^2 - f_2^2}{f_1^2 f_2^2} = I_{1r}^S \frac{f_1^2 - f_2^2}{f_2^2}, \quad (3.23)$$

tem-se que:

$$P_{2r}^S - P_{1r}^S = I_{1r}^S F + (SP_2^S - SP_1^S) + (RP_2 - RP_1), \quad (3.24)$$

sendo:

$$F = \frac{f_1^2 - f_2^2}{f_2^2}. \quad (3.25)$$

A equação (3.24) é básica para o cálculo da refração ionosférica na frequência  $L_1$ , quando as medidas do código são feitas com receptores de dupla frequência. O termo correspondente ao erro da ionosfera na equação (3.24) pode ser calculado por quaisquer dos modelos apresentados na seção 3.3.

### 3.4.2 – Correção a partir das medidas da fase portadora

As equações simplificadas para a fase portadora, em ambas as frequências  $L_1$  e  $L_2$ , são dadas por:

$$\lambda_1 \phi_{1r}^S = \rho_r^S - I_{1r}^S + \lambda_1 N_{1r}^S + S_{\phi_1}^S + R_{\phi_1}; \quad (3.26)$$

$$\lambda_2 \phi_{2r}^S = \rho_r^S - I_{2r}^S + \lambda_2 N_{2r}^S + S_{\phi_2}^S + R_{\phi_2}. \quad (3.27)$$

De maneira análoga ao desenvolvimento do item anterior chega-se a:

$$\lambda_1 \phi_{1r}^S - \lambda_2 \phi_{2r}^S = I_{1r}^S F - \left[ (\lambda_2 N_{2r}^S - \lambda_1 N_{1r}^S) + (S_{\phi_2}^S - S_{\phi_1}^S) + (R_{\phi_2} - R_{\phi_1}) \right]. \quad (3.28)$$

O termo correspondente ao erro da ionosfera na equação (3.28) pode ser calculado por quaisquer dos modelos apresentados no subitem 3.3.

O erro sistemático devido à ionosfera, estimado a partir da fase da portadora resulta em melhores precisões que as obtidas ao utilizar as pseudodistâncias. Contudo, no ajustamento o número de incógnitas é maior devido à ambiguidade e as perdas de ciclos (CAMARGO, 1999).

### 3.4.3 – Modelos para calcular a correção da ionosfera

Alguns autores vêm estudando o comportamento do TEC na ionosfera, criando modelos para representar a ionosfera, a partir de observações de receptores de dupla frequência de uma ou varias estações GPS.

Camargo (1999) cita que Georgiadiou (1994) desenvolveu um modelo em escala regional na Holanda, usando para calcular o atraso ionosférico ao longo do caminho percorrido pelo sinal, o seguinte modelo:

$$I_r^s = \frac{I^v}{\cos(Z^s)}. \quad (3.29)$$

Para modelar o efeito da ionosfera na direção vertical utiliza-se a série de Fourier:

$$I_1^v = a_1 + a_2 B^s + \sum_{\substack{j=1 \\ j=2i+1}}^n \left\{ a_j \cos(ih^s) + a_{j+1} \sin(ih^s) \right\} + a_{n \cdot 2 + 3} B^s h^s, \quad (3.30)$$

onde  $B^s$  é a diferença entre as latitudes do receptor e do ponto sub-ionosférico e  $h^s$  é dado por:

$$h^s = \frac{2\pi}{T}(t - 14), \quad (3.31)$$

sendo  $T$  o período de 24 horas e  $t$  a hora local do ponto sub-ionosférico.

Camargo (1999) criou o modelo regional denominado Mod\_Ion, que é uma adaptação do modelo proposto por Georgiadiou (1994). A modificação consistiu em separar as tendências dos receptores e satélites, o que não foi possível no experimento realizado na Holanda, onde se utilizou somente um receptor, ao contrário do Mod\_Ion onde foram utilizadas nove estações no âmbito da RBMC.

Veronez (2004) propôs um modelo utilizando-se dez estações da RBMC, com o uso do ajustamento sequencial e usando para modelar o efeito da ionosfera o polinômio apresentado na equação (3.18) e reescrito na equação (3.32) abaixo:

$$I_r^s = C_1 + C_2\varphi^* + C_3\lambda^* + C_4(\varphi^*)^2 + C_5(\lambda^*)^2 + C_6\varphi^*\lambda^*. \quad (3.32)$$

Matsuoka (2003) cita algumas propostas de outros autores para modelar o atraso ionosférico na vertical, entre os quais podem ser citados: a série de Fourier apresentada na equação (3.30), o harmônico esférico, a série de Taylor e o polinômio de quarta ordem.

Ao se substituir quaisquer destes modelos nas equações (3.24) ou (3.28) e com dados provenientes de receptores de dupla frequência, torna-se possível estimar os coeficientes incógnitos destes modelos o que permite calcular o efeito da refração ionosférica para a portadora  $L_1$ .

## 4 - MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 – ÁREA DE ESTUDO E DADOS

Os dados GPS de dupla frequência para a estimativa do modelo ionosférico foram obtidos das estações da RBMC, referentes ao ano de 2008. Os dados são disponibilizados *online* gratuitamente para toda comunidade pelo IBGE em: <http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/rbmc/rbmc.shtm>. De todas as estações que estavam em operação no ano de 2008, optou-se por utilizar 12 (doze) para a estimativa dos parâmetros do modelo, de tal forma que estas tivessem uma boa distribuição no território brasileiro, conforme ilustra a Figura 7.



Figura 7 - Estações da RBMC utilizadas para a estimativa dos parâmetros do modelo.



Tabela 8: Dias e estações da RBMC utilizadas na estimativa dos parâmetros no período do inverno

Estações	Dias do ano (Inverno - 172 a 264)								
	181	191	201	211	221	231	240	251	261
BOMJ	X	X	X	X	X	X	X	X	X
BRAZ	X	X	X	X	X	X	X	X	X
BRFT	X	X	X	X	X	X	X	X	X
CRUZ	X	X	X	X	X	X	X	X	X
CUIB	X	X	X	X	X	X	X	X	X
IMPZ	X	X	X	X	X	X	X	X	X
MAPA	X	X	X	X	X	X	X	X	X
NAUS	X	X	X	X	X	X	X	X	X
RIOB									
SAGA	X	X	X	X	X	X	X	X	X
SMAR	X	X	X	X	X	X	X	X	X
UFPR	X	X	X	X	X	X	X	X	X
VICO									

Tabela 9: Dias e estações da RBMC utilizadas na estimativa dos parâmetros no período da primavera

Estações	Dias do ano (Primavera - 265 a 354)								
	271	281	291	301	311	321	331	341	351
BOMJ	X	X	X	X	X	X	X	X	X
BRAZ	X	X	X	X	X	X	X	X	X
BRFT	X	X	X	X	X	X	X	X	X
CRUZ	X								
CUIB	X	X	X	X	X	X	X	X	X
IMPZ	X	X	X	X	X	X	X	X	X
MAPA	X	X	X	X	X	X	X	X	X
NAUS	X	X	X	X	X	X	X	X	X
RIOB		X	X	X	X	X	X	X	X
SAGA	X	X	X	X	X	X	X	X	X
SMAR	X	X	X	X	X	X	X	X	X
UFPR	X	X	X	X	X	X	X	X	X
VICO									

Vale ressaltar que a estação VICO não participou do processo de estimativa dos parâmetros, pois ela foi utilizada na validação do modelo por meio do Posicionamento por Ponto Preciso (PPP). Devido à falta de dados de vários dias, tanto da estação CRUZ quanto da estação RIOB, optou-se pelo uso de uma ou outra dependendo da existência dos dados, como pode ser visto nas tabelas 6, 7, 8 e 9, apresentadas anteriormente.

## 4.2 – O APLICATIVO CICALC

Com o objetivo de facilitar a realização deste trabalho foi desenvolvido um aplicativo, chamado de CiCalc, em linguagem *Visual Basic*, cujo *software* utilizado para o desenvolvimento foi o *Visual Basic Express Edition 2008*, que é gratuito e pode ser encontrado em: <http://www.microsoft.com/express/download/default.aspx>. A Figura 8 apresenta a tela principal do CiCalc.

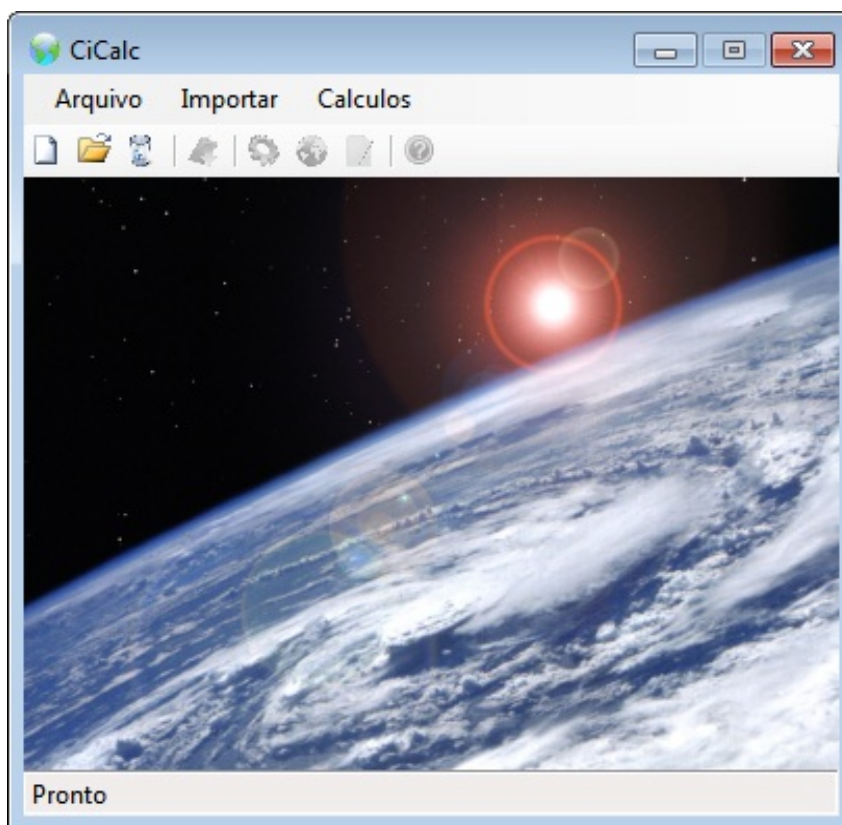


Figura 8 – Tela principal do aplicativo CiCalc

O CiCalc está dividido em três menus principais que estão em sua parte superior, como pode ser visto na Figura 8. Estes menus são denominados de Arquivo, Importar e Cálculos, sendo que estes possuem sub-menus, os quais permitem realizar todas as tarefas a que o aplicativo se propõe.

O menu Arquivo tem como principal objetivo a manipulação dos projetos, tendo como funções a criação de novos projetos, onde é criada uma pasta com o nome do projeto no diretório informado pelo usuário, sendo que nesta pasta ficam todos os arquivos relativos ao projeto que forem criados pelo CiCalc; outra função é a abertura de projetos já existentes para continuação do trabalho e a última função deste menu é a exclusão de projetos do disco rígido.

O menu Importar tem como principal finalidade a importação dos arquivos RINEX provenientes das estações da RBMC, que são a base para o cálculo dos parâmetros do modelo. No momento que o usuário pede a importação de um arquivo, o CiCalc faz a leitura do arquivo de observação e coloca as informações de interesse, apenas os satélites da constelação GPS que tenham informações completas em L1 e L2, em um arquivo temporário. Em seguida é feita a leitura do arquivo de navegação e as informações de interesse são colocadas em outro arquivo temporário. A partir destes arquivos temporários o CiCalc gera um arquivo com o nome da estação que está sendo importada com a extensão .DAT. Este arquivo irá conter todas as informações necessárias para o cálculo dos parâmetros do modelo.

O conteúdo do arquivo .DAT criado é a hora em segundos, o número do satélite e a diferença algébrica entre as pseudodistâncias advindas das duas portadoras, sendo estas informações retiradas diretamente do arquivo de observação. Neste arquivo também conterà a hora local do ponto ionosférico, a diferença entre as latitudes do ponto ionosférico e da estação que está sendo importada e do ângulo zenital do ponto ionosférico em relação ao satélite observado. Para a obtenção destes três valores o Cicalc faz o cálculo com os dados do arquivo de navegação, com as coordenadas aproximadas do receptor, das coordenadas do satélite, do ângulo zenital entre o receptor e o satélite observado e da latitude e da longitude do ponto ionosférico.

O menu Calcular está dividido em três sub-menus que são: Ajustar, Corrigir e Gerar VTEC. O sub-menu Ajustar tem como função ler os arquivos .DAT gerados na importação dos dados das estações para estruturar todas as matrizes necessárias para o ajustamento, conforme Apêndice B. Em seguida é feito o ajustamento e os parâmetros ajustados do modelo são salvos em um arquivo texto com extensão .MXX.

O sub-menu Corrigir tem por finalidade corrigir arquivos RINEX dos efeitos da ionosfera por meio dos parâmetros do modelo calculados anteriormente. Para isto procede-se a leitura dos arquivos de observação e navegação da estação informada pelo usuário a que se pretende corrigir, e as informações pertinentes são colocadas em arquivos de texto temporários. Com estas informações são calculados os valores necessários para a entrada no modelo e que juntamente com os valores, que são os parâmetros estimados do modelo, provenientes do arquivo de extensão .MXX gerado durante o ajustamento, permitem calcular o efeito da refração ionosférica para cada satélite em cada época. De posse dos valores a serem corrigidos, é gerado um novo arquivo de observação idêntico ao informado pelo usuário, com exceção que neste novo arquivo a pseudodistância e a fase da portadora em L1 estarão corrigidas do erro ionosférico que foi modelado.

O sub-menu gerar VTEC calcula por meio do arquivo com os parâmetros estimados, os valores de VTEC para uma grade de pontos com espaçamento pré-definido, numa área retangular que engloba todas as estações que foram utilizadas na estimativa dos parâmetros do modelo. Os valores são calculados em intervalos de duas em duas horas, e os resultados são salvos em arquivos texto com extensão .VETCxx onde o xx representa a hora para qual os valores foram calculados. Estes arquivos estão estruturados em quatro colunas tendo como separador o símbolo de ponto e vírgula (;). A primeira coluna contém os valores da latitude, na segunda estão os valores de longitude e na terceira e quarta colunas estão os valores do erro em metros e do VTEC em TECU, respectivamente.

### 4.3 – IMPLEMENTAÇÃO DA METODOLOGIA

Pelo exposto, neste trabalho a estimativa dos parâmetros do modelo ionosférico é feita por meio das observações das pseudodistâncias advindas dos códigos C/A e P<sub>2</sub>, como apresentado no item (3.4.1). Após o estudo das várias funções apresentadas na literatura para a modelagem do efeito ionosférico nos sinais GPS, optou-se por utilizar a série de Fourier que foi apresentada no item (3.4.3.), representada pela equação (3.30). Logo, o modelo utilizado é expresso por:

$$P_{2r}^S - P_{1r}^S = \left( a_1 + a_2 B^S + \sum_{\substack{i=1 \\ j=2i+1}}^n \left\{ a_j \cos(ih^S) + a_{j+1} \text{sen}(ih^S) \right\} + a_{n*2+3} B^S h^S \right) * \left( \frac{F}{\cos(z^S)} \right) + (SP_2^S - SP_1^S) + (RP_2 - RP_1). \quad (4.1)$$

A estimativa dos parâmetros do modelo apresentado na equação (4.1) é feita por meio do ajustamento de observações, que segundo Gemael (1994) tem por objetivo proporcionar uma solução única para problemas onde o número de observações ou medidas é redundante e o sistema de equações inconsistente, bem como a estimativa da precisão da solução adotada. A inconsistência do sistema de equações deve-se às flutuações probabilísticas das observações e faz com que um subconjunto de dados proporcione valores diferentes de outro subconjunto. A solução única, nesses problemas, é dada portanto através do ajustamento de observações pelo Método dos Mínimos Quadrados (MMQ), desenvolvido, independentemente, por Gauss, em 1795 e Legendre, em 1805, e que tem como princípio básico que a soma dos quadrados dos resíduos deve ser mínima.

Ao considerar a equação (4.1), é possível estruturar as principais matrizes utilizadas no processo de ajustamento de observações, que são: a matriz dos coeficientes “A”, o Vetor L e a matriz Variância Covariância das observações (MVC). Essas matrizes e algumas informações sobre o ajustamento de observações deste trabalho são apresentadas no Apêndice B.

Após a importação dos dados das estações, ajustamento dos parâmetros do modelo e da correção dos arquivos da estação VICO para todos os dias apresentados nas Tabelas 6,7,8 e 9 por meio do aplicativo CiCalc, verificou-se a eficácia do modelo proposto por meio de Posicionamento por Ponto Preciso. Para o processamento dos dados foi utilizada a ferramenta IBGE-PPP que é disponibilizada *online* gratuitamente pelo IBGE para toda a comunidade em: <http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/ppp/default.shtm>.

O IBGE-PPP é um serviço *online* para o pós-processamento de dados GPS, que permite aos usuários obterem coordenadas com boa precisão no Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS2000) e no *International Terrestrial Reference Frame* (ITRF). Este serviço de posicionamento faz uso do aplicativo de processamento CSRS-PPP desenvolvido pelo *Geodetic Survey Division (GSD) of Natural Resources of Canada* (NRCan), sendo que ele processa dados GPS que foram coletados no modo estático ou cinemático de receptores de uma ou duas frequências (IBGE, 2009).

Como estratégia de processamento foi utilizado o arquivo de dados da VICO completo, ou seja, com dados de 24 horas. A rotina do sub-menu Corrigir do CiCalc foi adaptada para gerar três arquivos a partir do original da estação VICO, sendo que nestes arquivos somente constam dados da constelação GPS e as observações que continham dados completos de L1 e L2.

Estes três arquivos possuem características diferentes, pois um contém as informações de L1 e L2 sem correção, os outros dois contém informações apenas de L1, entretanto um com os dados originais, enquanto que no outro as informações foram corrigidas do erro ionosférico modelado pela metodologia deste trabalho.

Aproveitando o fato de que o IBGE-PPP inicialmente não estava empregando nenhum modelo de correção ionosférica em L1, fizeram-se três processamentos: L1 sem correção, L1 com correção pelo modelo proposto e com L1 e L2 onde o IBGE-PPP faz uma combinação livre do efeito da ionosfera (*ion-free*).

Posteriormente, quando foi implementada a correção ionosférica utilizando os arquivos do IGS de VTEC, quando era feito o processamento utilizando apenas a observável L1, realizou-se um quarto processamento utilizando o arquivo com dados L1 sem nenhuma correção. Portanto, foram realizados quatro processamentos: L1 sem nenhuma correção, L1 com correção pelo modelo proposto, L1 com correção por meio dos mapas de VTEC do IGS e utilizando as observáveis L1 e L2. Dessa forma é realizada a comparação dos resultados destes quatro processamentos a fim de se verificar a eficácia do modelo proposto.

Outra comparação realizada foi entre os valores de VTEC calculados pelo CiCalc e os valores encontrados nos arquivos combinados do IGS, de forma a se analisar o comportamento do VTEC ao longo do dia e do ano, para os dias escolhidos e apresentados anteriormente, por meio dos valores obtidos pelas duas estratégias, ou seja, os valores obtidos nos mapas do IGS e por meio do processamento no CiCalc.

## 5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos neste trabalho, bem como as discussões dos resultados, que são estruturados da seguinte forma:

- Coeficientes do modelo e alguns dados estatísticos, advindos do processamento realizado no aplicativo CiCalc.
- Validação do modelo proposto por meio do processamento da estação VICO pelo método de Posicionamento por Ponto Preciso, onde é feita a comparação entre as coordenadas oficiais e as advindas de quatro diferentes estratégias:  $L_1$  e  $L_2$ ,  $L_1$  sem correção,  $L_1$  com correção pelo modelo proposto e  $L_1$  com correção por meio dos mapas de VTEC do IGS.
- Comparação entre os valores de VTEC obtidos pelo aplicativo CiCalc e por meio dos mapas do IGS.

### 5.1 – COEFICIENTES DO MODELO

A partir dos processamentos realizados no aplicativo CiCalc, foram obtidos os coeficientes para o modelo proposto para os dias em estudo, que são apresentados no Apêndice C. Estes valores foram estruturados em gráficos e são apresentados da Figura 9 até a Figura 23. É importante salientar que nos gráficos ilustrados a seguir, o eixo X representa os dias do ano e o eixo Y representa os coeficientes cuja escala é a mesma para todos os coeficientes.

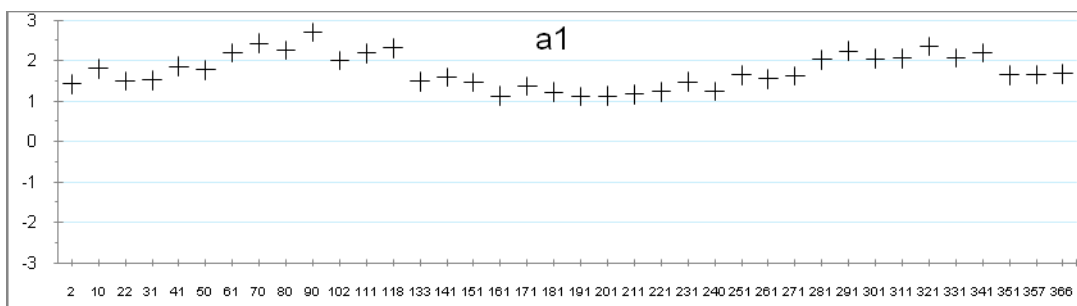


Figura 9 – Valores do coeficiente  $a_1$  para os dias em estudo

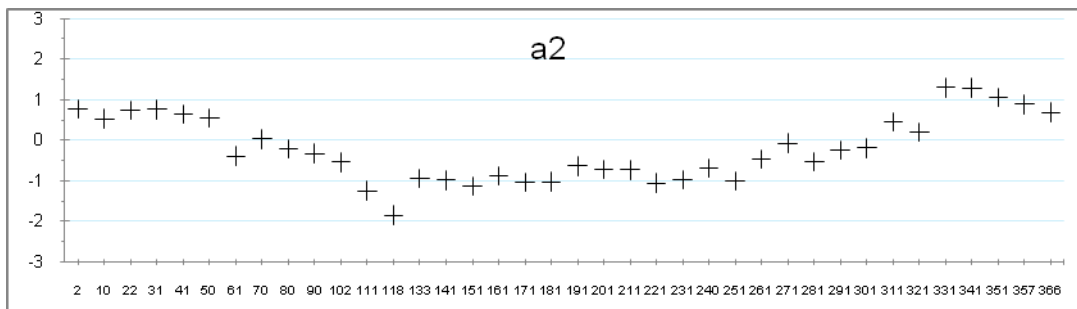


Figura 10 – Valores do coeficiente  $a_2$  para os dias em estudo

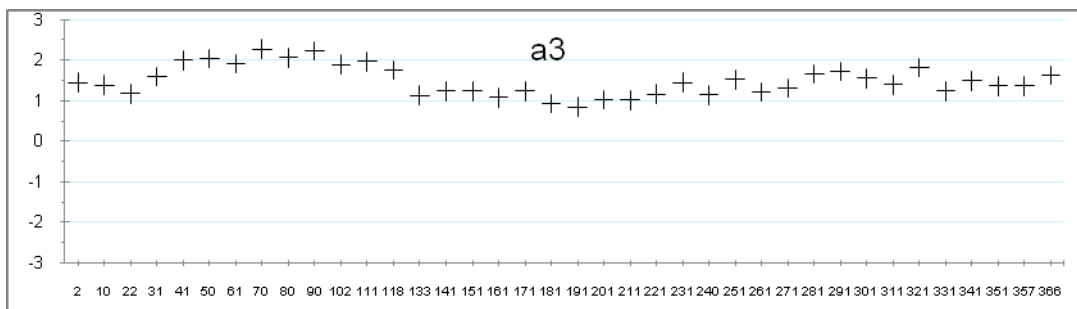


Figura 11 – Valores do coeficiente  $a_3$  para os dias em estudo

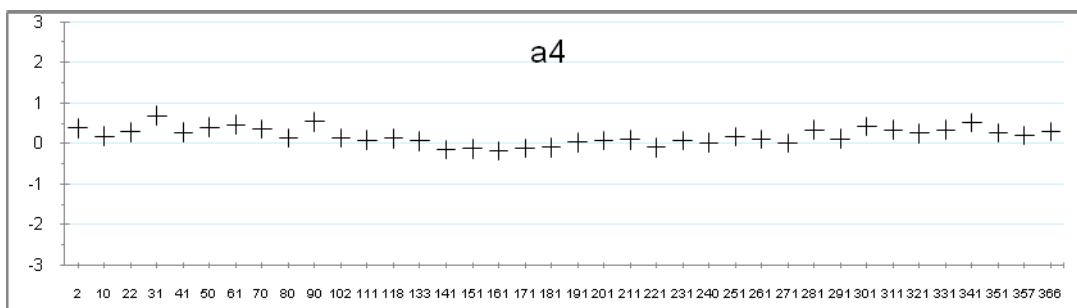


Figura 12 – Valores do coeficiente  $a_4$  para os dias em estudo

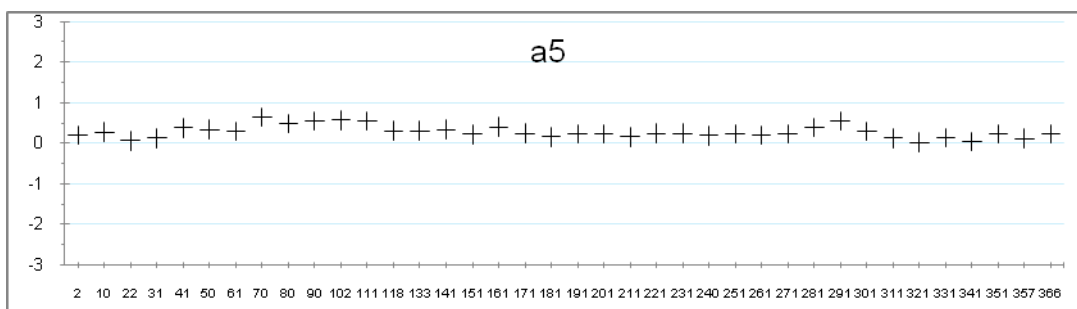


Figura 13 – Valores do coeficiente  $a_5$  para os dias em estudo

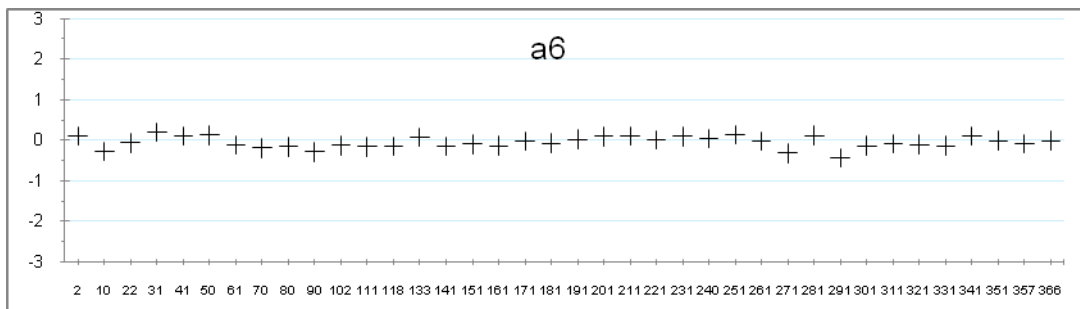


Figura 14 – Valores do coeficiente  $a_6$  para os dias em estudo

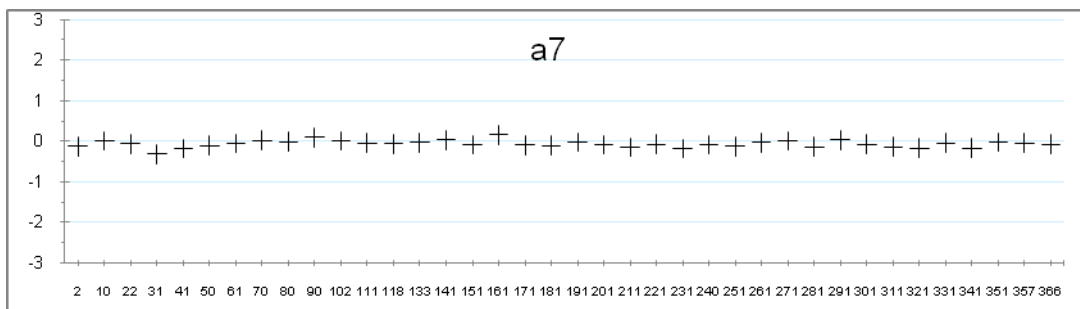


Figura 15 – Valores do coeficiente  $a_7$  para os dias em estudo

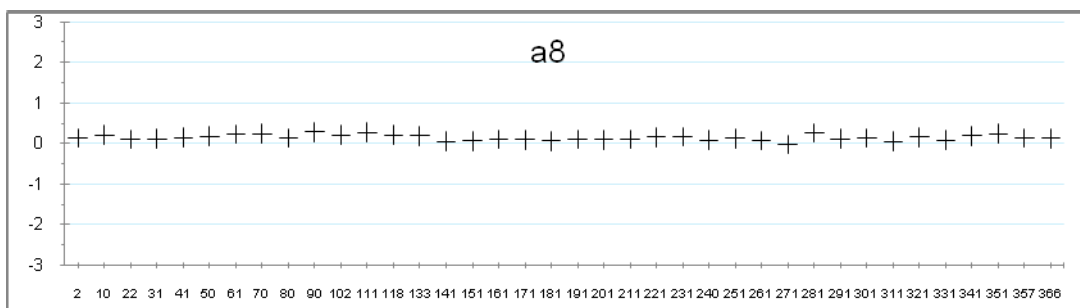


Figura 16 – Valores do coeficiente  $a_8$  para os dias em estudo

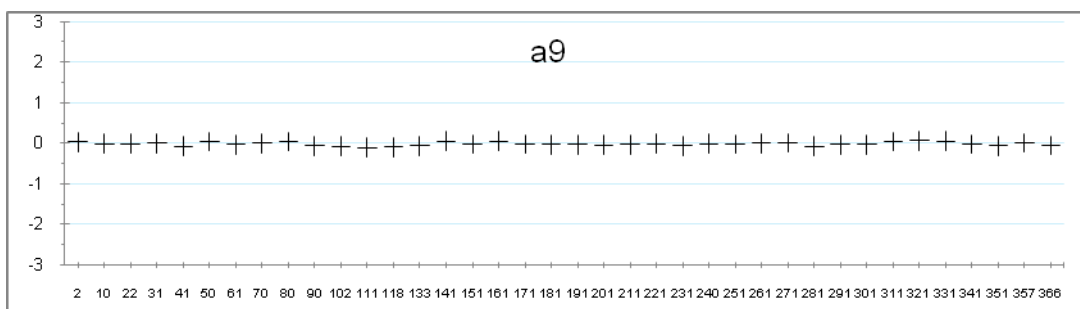


Figura 17 – Valores do coeficiente  $a_9$  para os dias em estudo

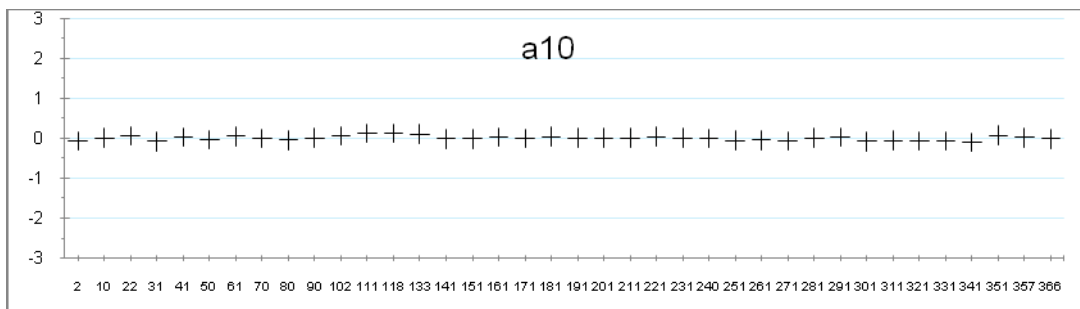


Figura 18 – Valores do coeficiente a10 para os dias em estudo

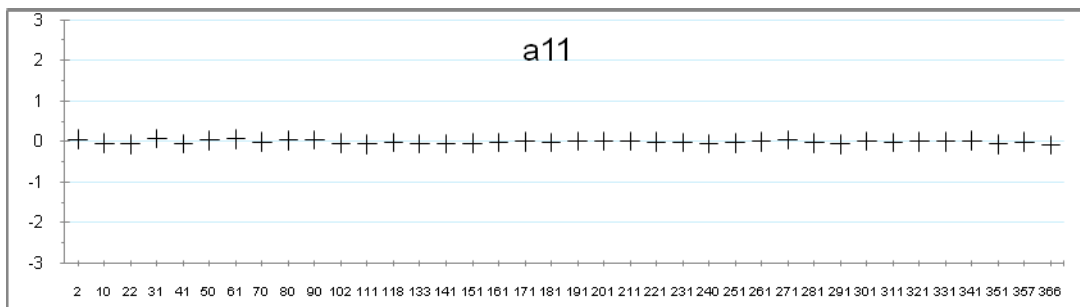


Figura 19 – Valores do coeficiente a11 para os dias em estudo

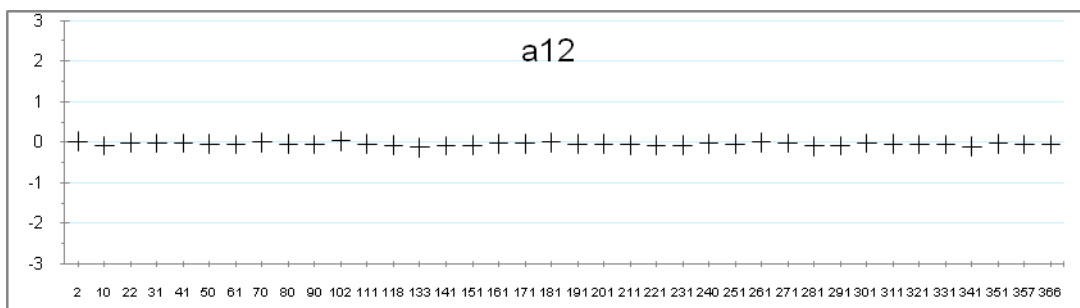


Figura 20 – Valores do coeficiente a12 para os dias em estudo

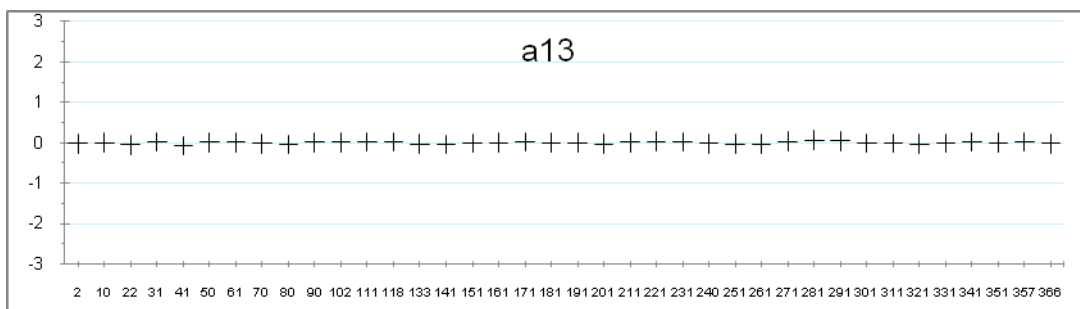


Figura 21 – Valores do coeficiente a13 para os dias em estudo

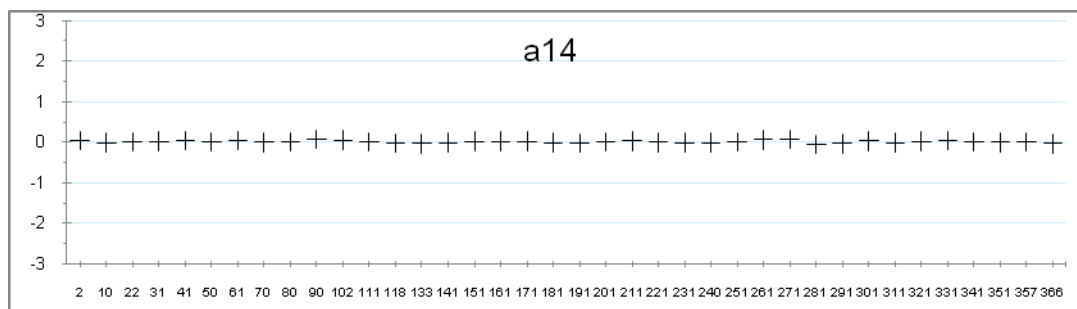


Figura 22 – Valores do coeficiente  $a_{14}$  para os dias em estudo

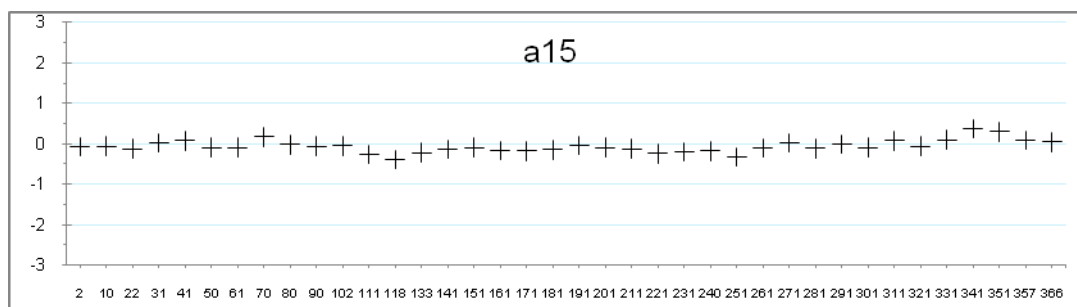


Figura 23 – Valores do coeficiente  $a_{15}$  para os dias em estudo

Ao considerar que a ionosfera tem variações temporais, compreendidas em variações diárias, sazonais e ciclos de longos períodos, não se têm elementos que permitam comparar as variações diárias dos efeitos da ionosfera por meio dos coeficientes estimados para o modelo. Porém, pode-se ver o comportamento diário do conteúdo total de elétrons (TEC), que é diretamente proporcional ao efeito da ionosfera nos sinais GPS, por meio da Figura 28 até a Figura 43, que ilustram valores de VTEC para um dia de cada estação do ano em quatro latitudes diferentes.

Com relação às variações sazonais, os coeficientes, principalmente  $a_1$ ,  $a_2$  e  $a_3$  apresentados nas Figuras 9, 10 e 11, mostram o comportamento sazonal da ionosfera, onde se pode notar uma maior atividade da ionosfera nos dias próximos aos equinócios de outono e primavera, 20 de março e 22 de setembro, respectivamente. As menores atividades ocorrem nos dias próximos aos solstícios de verão e inverno, 21 de dezembro e 20 de junho, respectivamente.

Também, não há elementos que permitam mostrar os efeitos da ionosfera para ciclos de longos períodos, uma vez que o modelo foi estimado apenas para o ano de 2008, e seria necessária pelo menos uma série com 11 (onze) anos para representar um ciclo de longo período.

Utilizando os valores apresentados no Apêndice C, que foram ilustrados anteriormente, nas Figura 9 até a Figura 23, foram calculadas algumas estatísticas: média, desvio padrão, valores mínimos e máximos, para as quatro estações do ano. Estas estatísticas são apresentadas nas Tabelas 10, 11, 12 e 13.

Tabela 10: Estatísticas dos coeficientes estimados para os dias em estudo no período do Verão

Coeficiente	Verão (356 - 79)			
	Média	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
<b>a1</b>	1,783	±0,317	1,420	2,430
<b>a2</b>	0,521	±0,398	-0,393	0,980
<b>a3</b>	1,681	±0,357	1,174	2,275
<b>a4</b>	0,354	±0,149	0,176	0,689
<b>a5</b>	0,266	±0,169	0,060	0,649
<b>a6</b>	-0,021	±0,152	-0,276	0,198
<b>a7</b>	-0,093	±0,097	-0,315	0,019
<b>a8</b>	0,162	±0,051	0,099	0,243
<b>a9</b>	-0,010	±0,034	-0,071	0,041
<b>a10</b>	-0,004	±0,045	-0,083	0,061
<b>a11</b>	-0,004	±0,055	-0,080	0,073
<b>a12</b>	-0,033	±0,029	-0,081	0,018
<b>a13</b>	-0,013	±0,030	-0,072	0,023
<b>a14</b>	0,014	±0,024	-0,031	0,045
<b>a15</b>	-0,005	±0,098	-0,126	0,168

Tabela 11: Estatísticas dos coeficientes estimados para os dias em estudo no período do Outono

Coeficiente	Outono (79 - 172)			
	Média	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
a1	1,851	±0,511	1,128	2,710
a2	-0,914	±0,473	-1,847	-0,216
a3	1,581	±0,440	1,078	2,229
a4	0,050	±0,213	-0,175	0,538
a5	0,399	±0,134	0,218	0,572
a6	-0,121	±0,095	-0,288	0,077
a7	-0,005	±0,080	-0,098	0,158
a8	0,164	±0,085	0,049	0,285
a9	-0,029	±0,060	-0,108	0,053
a10	0,037	±0,063	-0,050	0,124
a11	-0,023	±0,037	-0,068	0,038
a12	-0,054	±0,042	-0,127	0,026
a13	-0,005	±0,029	-0,048	0,027
a14	0,012	±0,032	-0,033	0,074
a15	-0,157	±0,114	-0,397	-0,019

Tabela 12: Estatísticas dos coeficientes estimados para os dias em estudo no período do Inverno

Coeficiente	Inverno (172 - 266)			
	Média	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
a1	1,311	±0,197	1,117	1,648
a2	-0,809	±0,209	-1,061	-0,463
a3	1,146	±0,225	0,847	1,517
a4	0,043	±0,089	-0,096	0,170
a5	0,211	±0,033	0,161	0,246
a6	0,045	±0,068	-0,075	0,135
a7	-0,096	±0,051	-0,185	-0,024
a8	0,110	±0,035	0,063	0,168
a9	-0,028	±0,018	-0,061	-0,005
a10	0,000	±0,033	-0,058	0,039
a11	-0,015	±0,022	-0,059	0,010
a12	-0,043	±0,028	-0,078	0,000
a13	-0,004	±0,024	-0,031	0,031
a14	0,004	±0,025	-0,019	0,059
a15	-0,163	±0,086	-0,326	-0,041

Tabela 13: Estatísticas dos coeficientes estimados para os dias em estudo no período da Primavera

Coeficiente	Primavera (266 - 356)			
	Média	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
<b>a1</b>	2,030	±0,247	1,626	2,357
<b>a2</b>	0,360	±0,699	-0,532	1,296
<b>a3</b>	1,503	±0,200	1,235	1,822
<b>a4</b>	0,287	±0,153	0,006	0,513
<b>a5</b>	0,224	±0,169	0,022	0,548
<b>a6</b>	-0,112	±0,178	-0,430	0,112
<b>a7</b>	-0,080	±0,077	-0,170	0,029
<b>a8</b>	0,136	±0,090	-0,017	0,264
<b>a9</b>	-0,005	±0,052	-0,071	0,066
<b>a10</b>	-0,034	±0,058	-0,094	0,072
<b>a11</b>	-0,012	±0,037	-0,064	0,045
<b>a12</b>	-0,057	±0,033	-0,108	-0,019
<b>a13</b>	0,011	±0,029	-0,029	0,060
<b>a14</b>	0,008	±0,036	-0,050	0,067
<b>a15</b>	0,066	±0,171	-0,116	0,376

Ao analisar os dados apresentados nas Tabelas 10, 11, 12 e 13 percebe-se que há uma grande variação nos valores dos coeficientes, principalmente os coeficientes  $a_1$ ,  $a_2$  e  $a_3$ , dentro de uma mesma estação do ano. Isto se deve ao comportamento sazonal da ionosfera, uma vez que uma estação tem em seu início e fim, um solstício (período de menor atividade solar) ou um equinócio (período de maior atividade solar).

## 5.2 – VALIDAÇÃO DO MODELO

A partir dos processamentos realizados no PPP-IBGE, foram obtidas as coordenadas para a estação VICO em quatro estratégias de processamento: L<sub>1</sub> e L<sub>2</sub>, L<sub>1</sub> sem correção, L<sub>1</sub> com correção pelo modelo proposto e L<sub>1</sub> com correção por meio dos mapas de VTEC do IGS, para os dias em estudo.

As coordenadas encontradas nos processamentos foram comparadas com as oficiais fornecidas pelo IBGE que podem ser encontradas no descritivo da estação VICO. As discrepâncias são encontradas no Apêndice D, estruturadas nas Tabelas D.1 a D.5 e no Apêndice E estruturadas em gráficos diários representados pelas Figuras E.1 a E.38. Na Tabela D.5 e nas Figuras de E.1 a E.38, a resultante foi calculada pela equação:

$$\text{Resultante} = \left( \sqrt{Dx^2 + Dy^2 + Dz^2} \right) \quad (5.1)$$

Com estes valores foram calculadas as estatísticas: média, desvio padrão e valores mínimos e máximos, para cada estação do ano e os resultados são apresentados nas Tabelas 14, 15, 16, 17 e 18.

Tabela 14: Estatísticas das discrepâncias no eixo X para os dias em estudo

<b>Dx (m)</b>					
<b>Estação</b>	<b>Estatística</b>	<b>L1 com correção</b>	<b>L1 sem correção</b>	<b>L1 e L2</b>	<b>Ionex</b>
<b>Verão</b>	<b>Média</b>	0,382	1,230	-0,002	-0,141
	<b>Desvio Padrão</b>	0,316	0,290	0,006	0,247
	<b>Mínimo</b>	0,005	0,826	-0,009	-0,448
	<b>Máximo</b>	1,082	1,652	0,009	0,349
<b>Outono</b>	<b>Média</b>	0,074	1,374	-0,002	-0,312
	<b>Desvio Padrão</b>	0,184	0,368	0,006	0,140
	<b>Mínimo</b>	-0,204	0,828	-0,014	-0,585
	<b>Máximo</b>	0,428	1,868	0,005	-0,110
<b>Inverno</b>	<b>Média</b>	0,275	1,250	0,004	-0,397
	<b>Desvio Padrão</b>	0,322	0,338	0,005	0,225
	<b>Mínimo</b>	-0,067	0,909	-0,004	-0,569
	<b>Máximo</b>	0,764	1,815	0,012	0,105
<b>Primavera</b>	<b>Média</b>	0,567	1,883	0,008	-0,161
	<b>Desvio Padrão</b>	0,374	0,433	0,006	0,312
	<b>Mínimo</b>	0,114	1,344	0,004	-0,780
	<b>Máximo</b>	1,115	2,573	0,021	0,179

Tabela 15: Estatísticas das discrepâncias no eixo Y para os dias em estudo

<b>Dy (m)</b>					
<b>Estação</b>	<b>Estatística</b>	<b>L1 com correção</b>	<b>L1 sem correção</b>	<b>L1 e L2</b>	<b>Ionex</b>
<b>Verão</b>	<b>Média</b>	0,154	-0,640	-0,033	0,290
	<b>Desvio Padrão</b>	0,217	0,235	0,006	0,172
	<b>Mínimo</b>	-0,324	-0,896	-0,041	-0,081
	<b>Máximo</b>	0,395	-0,206	-0,022	0,596
<b>Outono</b>	<b>Média</b>	0,388	-0,808	-0,031	0,314
	<b>Desvio Padrão</b>	0,235	0,225	0,005	0,077
	<b>Mínimo</b>	0,068	-1,144	-0,038	0,208
	<b>Máximo</b>	0,851	-0,444	-0,022	0,420
<b>Inverno</b>	<b>Média</b>	0,286	-0,607	-0,038	0,398
	<b>Desvio Padrão</b>	0,325	0,307	0,005	0,127
	<b>Mínimo</b>	-0,257	-1,194	-0,048	0,144
	<b>Máximo</b>	0,671	-0,254	-0,031	0,559
<b>Primavera</b>	<b>Média</b>	0,034	-1,148	-0,038	0,255
	<b>Desvio Padrão</b>	0,208	0,268	0,004	0,245
	<b>Mínimo</b>	-0,368	-1,666	-0,044	-0,159
	<b>Máximo</b>	0,266	-0,790	-0,032	0,592

Tabela 16: Estatísticas das discrepâncias no eixo Z para os dias em estudo

<b>Dz (m)</b>					
<b>Estação</b>	<b>Estatística</b>	<b>L1 com correção</b>	<b>L1 sem correção</b>	<b>L1 e L2</b>	<b>Ionex</b>
<b>Verão</b>	<b>Média</b>	-0,380	-0,808	0,097	-0,089
	<b>Desvio Padrão</b>	0,311	0,294	0,006	0,262
	<b>Mínimo</b>	-0,895	-1,449	0,089	-0,421
	<b>Máximo</b>	0,090	-0,388	0,107	0,406
<b>Outono</b>	<b>Média</b>	-0,150	-0,923	0,095	0,204
	<b>Desvio Padrão</b>	0,319	0,442	0,004	0,121
	<b>Mínimo</b>	-0,730	-1,758	0,088	-0,049
	<b>Máximo</b>	0,167	-0,424	0,100	0,345
<b>Inverno</b>	<b>Média</b>	-0,099	-0,630	0,092	0,248
	<b>Desvio Padrão</b>	0,189	0,204	0,003	0,140
	<b>Mínimo</b>	-0,386	-0,971	0,089	-0,011
	<b>Máximo</b>	0,152	-0,393	0,098	0,393
<b>Primavera</b>	<b>Média</b>	-0,599	-1,192	0,097	-0,111
	<b>Desvio Padrão</b>	0,217	0,266	0,003	0,180
	<b>Mínimo</b>	-0,975	-1,649	0,090	-0,281
	<b>Máximo</b>	-0,319	-0,902	0,099	0,266

Tabela 17: Estatísticas das discrepâncias na altura geométrica para os dias em estudo

<b>Dh (m)</b>					
<b>Estação</b>	<b>Estatística</b>	<b>L1 com correção</b>	<b>L1 sem correção</b>	<b>L1 e L2</b>	<b>Ionex</b>
<b>Verão</b>	<b>Média</b>	0,295	1,533	-0,019	-0,254
	<b>Desvio Padrão</b>	0,429	0,396	0,007	0,330
	<b>Mínimo</b>	-0,262	0,905	-0,032	-0,601
	<b>Máximo</b>	1,212	2,035	-0,009	0,436
<b>Outono</b>	<b>Média</b>	-0,148	1,779	-0,020	-0,490
	<b>Desvio Padrão</b>	0,297	0,504	0,007	0,167
	<b>Mínimo</b>	-0,440	0,995	-0,035	-0,766
	<b>Máximo</b>	0,464	2,627	-0,012	-0,270
<b>Inverno</b>	<b>Média</b>	0,037	1,461	-0,010	-0,617
	<b>Desvio Padrão</b>	0,456	0,464	0,006	0,276
	<b>Mínimo</b>	-0,408	1,007	-0,020	-0,866
	<b>Máximo</b>	0,718	2,261	0,000	-0,020
<b>Primavera</b>	<b>Média</b>	0,575	2,439	-0,009	-0,238
	<b>Desvio Padrão</b>	0,413	0,531	0,006	0,402
	<b>Mínimo</b>	0,141	1,823	-0,015	-0,940
	<b>Máximo</b>	1,304	3,397	0,005	0,291

Tabela 18: Estatísticas das discrepâncias na resultante para os dias em estudo

<b>Resultante (m)</b>					
<b>Estação</b>	<b>Estatística</b>	<b>L1 com correção</b>	<b>L1 sem correção</b>	<b>L1 e L2</b>	<b>Ionex</b>
<b>Verão</b>	<b>Média</b>	0,652	1,624	0,103	0,486
	<b>Desvio Padrão</b>	0,345	0,397	0,006	0,144
	<b>Mínimo</b>	0,242	1,040	0,096	0,262
	<b>Máximo</b>	1,359	2,106	0,115	0,685
<b>Outono</b>	<b>Média</b>	0,542	1,860	0,100	0,501
	<b>Desvio Padrão</b>	0,252	0,555	0,003	0,158
	<b>Mínimo</b>	0,196	1,030	0,095	0,291
	<b>Máximo</b>	0,959	2,809	0,104	0,776
<b>Inverno</b>	<b>Média</b>	0,583	1,539	0,100	0,637
	<b>Desvio Padrão</b>	0,225	0,450	0,004	0,232
	<b>Mínimo</b>	0,184	1,109	0,094	0,178
	<b>Máximo</b>	0,880	2,294	0,106	0,864
<b>Primavera</b>	<b>Média</b>	0,879	2,514	0,105	0,479
	<b>Desvio Padrão</b>	0,358	0,537	0,003	0,218
	<b>Mínimo</b>	0,466	1,930	0,097	0,289
	<b>Máximo</b>	1,488	3,473	0,109	0,981

A partir dos valores médios das discrepâncias para cada estação do ano apresentados anteriormente nas Tabelas 14, 15, 16, 17 e 18, foram gerados gráficos que são apresentados nas Figuras 24, 25, 26 e 27.

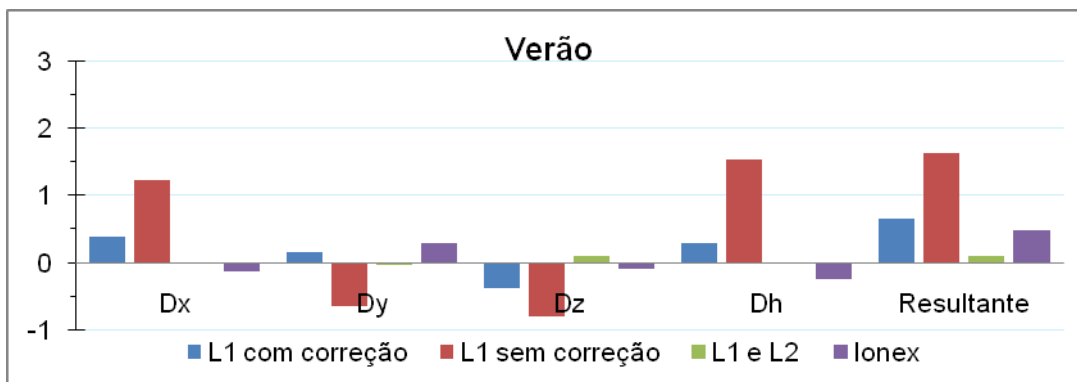


Figura 24 – Valores médios das discrepâncias para o verão

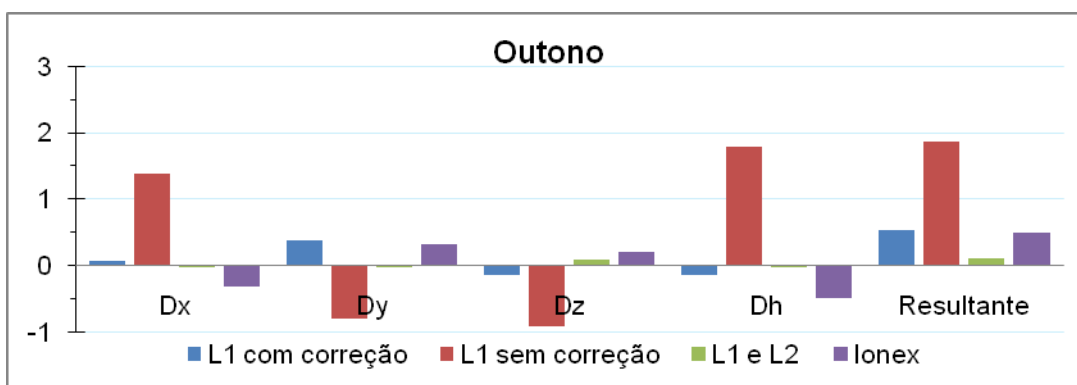


Figura 25 – Valores médios das discrepâncias para o outono

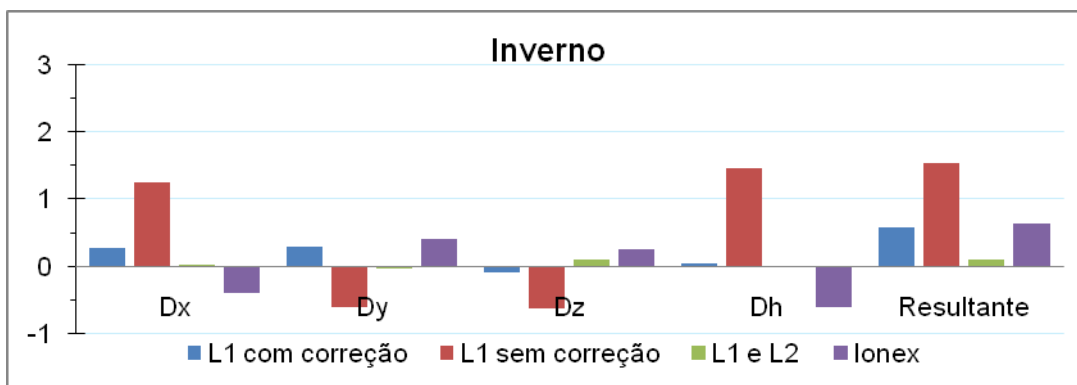


Figura 26 – Valores médios das discrepâncias para o inverno

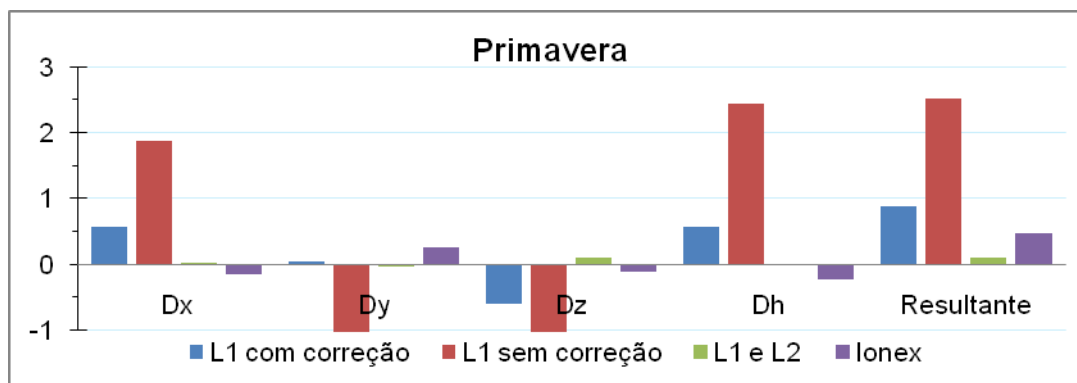


Figura 27 – Valores médios das discrepâncias para a primavera

Nas Tabelas 14 a 18 e Figuras 24 a 27 apresentadas anteriormente e nos Apêndices D e E, pode-se verificar as discrepâncias encontradas para a estação VICO, através das quatro estratégias supracitadas.

Percebe-se que, para todos os dias em estudo, como esperado, as discrepâncias por meio da estratégia sem nenhuma correção obteve os piores resultados, com valores médios das discrepâncias para as estações do ano maiores que 1,539 metros e 1,461 metros para a resultante e altura geométrica, respectivamente.

Em relação à estratégia de processamento com  $L_1$  e  $L_2$ , obteve-se os melhores resultados, encontrando-se valores médios das discrepâncias para as estações do ano melhores que 0,105 metros e 0,020 metros para a resultante e altura geométrica, respectivamente.

Com relação às estratégias de processamento utilizando o modelo proposto neste trabalho e por meio dos mapas de VTEC do IGS, obtiveram-se resultados similares, sendo que, em alguns dias um ou outro modelo obteve melhores resultados. A estratégia de processamento usando o modelo proposto obteve resultados médios para as estações do ano, com discrepâncias na altura geométrica e na resultante melhores que, 0,575 metros e 0,879 metros, respectivamente. Enquanto que para a estratégia utilizando os mapas de VTEC do IGS, obteve-se resultados melhores que 0,617 metros e 0,637 metros, para as discrepâncias na altura geométrica e para a resultante, respectivamente.

A estratégia que usou  $L_1$  e  $L_2$  obteve uma correção média da ordem de 99% e 95%, em relação à estratégia sem nenhuma correção, para a altura geométrica e para a resultante, respectivamente. A estratégia que utilizou os mapas de VTEC do IGS obteve uma melhoria média de 78% e 72%, para a altura geométrica e para a resultante, respectivamente. Já para a estratégia que utilizou o modelo proposto neste trabalho, obteve-se melhorias da ordem de 90% e 65%, para a altura geométrica e para a resultante, respectivamente.

### 5.3 – COMPARAÇÃO ENTRE VALORES DE VTEC

A partir dos dados provenientes dos arquivos de VTEC do IGS, e dos valores de VTEC gerados pelo CiCalc, foram gerados gráficos para quatro dias (31, 133, 221 e 311), que representaram as quatro estações do ano, em quatro diferentes latitudes ( $0^\circ$ ,  $10^\circ\text{S}$ ,  $20^\circ\text{S}$  e  $30^\circ\text{S}$ ). As Figuras 28 a 43 ilustram os gráficos gerados.

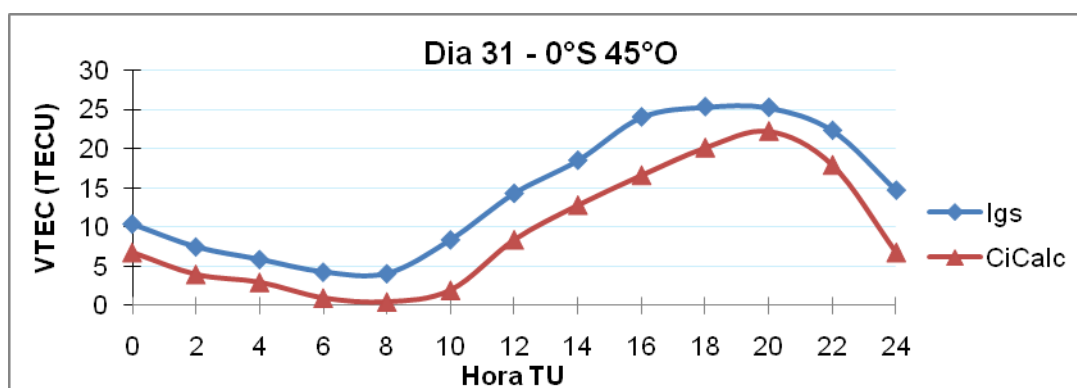


Figura 28 – Valores de VTEC, para  $0^\circ\text{S}$   $45^\circ\text{O}$ , do IGS e CiCalc para o dia 31 (Verão)

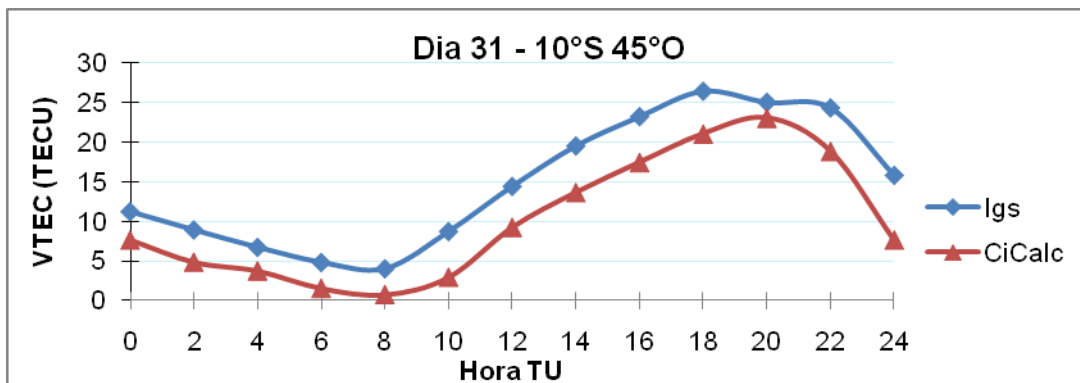


Figura 29 – Valores de VTEC, para 10°S 45°O, do IGS e CiCalc para o dia 31 (Verão)

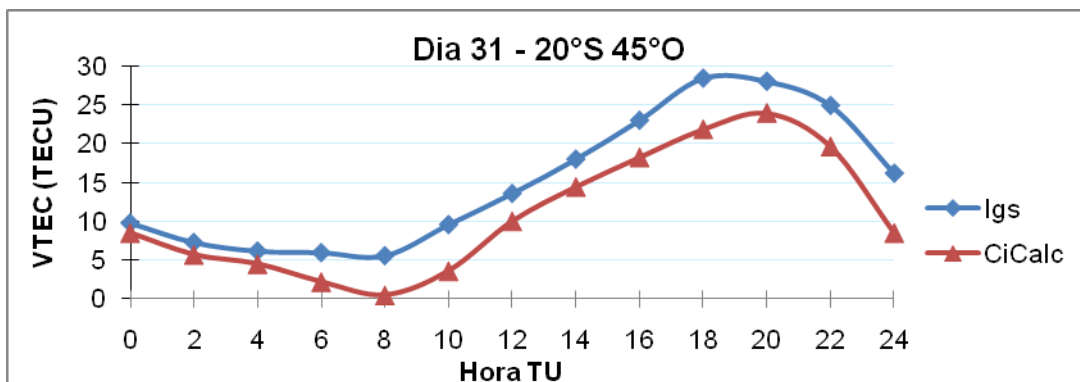


Figura 30 – Valores de VTEC, para 20°S 45°O, do IGS e CiCalc para o dia 31 (Verão)

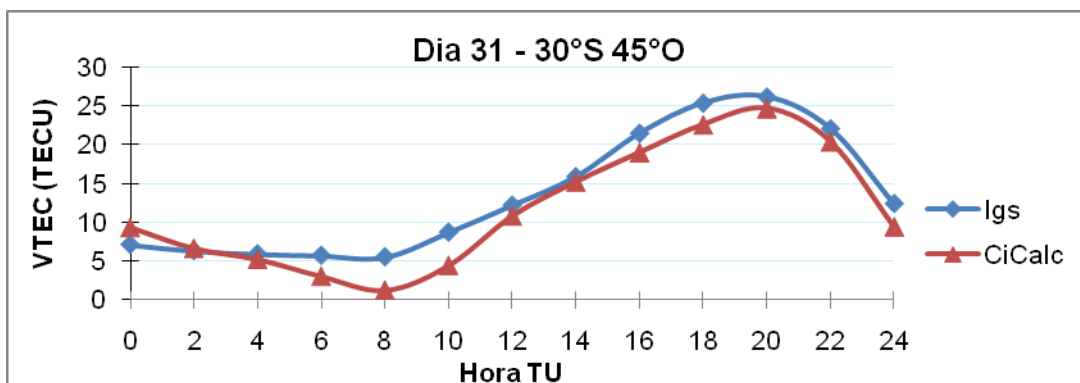


Figura 31 – Valores de VTEC, para 30°S 45°O, do IGS e CiCalc para o dia 31 (Verão)

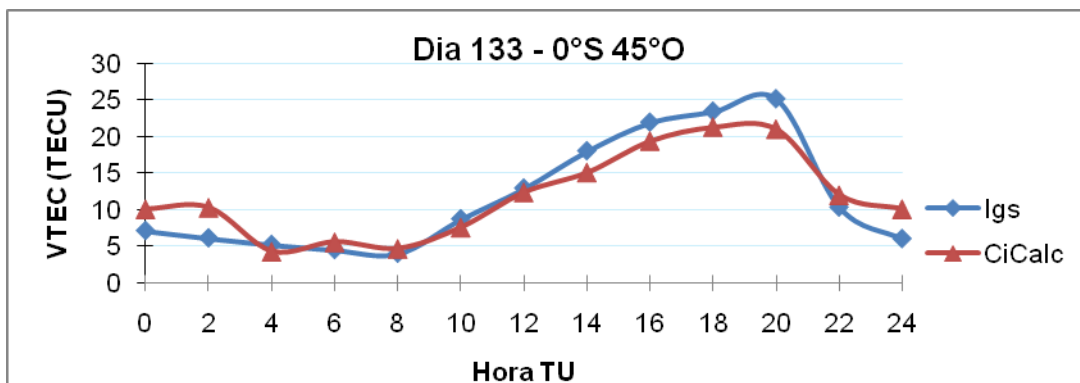


Figura 32 – Valores de VTEC, para 0°S 45°O, do IGS e do CiCalc para o dia 133 (Outono)

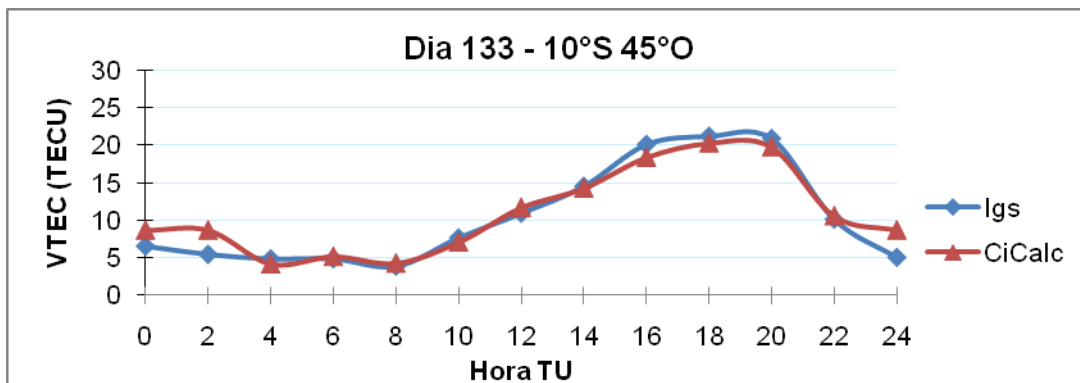


Figura 33 – Valores de VTEC, para 10°S 45°O, do IGS e do CiCalc para o dia 133 (Outono)

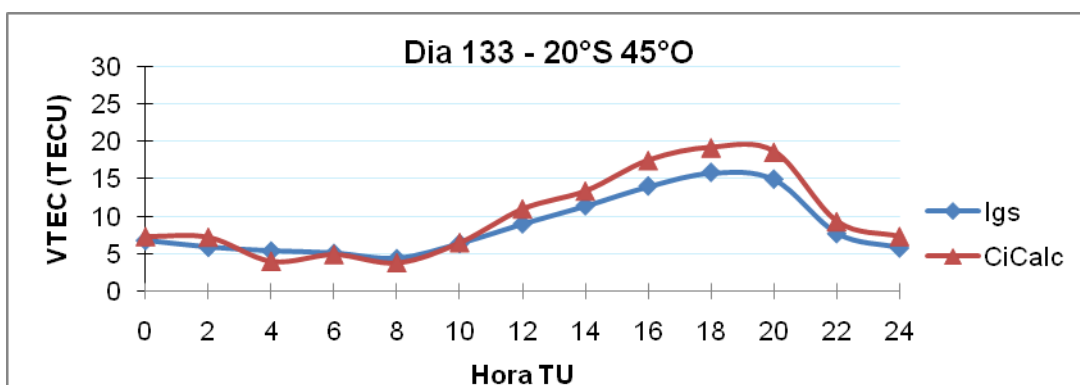


Figura 34 – Valores de VTEC, para 20°S 45°O, do IGS e do CiCalc para o dia 133 (Outono)

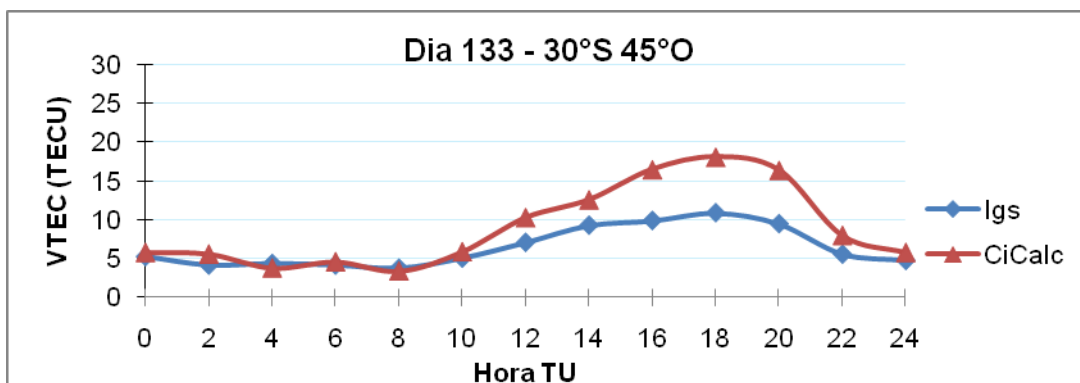


Figura 35 – Valores de VTEC, para 30°S 45°O, do IGS e do CiCalc para o dia 133 (Outono)

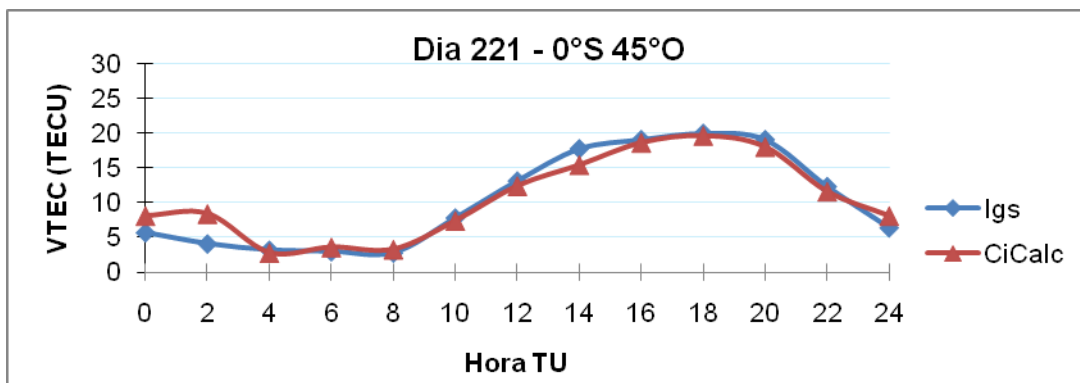


Figura 36 – Valores de VTEC, para 0°S 45°O, do IGS e do CiCalc para o dia 221 (Inverno)

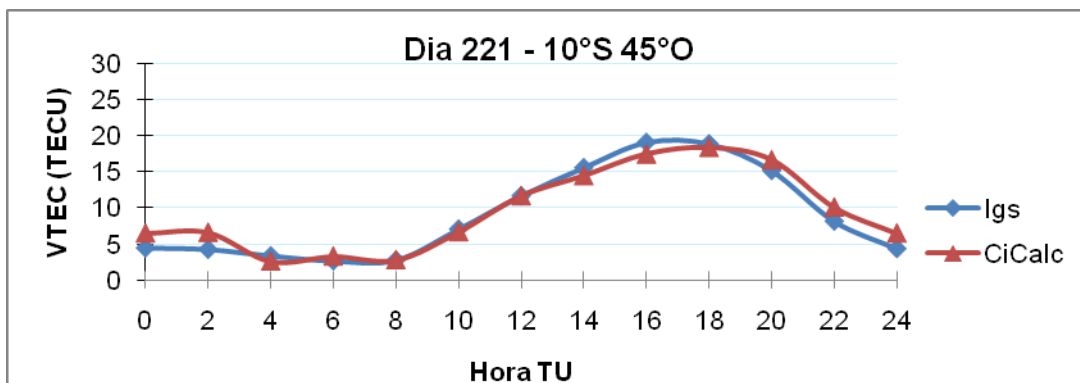


Figura 37 – Valores de VTEC, para 10°S 45°O, do IGS e do CiCalc para o dia 221 (Inverno)

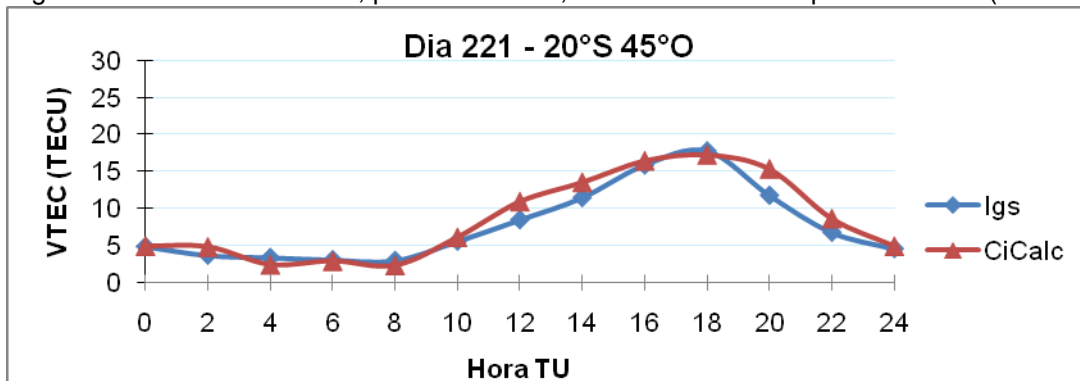


Figura 38 – Valores de VTEC, para 20°S 45°O, do IGS e do CiCalc para o dia 221 (Inverno)

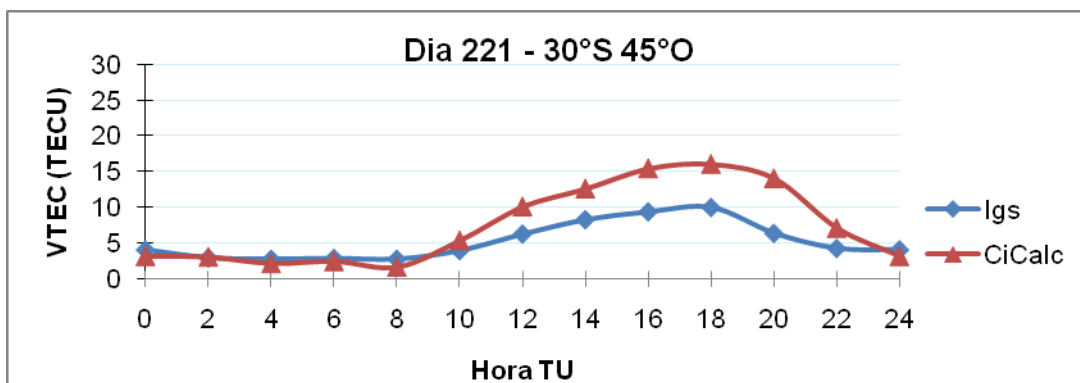


Figura 39 – Valores de VTEC, para 30°S 45°O, do IGS e do CiCalc para o dia 221 (Inverno)

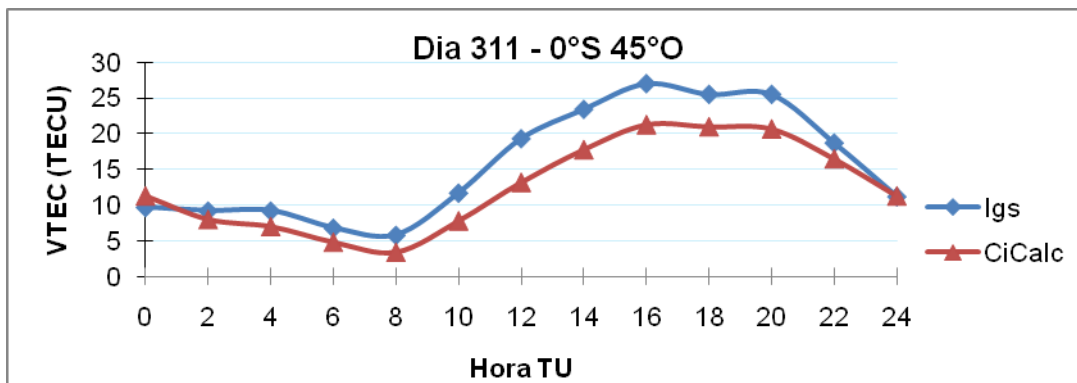


Figura 40 – Valores de VTEC, para 0°S 45°O, do IGS e do CiCalc para o dia 311 (Primavera)

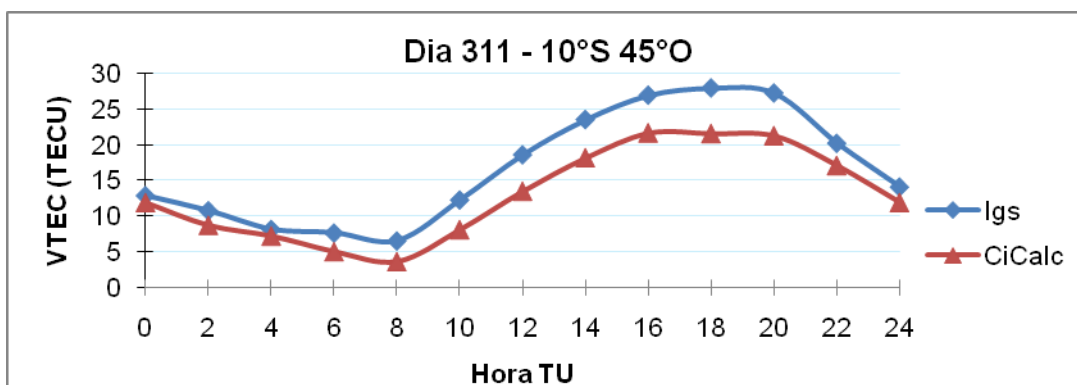


Figura 41 – Valores de VTEC, para 10°S 45°O, do IGS e do CiCalc para o dia 311 (Primavera)

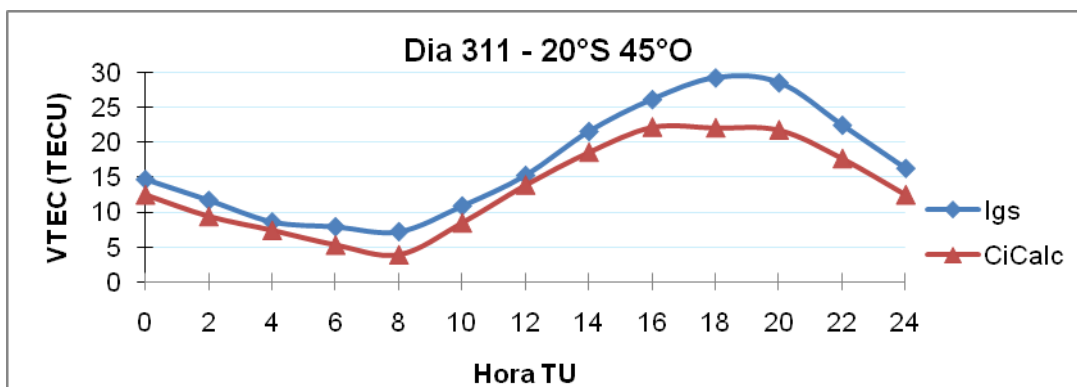


Figura 42 – Valores de VTEC, para 20°S 45°O, do IGS e do CiCalc para o dia 311 (Primavera)

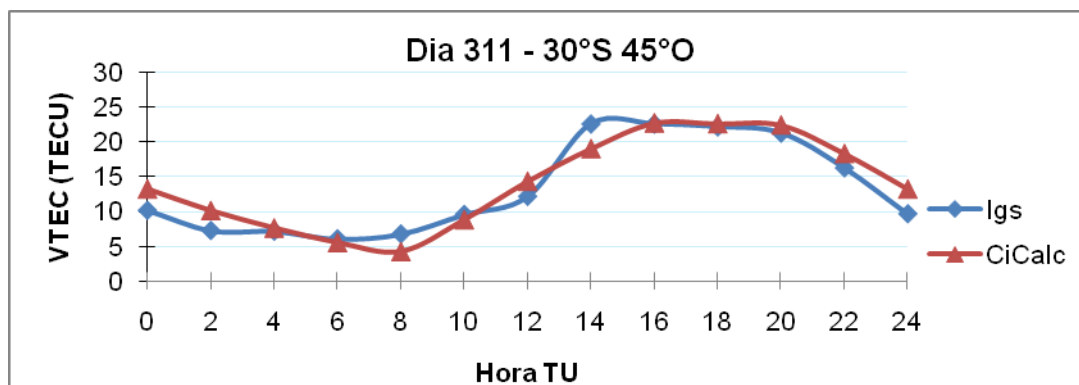


Figura 43 – Valores de VTEC, para 30°S 45°O, do IGS e do CiCalc para o dia 311 (Primavera)

Observa-se que, para os quatro dias em análise, os valores de VTEC, obtidos pelos dois métodos tiveram comportamentos similares, com valores bem próximos e sem grandes discrepâncias. Percebe-se que para o dia 31, que representa o verão, e para o dia 311, que representa a primavera, os valores obtidos com o CiCalc tenderam a serem menores que os obtidos por meio dos valores advindos dos mapas de VTEC do IGS. Já para o dia 133 e o dia 221, que representam o outono e o inverno, respectivamente, tenderam a ter valores maiores obtidos com o CiCalc, em relação aos obtidos nos mapas de VTEC do IGS.

## 6 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Diante dos resultados apresentados e das análises realizadas a partir deste trabalho, apresenta-se as principais conclusões e recomendações

As principais conclusões deste trabalho são:

1. Os coeficientes estimados, para a série de Fourier, apresentaram valores diários diferentes, de forma mais significativa nos coeficientes  $a_1$ ,  $a_2$  e  $a_3$ , o que evidencia o comportamento sazonal da ionosfera. Os maiores valores foram encontrados nos equinócios e os menores nos solstícios.
2. O Posicionamento por Ponto Preciso indicou que a série de Fourier utilizada para modelar o efeito sistemático da ionosfera é apropriada para este fim, pois proporcionou discrepâncias médias menores que 0,60 metros para as coordenadas cartesianas X, Y e Z, estimadas em sessões de 24 horas. A componente resultante apresentou discrepância máxima de 1,49 metros e mínima de 0,18 metros, representando uma correção média da ordem de 65% em relação as discrepâncias obtidas nos processamentos sem nenhuma correção.
3. A maior influência do erro sistemático, devido à ionosfera, em coordenadas planas obtidas com GPS, concentra-se na altura geométrica. Nos processamentos realizados foram encontrados valores de discrepâncias máxima de 1,21 metros e mínima de -0,44 metros, representando uma correção média da ordem de 90% em relação as discrepâncias obtidas nos processamentos sem nenhuma correção.
4. Os valores de VTEC obtidos nos mapas do IGS e os calculados pelo CiCalc, foram comparados para quatro dias, de forma a representar as estações do ano, em quatro diferentes latitudes. Observou-se que os valores tiveram comportamentos similares, sem grandes discrepâncias em

todos os dias e latitudes comparadas.

As principais recomendações são:

1. A realização de novos experimentos, utilizando outras funções para modelar o efeito sistemático da ionosfera. Além disto, testar outros valores médios, para a altitude da camada ionosférica. Realizar experimentos com outros números de estações e para regiões menores, por exemplo o estado de Minas Gerais.
2. Estudo de outras metodologias para a determinação dos efeitos da ionosfera na propagação dos sinais GPS, como por exemplo o uso de redes neurais artificiais.
3. Como o modelo apresentou resultados promissores em Posicionamento por Ponto Preciso, sugere-se avaliar a sua eficiência em posicionamentos relativos.
4. Por fim, recomenda-se que novos experimentos sejam realizados durante o período de máxima atividade solar, uma vez que o ano de 2008 se encontra em um período de baixa atividade solar, de forma a verificar a eficiência do modelo neste período que deve ocorrer entre 2013 e 2014.

## 7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, A. J. **Efeitos de super tempestades geomagnéticas na camada F ionosférica sobre o setor brasileiro estudadas por GPS**. Dissertação de mestrado – Programa de Pós-Graduação em Física e Astronomia, Universidade do Vale do Paraíba. São Jose dos Campos. 2007.

AGUIAR, C. R., CAMARGO, P. O.; DAL POZ, W. R. **Determinação do Erro Sistemático na Pseudodistância devido à Ionosfera: Avaliação da performance do Mod\_Ion e do Modelo de Klobuchar**. In: III Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas, Curitiba, PR. 2003.

AGUIAR, C. R., CAMARGO, P. O.; DAL POZ, W. R. **Comportamento do TEC na região brasileira de baixa latitude usando observáveis GPS**. In: V Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas, Curitiba, PR. 2007.

AGUIAR, C. R.. **Modelo Regional da Ionosfera (Mod\_Ion): implementação em tempo real**. Dissertação de mestrado - Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente. 2005.

CAMARGO, P. O. **Modelo Regional da Ionosfera Para o Uso em Posicionamento com Receptores GPS de Uma Freqüência**. Universidade Federal do Paraná, Tese de Doutorado, Curitiba - PR, 1999.

CODE (Centre for Orbit Determination in Europe) – online – Disponível em: <[http://www.aiub.unibe.ch/content/research/gnss/code\\_research/index\\_eng.html](http://www.aiub.unibe.ch/content/research/gnss/code_research/index_eng.html)> Acesso em agosto de 2009.

DAPPER, F. **Utilização de redes neurais artificiais em estimativa do atraso ionosférico aplicado ao sistema de posicionamento global**. Monografia – curso de informática da Universidade do Vale do Rio dos Sinos. São Leopoldo. 2005.

ESA (European Space Agency) – online – Disponível em: <<http://nng.esoc.esa.de/gps/ionmon.html>>. Acesso em agosto de 2009.

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

GEMAEL, C. **Introdução ao Ajustamento de Observações: Aplicações Geodésicas**. Curitiba: Ed. UFPR, 1994.

HERNÁNDEZ-PAJARES, M.; JUAN, J. M.; SANZ, J.; ORUS, R.; GARCIA-RIGO, A.; FELTENS, J.; KOMJATHY, A.; SCHAER, S. C.; KRANKOWSKI, A. **The IGS VTEC maps: a reliable source of ionospheric information since 1998.** Journal of Geodesy, Vol. 83, N. 3-4, p. 263-275, 2009

HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; WASLE, E. **GNSS – Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo and more.** Springerwien NewYork, 2008.

IBGE. **Resolução nº 5 – Especificações e normas gerais para levantamentos GPS.** 1993. Disponível em: <[ftp://geofp.ibge.gov.br/documentos/geodesia/pdf/normas\\_gps.pdf](ftp://geofp.ibge.gov.br/documentos/geodesia/pdf/normas_gps.pdf)>. acesso em: 01 de fevereiro de 2010

IBGE. **Posicionamento por Ponto Preciso (PPP).** Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/ppp/default.shtm>>. acesso em: 01 de julho de 2009

International GPS Service Central Bureau – online – Disponível em: <<http://igsceb.jpl.nasa.gov/components/prods.html>>. Acesso em agosto de 2009.

JPL (Jet Propulsion Laboratory) – online – endereço eletrônico: Disponível em: <<http://iono.jpl.nasa.gov/>>. Acesso em agosto de 2009.

KLOBUCHAR, J. A. **Ionospheric Time-Delay Algorithm for Single-Frequency GPS Users.** IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 23, n.3, p.325-331, 1987.

KLOBUCHAR, J. A; KUNCHES, J. M. **Eye on the ionosphere: Correcting for ionospheric range delay on GPS – temporal decorrelation.** GPS solutions, Vol.4, n.2, p.78-92, 2000.

LEICK, A. **GPS Satellite surveying.** John Wiley & sons, INC. 2nd ed.,Orono, Maine, 1995.

LIU, Z.; SKONE, S.; GAO, Y.; KOMJATHY, A. **Ionospheric modeling using GPS data.** GPS Solutions, vol. 9, N. 1, p. 63-66, 2005.

MARQUES, H. A. **Influencia da ionosfera no posicionamento GPS: Estimativa dos resíduos no contexto de duplas diferenças e eliminação dos efeitos de 2º e 3º ordem.** Dissertação de mestrado - Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente. 2008.

MATSUOKA, M. T. **Avaliação de funções para modelagem do efeito da refração ionosférica na propagação dos sinais GPS**. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente. 2003.

MATSUOKA, M. T. **influência de Diferentes Condições da Ionosfera no Posicionamento por Ponto com GPS: Avaliação na região brasileira**. Tese de Doutorado - Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente. 2007.

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, Vol. 13, N. 2, p. 253-270, 2007.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo NAVSTAR - GPS: Descrição, Fundamentos e Aplicações**. São Paulo: Ed. da Unesp, 2000.

MONICO, J. F. G.. **Posicionamento pelo GNSS: Descrição, Fundamentos e Aplicações**. São Paulo: Ed. da Unesp, 2008.

ODIJK, D. **Ionosphere-free Phase Combinations for Modernized GPS**. Journal of Surveying Engineering, Vol. 129, n.4, p.165-173, 2003.

SEEBER, G. **Satellite Geodesy : Foundations, Methods and Applications**. Berlin-New York: Walter de Gruyter, 1993.

SILVA, L. H. S, CÂMARA, M. J. C. **Avaliação da acurácia das coordenadas pós- processadas com dados rinex obtidos por meio de um receptor GPS de Navegação**. Universidade Católica Dom Bosco. Campo Grande, 2005.

SILVA, A. S. **Geodésia espacial com ênfase em GPS**. Curso de Engenharia de Agrimensura. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2006.

UPC (Universitat Politècnica de Catalunya) – online – Disponível em: <<http://gage1.upc.es/>>. Acesso em agosto de 2009.

VERONEZ, M. R. **Proposta de um modelo regional da ionosfera para redução do efeito sistemático da ionosfera através do método seqüencial de ajustamento**. Tese de Doutorado em Engenharia Civil – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2004.

## **APÊNDICE A – MODELO DE KLOBUCHAR**

O modelo de Klobuchar, também conhecido com modelo *broadcast* permite calcular o atraso ionosférico, ou seja, a correção ionosférica entre o satélite e o receptor. Este modelo foi desenvolvido por Klobuchar (1987), sendo que os coeficientes do modelo matemático envolvidos são transmitidos com as mensagens de navegação.

Para utilizar este modelo há a necessidade de se conhecer: a latitude e a longitude geodésicas aproximadas do local de observação ( $\varphi$  e  $\lambda$ ), ângulo de elevação do satélite ( $el$ ) e azimute ( $Az$ ) de cada satélite em relação à antena do receptor e os coeficientes  $\alpha_n$  e  $\beta_n$  ( $n = 0, 1, 2, 3$ ) que são transmitidos no arquivo de navegação. As unidades angulares utilizadas nos cálculos são dadas em semicírculo (1 SC = 180 graus), enquanto a do tempo GPS, em segundos.

As etapas de cálculo são baseadas em (KLOBUCHAR, 1987), conforme descritas a seguir:

**a) Cálculo da grandeza ( $\psi$ )**

$$\psi = \frac{0,0137}{el + 0,11} - 0,022, \quad (A.1)$$

onde  $\psi$  corresponde ao ângulo formado entre os vetores satélite/ponto de observação e satélite/centro de massa da Terra.

**b) Cálculo da latitude do ponto ionosférico ( $\varphi^*$ )**

$$\varphi^* = \begin{cases} \varphi + \psi \cos Az & , \text{ se } |\varphi^*| \leq 0,416; \\ 0,416 & , \text{ se } \varphi^* > 0,416; \\ -0,416 & , \text{ se } \varphi^* < -0,416. \end{cases} \quad (A.2)$$

O ponto ionosférico corresponde ao ponto formado pela interseção do vetor satélite/antena receptora e a camada ionosférica de altitude média igual a  $H_m$ . No modelo de Klobuchar adota-se  $H_m$  igual a 350 km.

**c) Cálculo da longitude do ponto ionosférico ( $\lambda^*$ )**

$$\lambda^* = \lambda + \frac{\psi \operatorname{sen} Az}{\cos \varphi}. \quad (\text{A.3})$$

**d) Cálculo da latitude geomagnética do ponto ionosférico ( $\varphi_m$ )**

$$\varphi_m = \varphi^* + 0,064 \cos(\lambda^* - 1,617). \quad (\text{A.4})$$

**e) Cálculo da hora local no ponto ionosférico (t)**

$$t = \begin{cases} 4,32 \times 10^4 \lambda^* + T_{\text{GPS}} & , \text{se } 0 \leq t \leq 86400; \\ 4,32 \times 10^4 \lambda^* + T_{\text{GPS}} - 86400 & , \text{se } t \geq 86400; \\ 4,32 \times 10^4 \lambda^* + T_{\text{GPS}} + 86400 & , \text{se } t < 0, \end{cases} \quad (\text{A.5})$$

onde  $T_{\text{GPS}}$  corresponde ao tempo GPS da época de observação.

**f) Cálculo do fator de obliquidade (F)**

$$F = 1 + 16 \times (0,53 - eI)^3. \quad (\text{A.6})$$

**g) Cálculo da correção ionosférica ( $I_{1r}^s$ )**

$$I_{1r}^s = F \times \left[ 5 \times 10^{-9} + \left( \sum_{n=0}^3 \alpha_n \varphi_m^n \right) \times \left( 1 - \frac{x^2}{2} + \frac{x^4}{24} \right) \right], \quad (\text{A.7})$$

onde

$$x = \frac{2\pi(t - 50400)}{\sum_{n=0}^3 \beta_n \varphi_m^n}. \quad (\text{A.8})$$

Vale ressaltar que o modelo de Klobuchar compensa em torno de 50% a 60% do efeito da ionosfera e, portanto, é inadequado para modelar flutuações diárias da ionosfera e outras anomalias.

## **APÊNDICE B – MATRIZES DO AJUSTAMENTO**

A partir do modelo apresentado na equação (4.1), pode-se estruturar as principais matrizes utilizadas no processo de ajustamento de observações, que são: a Matriz dos coeficientes “A”, o Vetor L e a Matriz Variância Covariância das observações (MVC). Para cada um dos receptores R e satélites S envolvidos no processo, para uma única época, tem-se a matriz A:

$$A = \begin{matrix} & a_1 & a_2 & a_3 & a_4 & \dots & a_{15} & R_1 & R_2 \dots & R_n & S_1 & S_2 \dots & S_n \\ \begin{matrix} (R_1, S_1) \\ \dots \\ (R_1, S_n) \\ (R_2, S_1) \\ \dots \\ (R_2, S_n) \\ (R_n, S_1) \\ \dots \\ (R_n, S_n) \end{matrix} & \left( \begin{array}{cccccccccccccccc} SF & SFB^S & SF\cosh^S & SF\sinh^S & \dots & SFB^{Sh^S} & 1 & 0 & \dots & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ SF & SFB^S & SF\cosh^S & SF\sinh^S & \dots & SFB^{Sh^S} & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ SF & SFB^S & SF\cosh^S & SF\sinh^S & \dots & SFB^{Sh^S} & 0 & 1 & \dots & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 & 1 & \dots & 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ SF & SFB^S & SF\cosh^S & SF\sinh^S & \dots & SFB^{Sh^S} & 0 & 1 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ SF & SFB^S & SF\cosh^S & SF\sinh^S & \dots & SFB^{Sh^S} & 0 & 0 & \dots & 1 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & SF & SFB^S & SF\cosh^S & SF\sinh^S & \dots & SFB^{Sh^S} & 0 & 0 & \dots & 1 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ SF & SFB^S & SF\cosh^S & SF\sinh^S & \dots & SFB^{Sh^S} & 0 & 0 & \dots & 1 & 0 & 0 & \dots & 1 \end{array} \right), \end{matrix} \quad (B.1)$$

sendo que as grandezas S e F presentes na matriz A, correspondem a:

$$S = \frac{1}{\cos(z^S)}; \quad (B.2)$$

$$F = \frac{f_1^2 - f_2^2}{f_2^2}. \quad (B.3)$$

O vetor L, para cada um dos receptores R e satélites S para uma única época tem a seguinte forma:

$$L = \begin{pmatrix} (P_2^{S_1} - P_1^{S_1})_{R_1} \\ \dots \\ (P_2^{S_n} - P_1^{S_n})_{R_1} \\ (P_2^{S_1} - P_1^{S_1})_{R_2} \\ \dots \\ (P_2^{S_n} - P_1^{S_n})_{R_2} \\ (P_2^{S_1} - P_1^{S_1})_{R_n} \\ \dots \\ (P_2^{S_n} - P_1^{S_n})_{R_n} \end{pmatrix} \cdot \quad (B.4)$$

Ao considerar que a combinação linear das observações seja independente, a MVC das observações será diagonal. Segundo CAMARGO (1999), os desvios padrão para as pseudodistâncias em L1 e L2 são da ordem de 1 metro e 1,5 metros, respectivamente. E que ao se propagar os erros para estes valores, encontra-se como elemento da diagonal da MVC das observações, o valor de  $3,25m^2$ .

Ao analisar a matriz A representada pela equação (B.1), percebe-se que a matriz  $N = (A^T P A)$ , não possui inversa, ou seja, é uma matriz singular. Isto impossibilita a estimativa dos parâmetros sem uma estratégia para tornar a Matriz N não singular, uma vez que é necessária a inversão de N. Para solucionar este problema, existem algumas possibilidades, entre as quais, cita-se a aplicação de injunções, onde haveria a necessidade de se conhecer os erros sistemáticos de um dos satélites ou de um dos receptores da RBMC, utilizados na modelagem.

Outra solução poderia ser a aplicação de inversas generalizadas, também conhecidas com pseudo-inversas. Neste trabalho, optou-se pela simplificação do modelo matemático, pois não é objetivo do trabalho determinar isoladamente o conjunto de erros dos receptores e satélites, ou seja, ao invés de considerar os erros separadamente como foi apresentado na equação (4.1), estes foram agrupados como apresenta a equação (B.5):

$$P_{2r}^s - P_{1r}^s = \left( a_1 + a_2 B^s + \sum_{\substack{i=1 \\ j=2i+1}}^n \left\{ a_j \cos(ih^s) + a_{j+1} \sin(ih^s) \right\} + a_{n*2+3} B^{sh^s} \right) * \left( \frac{F}{\cos(z^s)} \right) + \left[ (SP_2^s - SP_1^s) + (RP_2 - RP_1) \right]. \quad (B.5)$$

Ao utilizar este procedimento resolve-se o problema de singularidade da matriz N, e a matriz A do ajustamento de observações para cada um dos receptores R e satélites S envolvidos no processo, para uma única época, fica da seguinte forma:

$$A = \begin{matrix} & a_1 & a_2 & a_3 & a_4 & \dots & a_{15} & S_1 & S_2 & \dots & S_n \\ \begin{matrix} (R_1, S_1) \\ \dots \\ (R_1, S_n) \\ (R_2, S_1) \\ \dots \\ (R_2, S_n) \\ (R_n, S_1) \\ \dots \\ (R_n, S_n) \end{matrix} & \begin{pmatrix} SF & SFB^s & SF\cosh^s & SF\sinh^s & \dots & SFB^{sh^s} & 1 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 & 1 & \dots & 0 \\ SF & SFB^s & SF\cosh^s & SF\sinh^s & \dots & SFB^{sh^s} & 0 & 0 & \dots & 1 \\ SF & SFB^s & SF\cosh^s & SF\sinh^s & \dots & SFB^{sh^s} & 1 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 & 1 & \dots & 0 \\ SF & SFB^s & SF\cosh^s & SF\sinh^s & \dots & SFB^{sh^s} & 0 & 0 & \dots & 1 \\ SF & SFB^s & SF\cosh^s & SF\sinh^s & \dots & SFB^{sh^s} & 1 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & SF & SFB^s & SF\cosh^s & SF\sinh^s & \dots & SFB^{sh^s} & 0 & 1 & \dots & 0 \\ SF & SFB^s & SF\cosh^s & SF\sinh^s & \dots & SFB^{sh^s} & 0 & 0 & \dots & 1 \end{pmatrix} \end{matrix}. \quad (B.6)$$

## **APÊNDICE C – COEFICIENTES ESTIMADOS PARA O MODELO**

Tabela 19: Coeficientes estimados para os dias em estudo no período do Verão

<b>Verão (356 - 79)</b>										
<b>Coeficiente</b>	<b>Dias</b>									
	<b>357</b>	<b>366</b>	<b>2</b>	<b>10</b>	<b>22</b>	<b>31</b>	<b>41</b>	<b>50</b>	<b>61</b>	<b>70</b>
<b>a1</b>	1,650	1,673	1,420	1,805	1,499	1,522	1,856	1,776	2,197	2,430
<b>a2</b>	0,890	0,691	0,775	0,526	0,737	0,764	0,646	0,545	-0,393	0,031
<b>a3</b>	1,357	1,628	1,446	1,384	1,174	1,600	1,995	2,044	1,907	2,275
<b>a4</b>	0,201	0,298	0,382	0,176	0,281	0,689	0,272	0,403	0,469	0,365
<b>a5</b>	0,117	0,234	0,195	0,272	0,060	0,124	0,377	0,337	0,299	0,649
<b>a6</b>	-0,083	-0,011	0,099	-0,276	-0,060	0,198	0,103	0,127	-0,121	-0,187
<b>a7</b>	-0,047	-0,073	-0,125	0,014	-0,069	-0,315	-0,175	-0,106	-0,058	0,019
<b>a8</b>	0,131	0,128	0,130	0,215	0,099	0,117	0,149	0,180	0,231	0,243
<b>a9</b>	0,005	-0,047	0,032	-0,015	-0,012	-0,004	-0,071	0,041	-0,033	0,000
<b>a10</b>	0,016	-0,015	-0,062	0,009	0,061	-0,083	0,024	-0,030	0,046	-0,003
<b>a11</b>	-0,010	-0,080	0,049	-0,040	-0,062	0,073	-0,053	0,028	0,064	-0,009
<b>a12</b>	-0,048	-0,056	0,018	-0,081	-0,011	-0,025	-0,021	-0,042	-0,057	-0,004
<b>a13</b>	0,023	-0,020	-0,020	-0,003	-0,053	0,016	-0,072	0,008	0,009	-0,021
<b>a14</b>	0,011	-0,031	0,045	-0,011	0,009	0,024	0,038	0,015	0,039	0,001
<b>a15</b>	0,092	0,045	-0,079	-0,057	-0,126	0,020	0,072	-0,093	-0,093	0,168

Tabela 20: Coeficientes estimados para os dias em estudo no período do Outono

<b>Outono (79 - 172)</b>										
<b>Coeficiente</b>	<b>Dias</b>									
	<b>80</b>	<b>90</b>	<b>102</b>	<b>111</b>	<b>118</b>	<b>133</b>	<b>141</b>	<b>151</b>	<b>161</b>	<b>171</b>
<b>a1</b>	2,261	2,710	2,001	2,186	2,308	1,486	1,589	1,467	1,128	1,377
<b>a2</b>	-0,216	-0,331	-0,539	-1,245	-1,847	-0,937	-0,984	-1,131	-0,879	-1,034
<b>a3</b>	2,061	2,229	1,893	1,961	1,756	1,127	1,238	1,233	1,078	1,235
<b>a4</b>	0,131	0,538	0,134	0,085	0,125	0,064	-0,152	-0,128	-0,175	-0,116
<b>a5</b>	0,483	0,555	0,572	0,553	0,303	0,311	0,340	0,218	0,405	0,246
<b>a6</b>	-0,161	-0,288	-0,126	-0,160	-0,144	0,077	-0,146	-0,100	-0,139	-0,023
<b>a7</b>	-0,010	0,090	0,003	-0,041	-0,066	-0,030	0,028	-0,082	0,158	-0,098
<b>a8</b>	0,140	0,285	0,213	0,278	0,214	0,193	0,049	0,060	0,106	0,098
<b>a9</b>	0,040	-0,062	-0,074	-0,108	-0,094	-0,064	0,052	-0,017	0,053	-0,018
<b>a10</b>	-0,050	0,003	0,064	0,124	0,122	0,105	-0,013	-0,011	0,031	-0,002
<b>a11</b>	0,035	0,038	-0,047	-0,068	-0,016	-0,049	-0,050	-0,045	-0,019	-0,003
<b>a12</b>	-0,038	-0,054	0,026	-0,044	-0,078	-0,127	-0,091	-0,074	-0,030	-0,031
<b>a13</b>	-0,045	0,009	0,010	0,027	0,021	-0,032	-0,048	-0,017	0,001	0,023
<b>a14</b>	0,005	0,074	0,050	0,004	-0,027	-0,033	-0,008	0,018	0,018	0,019
<b>a15</b>	-0,019	-0,058	-0,053	-0,258	-0,397	-0,221	-0,131	-0,098	-0,163	-0,175

Tabela 21: Coeficientes estimados para os dias em estudo no período do Inverno

Inverno (172 - 266)									
Coeficiente	Dias								
	181	191	201	211	221	231	240	251	261
a1	1,226	1,117	1,131	1,165	1,228	1,481	1,250	1,648	1,554
a2	-1,022	-0,635	-0,718	-0,731	-1,061	-0,966	-0,688	-1,000	-0,463
a3	0,930	0,847	1,026	1,015	1,167	1,452	1,142	1,517	1,214
a4	-0,092	0,028	0,076	0,093	-0,096	0,076	0,024	0,170	0,106
a5	0,161	0,230	0,230	0,161	0,246	0,243	0,190	0,232	0,204
a6	-0,075	0,017	0,096	0,104	0,009	0,094	0,042	0,135	-0,017
a7	-0,106	-0,024	-0,084	-0,143	-0,074	-0,185	-0,085	-0,126	-0,033
a8	0,063	0,103	0,098	0,111	0,156	0,168	0,088	0,124	0,080
a9	-0,036	-0,033	-0,042	-0,035	-0,009	-0,061	-0,015	-0,018	-0,005
a10	0,038	0,009	0,011	0,006	0,039	0,004	-0,007	-0,058	-0,044
a11	-0,024	0,008	0,004	0,010	-0,009	-0,027	-0,059	-0,030	-0,005
a12	0,000	-0,044	-0,040	-0,068	-0,077	-0,078	-0,032	-0,046	-0,006
a13	0,001	0,001	-0,028	0,010	0,031	0,026	-0,018	-0,027	-0,031
a14	-0,015	-0,019	0,006	0,031	0,000	-0,011	-0,014	0,004	0,059
a15	-0,148	-0,041	-0,095	-0,129	-0,247	-0,194	-0,180	-0,326	-0,103

Tabela 22: Coeficientes estimados para os dias em estudo no período da Primavera

Primavera (266 - 356)									
Coeficiente	Dias								
	271	281	291	301	311	321	331	341	351
a1	1,626	2,028	2,235	2,051	2,060	2,357	2,075	2,193	1,648
a2	-0,075	-0,532	-0,243	-0,194	0,449	0,194	1,296	1,289	1,053
a3	1,309	1,652	1,726	1,548	1,390	1,822	1,235	1,490	1,359
a4	0,006	0,342	0,112	0,423	0,335	0,256	0,337	0,513	0,259
a5	0,229	0,384	0,548	0,300	0,128	0,022	0,132	0,039	0,232
a6	-0,316	0,112	-0,430	-0,141	-0,082	-0,103	-0,141	0,109	-0,012
a7	0,006	-0,138	0,029	-0,077	-0,139	-0,170	-0,040	-0,169	-0,023
a8	-0,017	0,264	0,118	0,133	0,054	0,158	0,081	0,189	0,241
a9	0,014	-0,071	-0,031	-0,037	0,043	0,066	0,054	-0,015	-0,069
a10	-0,065	0,010	0,035	-0,082	-0,056	-0,062	-0,069	-0,094	0,072
a11	0,045	-0,033	-0,060	0,012	-0,028	0,000	-0,002	0,019	-0,064
a12	-0,023	-0,095	-0,089	-0,019	-0,044	-0,055	-0,048	-0,108	-0,034
a13	0,028	0,060	0,041	-0,014	-0,005	-0,029	-0,009	0,019	0,005
a14	0,067	-0,050	-0,030	0,029	-0,012	0,021	0,037	0,007	0,000
a15	0,023	-0,116	-0,007	-0,089	0,078	-0,066	0,095	0,376	0,302

**APÊNDICE D – COMPARATIVO ENTRE AS  
COORDENADAS OFICIAIS E AS ENCONTRADAS NO  
PROCESSAMENTO UTILIZANDO O PPP-IBGE -  
TABELAS COM VALORES DIÁRIOS**

Tabela 23: Discrepâncias no eixo X para os dias em estudo

<b>Dx (m)</b>					
<b>Estação</b>	<b>Dia</b>	<b>L1 com correção</b>	<b>L1 sem correção</b>	<b>L1 e L2</b>	<b>lonex</b>
<b>Verão</b>	<b>357</b>	0,283	1,211	0,009	-0,448
	<b>366</b>	0,440	1,262	0,005	-0,041
	<b>2</b>	1,082	1,519	-0,004	-0,336
	<b>10</b>	0,739	1,652	0,002	-0,127
	<b>22</b>	0,392	0,861	0,000	0,349
	<b>31</b>	0,280	1,057	-0,007	-0,103
	<b>41</b>	0,108	1,111	-0,009	-0,277
	<b>50</b>	0,232	0,826	-0,009	0,160
	<b>61</b>	0,005	1,188	0,001	-0,227
	<b>70</b>	0,256	1,615	-0,006	-0,356
<b>Outono</b>	<b>80</b>	0,099	1,812	0,005	-0,585
	<b>90</b>	0,223	1,868	-0,002	-0,162
	<b>102</b>	0,031	1,717	-0,007	-0,187
	<b>111</b>	0,428	1,667	-0,002	-0,332
	<b>118</b>	0,138	1,346	0,004	-0,110
	<b>133</b>	0,046	0,828	-0,002	-0,385
	<b>141</b>	-0,113	1,240	-0,008	-0,424
	<b>151</b>	-0,204	1,002	0,001	-0,333
	<b>161</b>	0,181	1,069	-0,014	-0,265
	<b>171</b>	-0,092	1,196	0,000	-0,337
<b>Inverno</b>	<b>181</b>	0,108	1,073	0,000	-0,407
	<b>191</b>	0,141	1,144	-0,004	-0,469
	<b>201</b>	0,131	0,992	0,002	-0,563
	<b>211</b>	-0,067	0,909	0,001	-0,554
	<b>221</b>	0,764	1,616	0,011	0,105
	<b>231</b>	0,691	1,815	0,001	-0,474
	<b>240</b>	-0,012	0,987	0,003	-0,474
	<b>251</b>	0,621	1,622	0,008	-0,163
	<b>261</b>	0,100	1,087	0,012	-0,569
	<b>Primavera</b>	<b>271</b>	0,826	2,008	0,004
<b>281</b>		0,689	1,878	0,007	0,179
<b>291</b>		1,063	2,563	0,021	0,175
<b>301</b>		0,408	1,612	0,011	-0,162
<b>311</b>		0,173	1,344	0,004	-0,115
<b>321</b>		0,255	1,760	0,005	-0,314
<b>331</b>		0,114	1,523	0,011	-0,780
<b>341</b>		1,115	2,573	0,005	0,145
<b>351</b>		0,463	1,685	0,005	-0,201

Tabela 24: Discrepâncias no eixo Y para os dias em estudo

<b>Dy (m)</b>					
<b>Estação</b>	<b>Dia</b>	<b>L1 com correção</b>	<b>L1 sem correção</b>	<b>L1 e L2</b>	<b>lonex</b>
<b>Verão</b>	<b>357</b>	0,125	-0,706	-0,041	0,430
	<b>366</b>	0,170	-0,777	-0,041	0,250
	<b>2</b>	-0,324	-0,677	-0,038	0,596
	<b>10</b>	-0,061	-0,896	-0,032	0,243
	<b>22</b>	0,263	-0,249	-0,034	-0,081
	<b>31</b>	0,077	-0,606	-0,034	0,259
	<b>41</b>	0,216	-0,654	-0,022	0,349
	<b>50</b>	0,395	-0,206	-0,030	0,318
	<b>61</b>	0,359	-0,782	-0,035	0,213
	<b>70</b>	0,314	-0,850	-0,029	0,322
<b>Outono</b>	<b>80</b>	0,447	-1,117	-0,036	0,375
	<b>90</b>	0,580	-1,144	-0,027	0,232
	<b>102</b>	0,851	-0,585	-0,038	0,226
	<b>111</b>	0,070	-0,944	-0,027	0,208
	<b>118</b>	0,353	-0,925	-0,034	0,326
	<b>133</b>	0,240	-0,444	-0,038	0,389
	<b>141</b>	0,410	-0,766	-0,029	0,420
	<b>151</b>	0,361	-0,773	-0,031	0,272
	<b>161</b>	0,068	-0,729	-0,022	0,308
	<b>171</b>	0,503	-0,657	-0,031	0,388
<b>Inverno</b>	<b>181</b>	0,595	-0,254	-0,031	0,421
	<b>191</b>	0,437	-0,513	-0,031	0,496
	<b>201</b>	0,671	-0,300	-0,040	0,482
	<b>211</b>	0,591	-0,322	-0,038	0,559
	<b>221</b>	0,206	-0,745	-0,048	0,144
	<b>231</b>	-0,257	-1,194	-0,042	0,378
	<b>240</b>	0,313	-0,563	-0,038	0,466
	<b>251</b>	-0,116	-0,872	-0,035	0,283
	<b>261</b>	0,137	-0,699	-0,037	0,350
<b>Primavera</b>	<b>271</b>	-0,098	-1,041	-0,035	0,467
	<b>281</b>	-0,101	-1,049	-0,039	-0,069
	<b>291</b>	-0,368	-1,666	-0,044	-0,159
	<b>301</b>	0,123	-1,004	-0,043	0,290
	<b>311</b>	0,254	-0,790	-0,040	0,149
	<b>321</b>	0,224	-1,128	-0,037	0,291
	<b>331</b>	0,008	-1,184	-0,032	0,592
	<b>341</b>	0,004	-1,482	-0,033	0,309
	<b>351</b>	0,266	-0,991	-0,037	0,425

Tabela 25: Discrepâncias no eixo Z para os dias em estudo

<b>Dz (m)</b>					
<b>Estação</b>	<b>Dia</b>	<b>L1 com correção</b>	<b>L1 sem correção</b>	<b>L1 e L2</b>	<b>lonex</b>
<b>Verão</b>	<b>357</b>	-0,510	-0,780	0,105	-0,069
	<b>366</b>	-0,895	-1,449	0,107	-0,067
	<b>2</b>	-0,756	-0,981	0,095	-0,036
	<b>10</b>	-0,535	-0,952	0,097	-0,336
	<b>22</b>	-0,398	-0,742	0,091	-0,421
	<b>31</b>	-0,217	-0,603	0,089	-0,188
	<b>41</b>	0,009	-0,388	0,100	0,118
	<b>50</b>	-0,352	-0,597	0,099	-0,415
	<b>61</b>	0,090	-0,635	0,094	0,116
	<b>70</b>	-0,238	-0,953	0,096	0,406
<b>Outono</b>	<b>80</b>	0,059	-0,893	0,098	0,345
	<b>90</b>	-0,730	-1,758	0,096	0,071
	<b>102</b>	-0,236	-1,168	0,095	0,202
	<b>111</b>	-0,620	-1,303	0,100	0,143
	<b>118</b>	-0,331	-1,324	0,088	-0,049
	<b>133</b>	-0,012	-0,424	0,092	0,303
	<b>141</b>	0,132	-0,572	0,092	0,317
	<b>151</b>	0,167	-0,600	0,095	0,221
	<b>161</b>	-0,029	-0,585	0,098	0,216
	<b>171</b>	0,102	-0,606	0,092	0,267
<b>Inverno</b>	<b>181</b>	0,020	-0,535	0,089	0,251
	<b>191</b>	-0,076	-0,617	0,090	0,303
	<b>201</b>	0,152	-0,394	0,090	0,393
	<b>211</b>	-0,051	-0,696	0,093	0,354
	<b>221</b>	-0,386	-0,971	0,094	-0,011
	<b>231</b>	-0,242	-0,736	0,095	0,253
	<b>240</b>	-0,019	-0,393	0,092	0,352
	<b>251</b>	-0,361	-0,859	0,098	0,044
	<b>261</b>	0,071	-0,463	0,091	0,290
<b>Primavera</b>	<b>271</b>	-0,339	-0,902	0,090	0,266
	<b>281</b>	-0,610	-1,075	0,098	-0,216
	<b>291</b>	-0,975	-1,649	0,095	-0,209
	<b>301</b>	-0,471	-1,026	0,099	-0,182
	<b>311</b>	-0,567	-1,138	0,098	-0,279
	<b>321</b>	-0,319	-0,997	0,099	-0,097
	<b>331</b>	-0,569	-1,056	0,099	0,069
	<b>341</b>	-0,852	-1,595	0,099	-0,281
	<b>351</b>	-0,690	-1,289	0,097	-0,068

Tabela 26: Discrepâncias na altura geométrica para os dias em estudo

<b>Dh (m)</b>					
<b>Estação</b>	<b>Dia</b>	<b>L1 com correção</b>	<b>L1 sem correção</b>	<b>L1 e L2</b>	<b>Ionex</b>
<b>Verão</b>	<b>357</b>	0,291	1,552	-0,009	-0,560
	<b>366</b>	0,506	1,868	-0,013	-0,168
	<b>2</b>	1,212	1,815	-0,017	-0,601
	<b>10</b>	0,731	2,035	-0,017	-0,127
	<b>22</b>	0,238	1,007	-0,015	0,436
	<b>31</b>	0,215	1,319	-0,019	-0,173
	<b>41</b>	-0,071	1,311	-0,032	-0,457
	<b>50</b>	0,028	0,905	-0,027	0,050
	<b>61</b>	-0,262	1,533	-0,014	-0,336
	<b>70</b>	0,056	1,981	-0,024	-0,597
<b>Outono</b>	<b>80</b>	-0,241	2,264	-0,013	-0,766
	<b>90</b>	0,039	2,627	-0,023	-0,288
	<b>102</b>	-0,440	1,958	-0,019	-0,347
	<b>111</b>	0,464	2,200	-0,024	-0,415
	<b>118</b>	-0,017	1,976	-0,012	-0,270
	<b>133</b>	-0,121	0,995	-0,014	-0,623
	<b>141</b>	-0,389	1,536	-0,023	-0,675
	<b>151</b>	-0,433	1,387	-0,017	-0,484
	<b>161</b>	0,087	1,399	-0,035	-0,459
	<b>171</b>	-0,424	1,448	-0,017	-0,577
<b>Inverno</b>	<b>181</b>	-0,316	1,083	-0,016	-0,640
	<b>191</b>	-0,159	1,325	-0,020	-0,749
	<b>201</b>	-0,396	1,007	-0,009	-0,836
	<b>211</b>	-0,408	1,070	-0,012	-0,866
	<b>221</b>	0,525	1,921	0,000	-0,020
	<b>231</b>	0,718	2,261	-0,011	-0,659
	<b>240</b>	-0,205	1,170	-0,010	-0,750
	<b>251</b>	0,623	1,966	-0,011	-0,312
	<b>261</b>	-0,048	1,350	-0,005	-0,720
<b>Primavera</b>	<b>271</b>	0,744	2,354	-0,011	-0,654
	<b>281</b>	0,749	2,331	-0,010	0,239
	<b>291</b>	1,304	3,397	0,005	0,291
	<b>301</b>	0,364	2,103	-0,005	-0,235
	<b>311</b>	0,154	1,823	-0,010	-0,079
	<b>321</b>	0,141	2,273	-0,012	-0,370
	<b>331</b>	0,271	2,167	-0,012	-0,940
	<b>341</b>	1,059	3,267	-0,015	-0,002
	<b>351</b>	0,389	2,238	-0,012	-0,389

Tabela 27: Discrepâncias na resultante para os dias em estudo

<b>Resultante (m)</b>					
<b>Estação</b>	<b>Dia</b>	<b>L1 com correção</b>	<b>L1 sem correção</b>	<b>L1 e L2</b>	<b>lonex</b>
<b>Verão</b>	<b>357</b>	0,597	1,605	0,113	0,624
	<b>366</b>	1,012	2,073	0,115	0,262
	<b>2</b>	1,359	1,931	0,102	0,685
	<b>10</b>	0,915	2,106	0,102	0,433
	<b>22</b>	0,618	1,164	0,097	0,553
	<b>31</b>	0,363	1,360	0,096	0,336
	<b>41</b>	0,242	1,347	0,103	0,460
	<b>50</b>	0,578	1,040	0,104	0,547
	<b>61</b>	0,371	1,558	0,100	0,332
	<b>70</b>	0,470	2,059	0,100	0,629
<b>Outono</b>	<b>80</b>	0,461	2,308	0,104	0,776
	<b>90</b>	0,959	2,809	0,100	0,291
	<b>102</b>	0,883	2,157	0,102	0,356
	<b>111</b>	0,757	2,317	0,104	0,417
	<b>118</b>	0,504	2,102	0,095	0,347
	<b>133</b>	0,244	1,030	0,099	0,626
	<b>141</b>	0,445	1,566	0,097	0,676
	<b>151</b>	0,447	1,401	0,100	0,483
	<b>161</b>	0,196	1,420	0,102	0,460
	<b>171</b>	0,522	1,493	0,097	0,579
<b>Inverno</b>	<b>181</b>	0,605	1,226	0,094	0,637
	<b>191</b>	0,465	1,397	0,095	0,747
	<b>201</b>	0,700	1,109	0,099	0,839
	<b>211</b>	0,597	1,189	0,101	0,864
	<b>221</b>	0,880	2,027	0,106	0,178
	<b>231</b>	0,776	2,294	0,104	0,657
	<b>240</b>	0,314	1,203	0,099	0,752
	<b>251</b>	0,728	2,032	0,105	0,330
	<b>261</b>	0,184	1,373	0,098	0,728
	<b>271</b>	0,898	2,435	0,097	0,656
<b>Primavera</b>	<b>281</b>	0,926	2,405	0,106	0,289
	<b>291</b>	1,488	3,473	0,106	0,315
	<b>301</b>	0,635	2,159	0,109	0,378
	<b>311</b>	0,645	1,930	0,106	0,336
	<b>321</b>	0,466	2,316	0,106	0,439
	<b>331</b>	0,581	2,199	0,105	0,981
	<b>341</b>	1,403	3,370	0,105	0,443
	<b>351</b>	0,873	2,342	0,104	0,475

**APÊNDICE E – COMPARATIVO ENTRE AS  
COORDENADAS OFICIAIS E AS ENCONTRADAS NO  
PROCESSAMENTO UTILIZANDO O PPP-IBGE -  
GRÁFICOS DIÁRIOS**

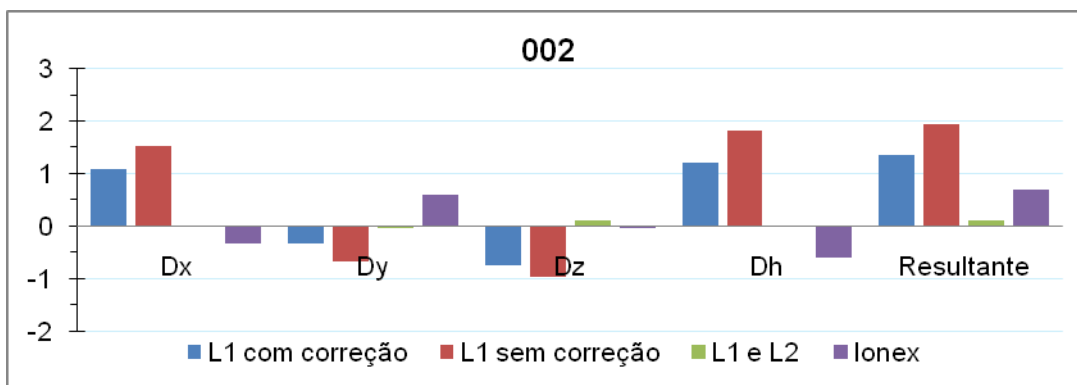


Figura 44: Valores das discrepâncias para o dia 002

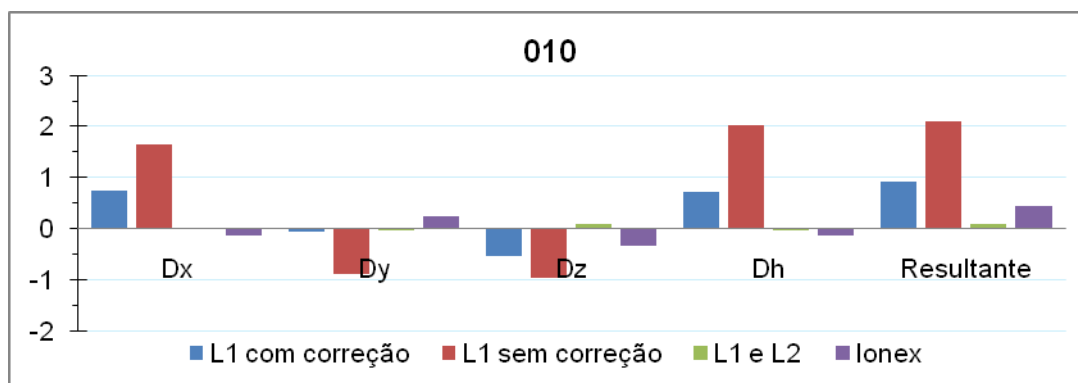


Figura 45: Valores das discrepâncias para o dia 010

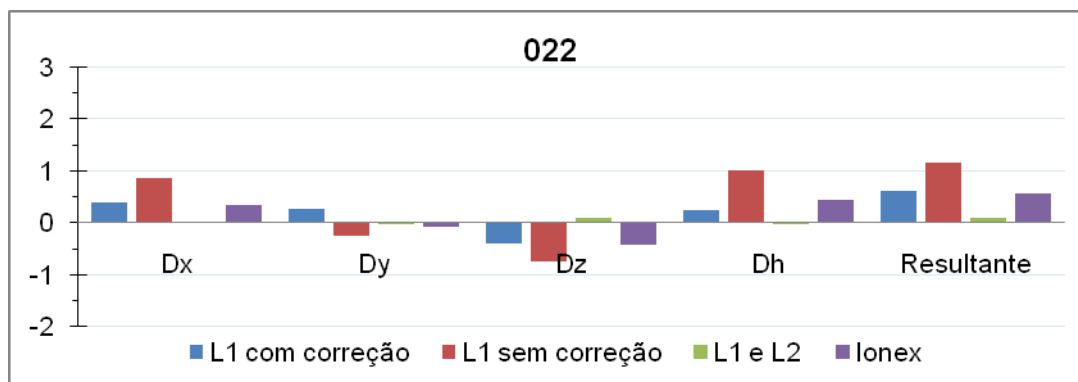


Figura 46: Valores das discrepâncias para o dia 022

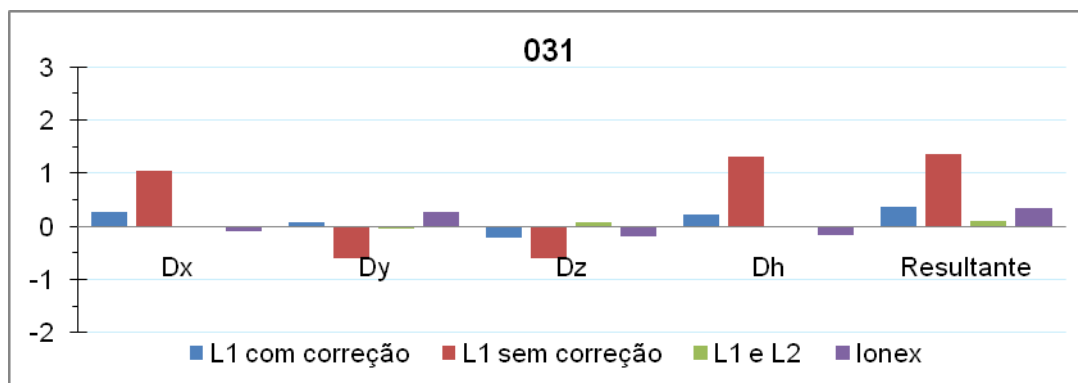


Figura 47: Valores das discrepâncias para o dia 031

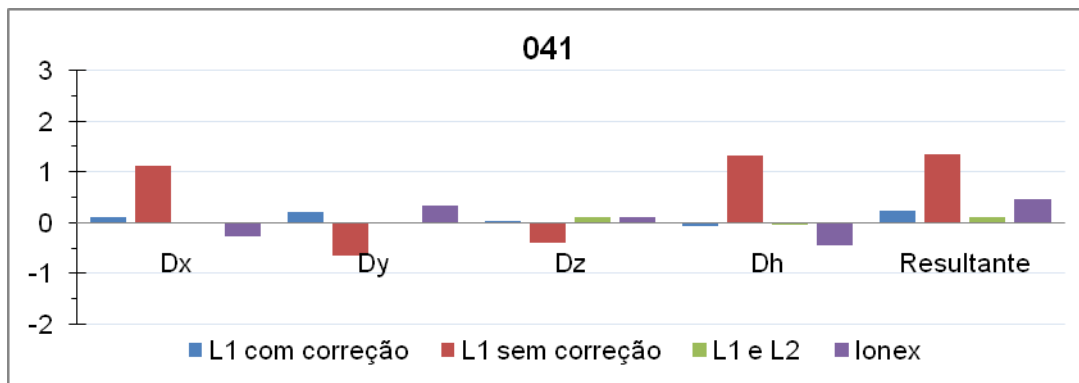


Figura 48: Valores das discrepâncias para o dia 041

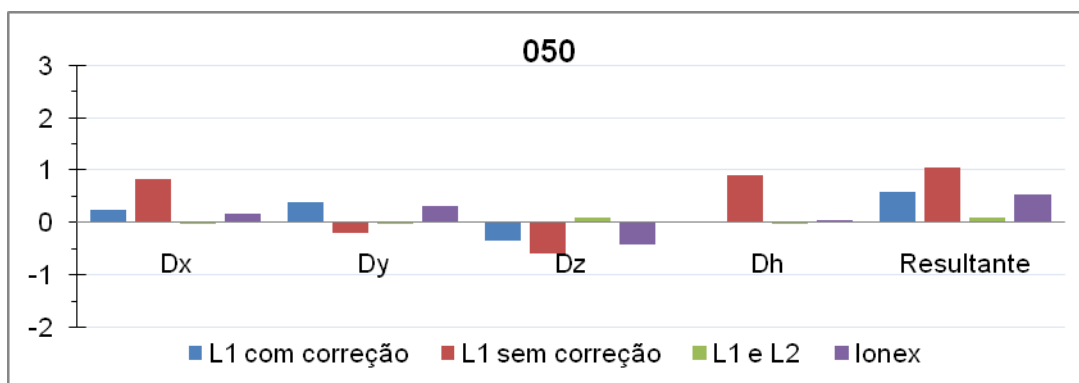


Figura 49: Valores das discrepâncias para o dia 050

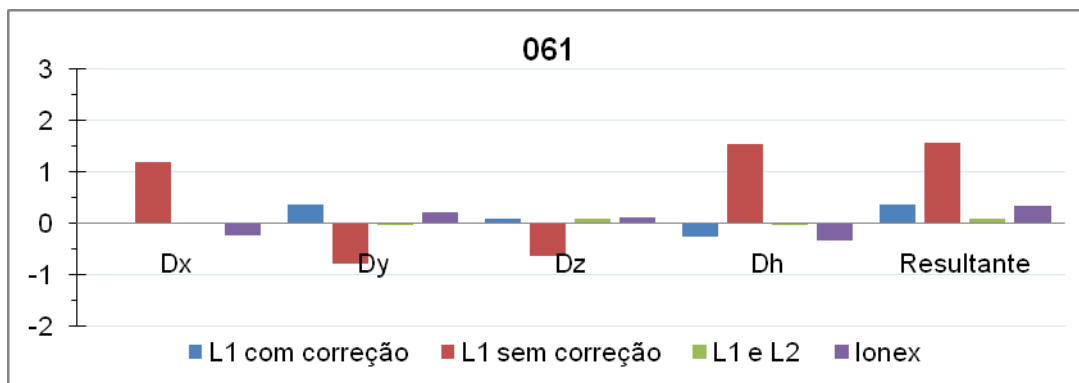


Figura 50: Valores das discrepâncias para o dia 060

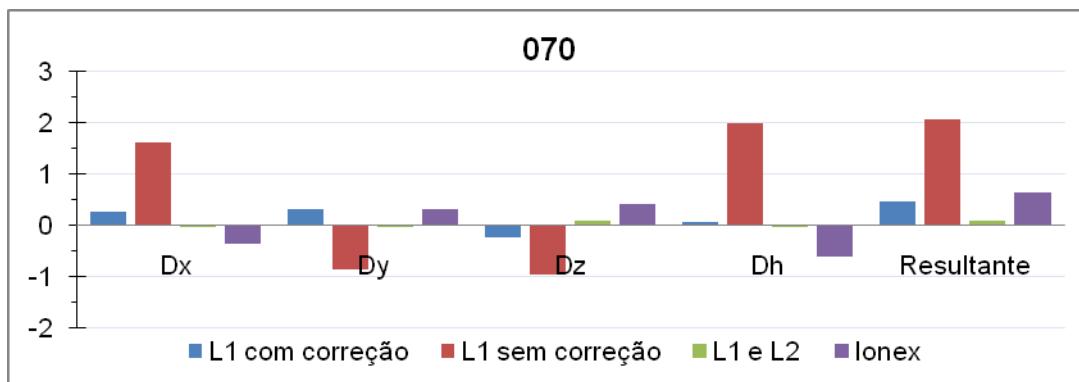


Figura 51: Valores das discrepâncias para o dia 070

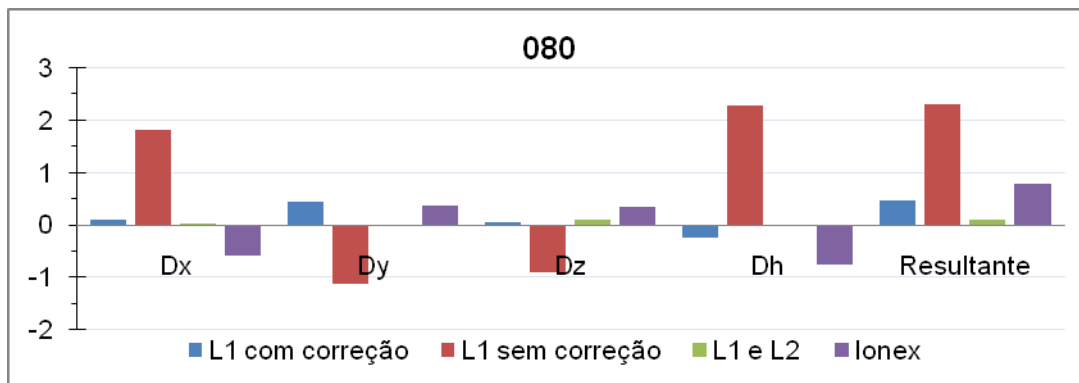


Figura 52: Valores das discrepâncias para o dia 080

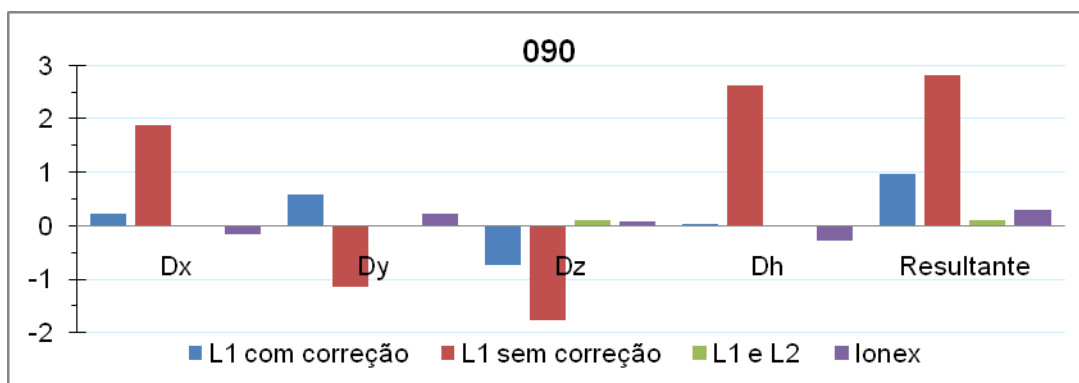


Figura 53: Valores das discrepâncias para o dia 090

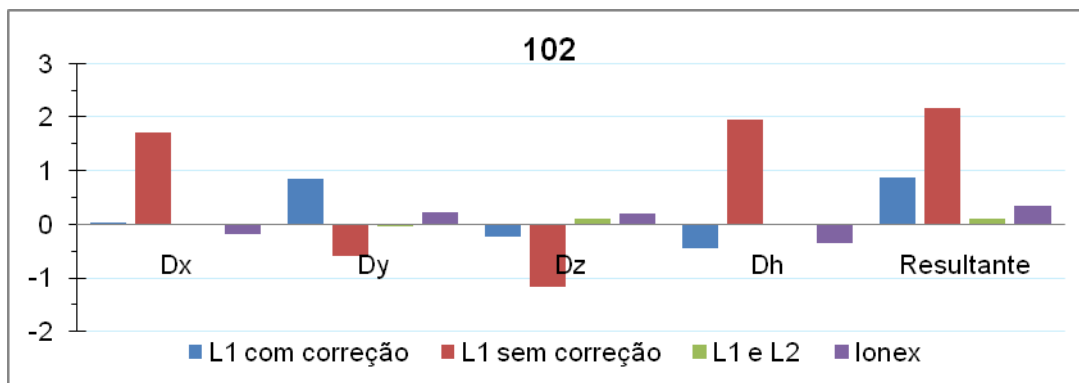


Figura 54: Valores das discrepâncias para o dia 102

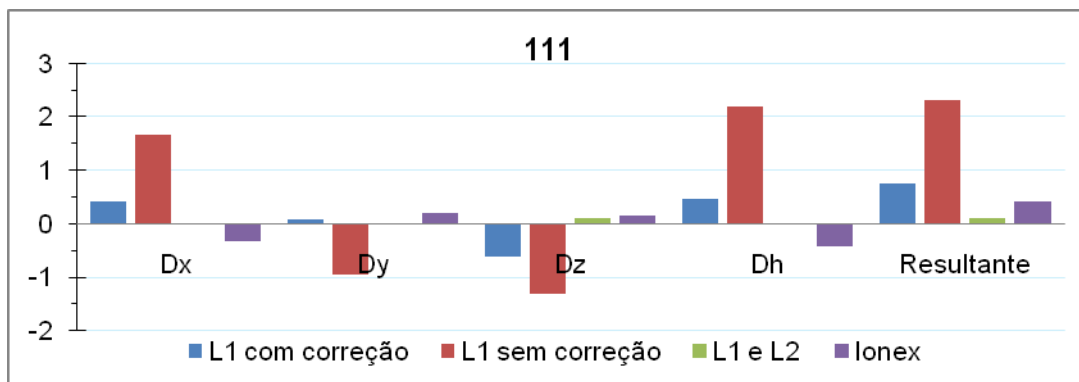


Figura 55: Valores das discrepâncias para o dia 111

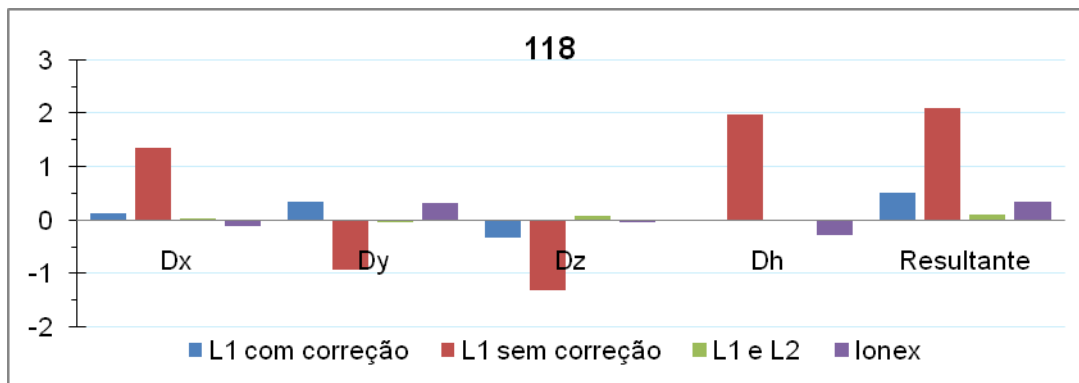


Figura 56: Valores das discrepâncias para o dia 118

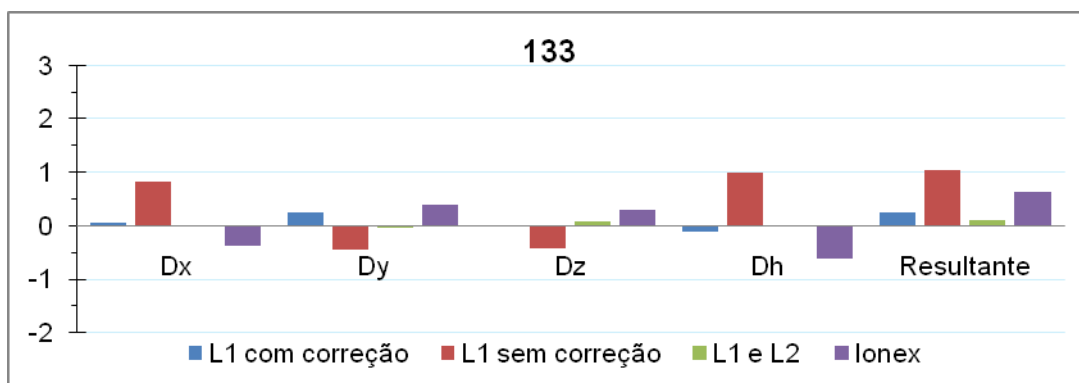


Figura 57: Valores das discrepâncias para o dia 133

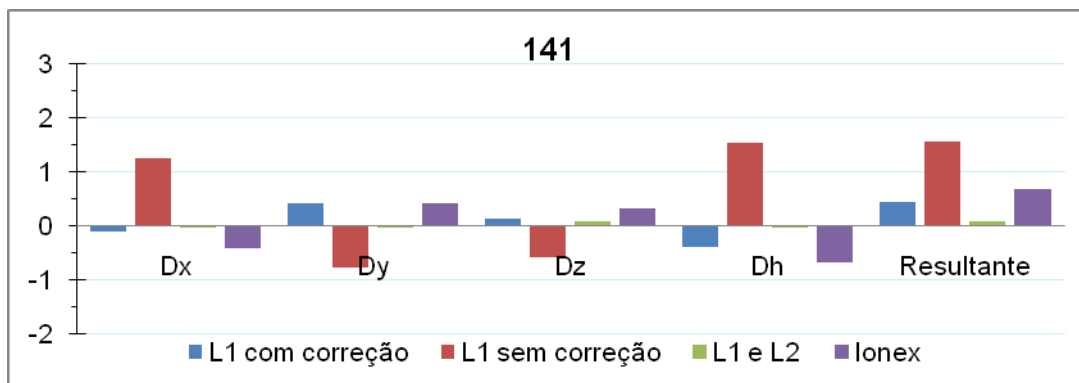


Figura 58: Valores das discrepâncias para o dia 141

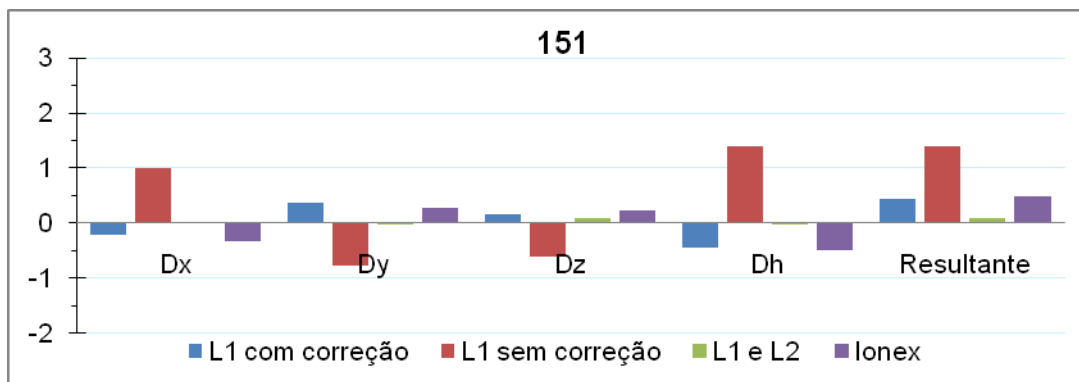


Figura 59: Valores das discrepâncias para o dia 151

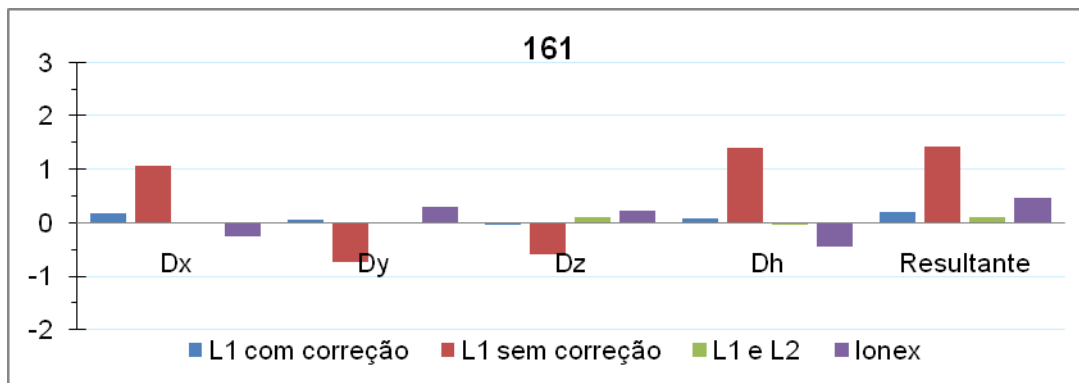


Figura 60: Valores das discrepâncias para o dia 161

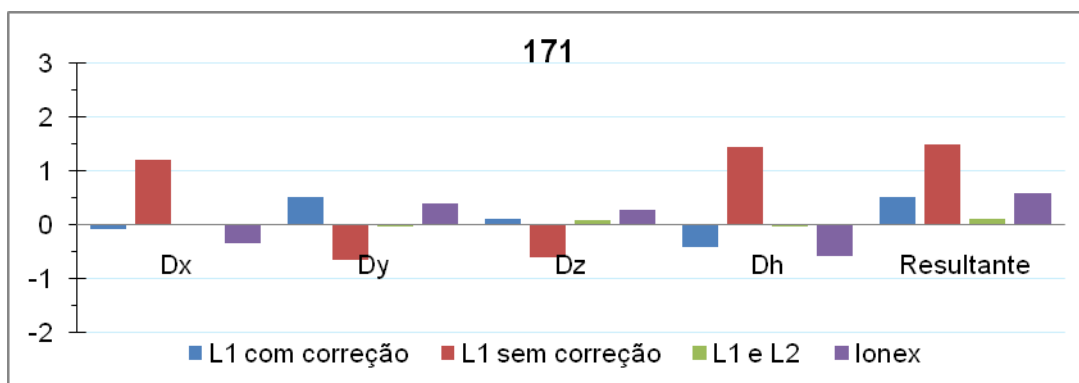


Figura 61: Valores das discrepâncias para o dia 171

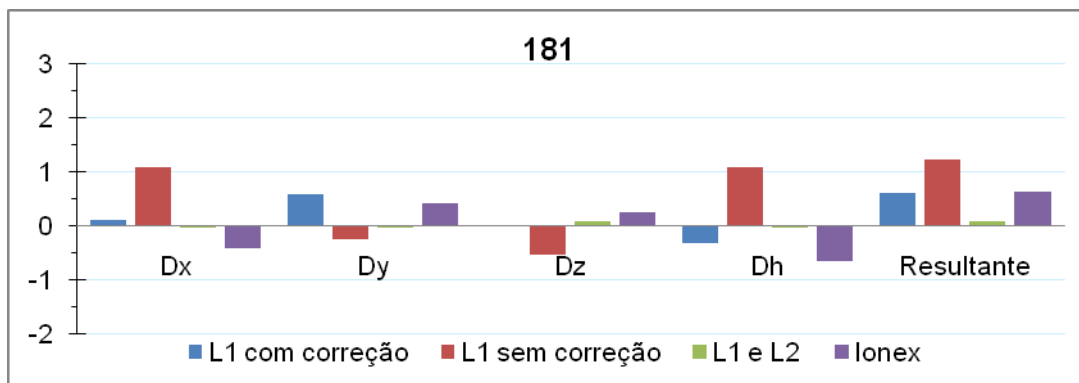


Figura 62: Valores das discrepâncias para o dia 181

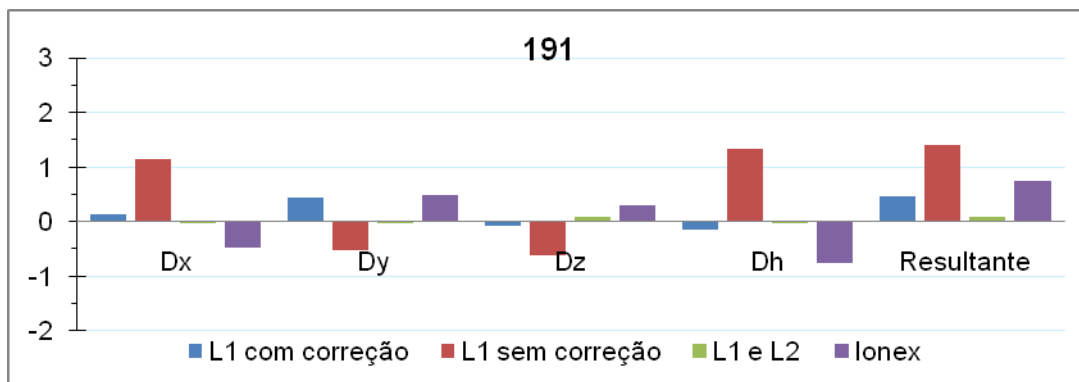


Figura 63: Valores das discrepâncias para o dia 191

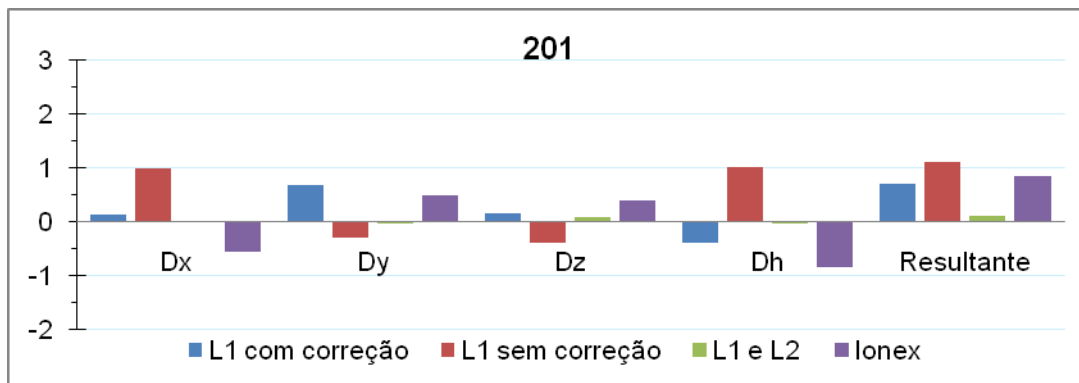


Figura 64: Valores das discrepâncias para o dia 201

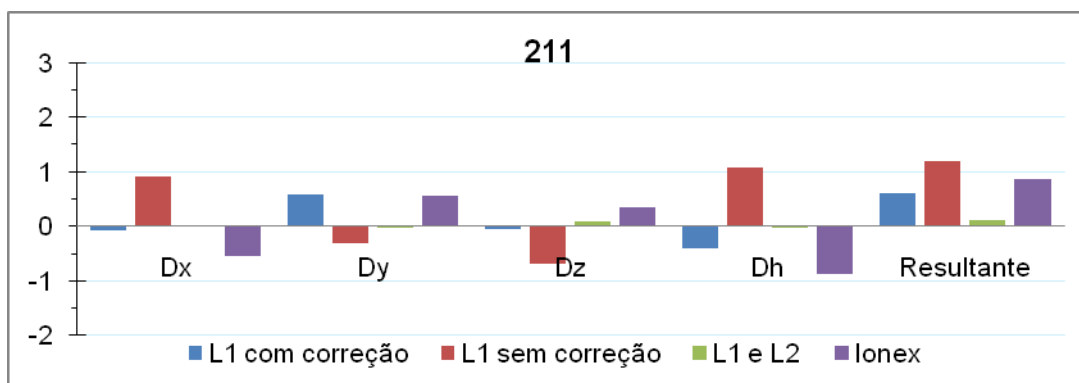


Figura 65: Valores das discrepâncias para o dia 211

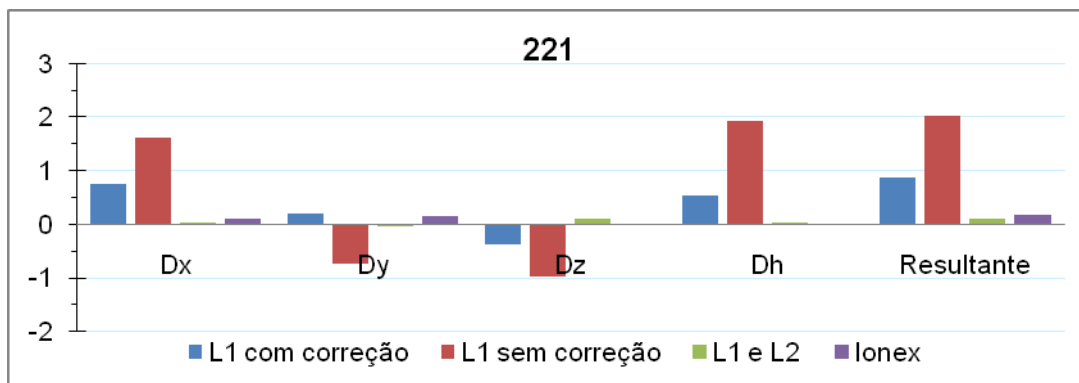


Figura 66: Valores das discrepâncias para o dia 221

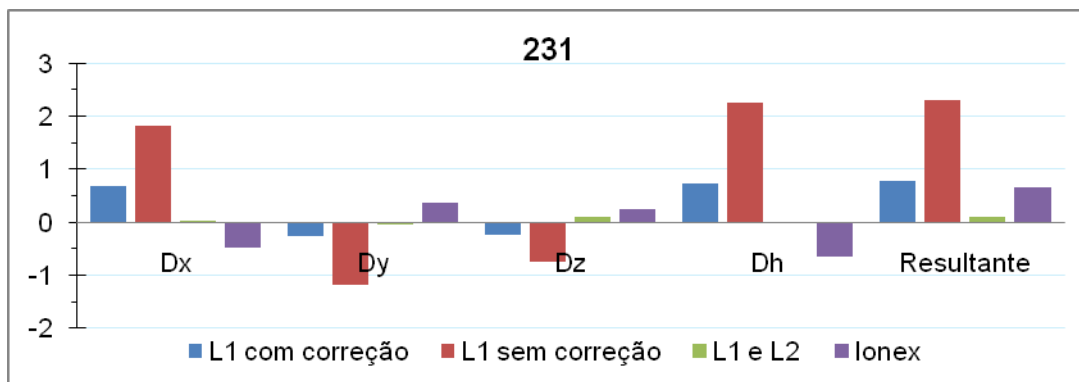


Figura 67: Valores das discrepâncias para o dia 231

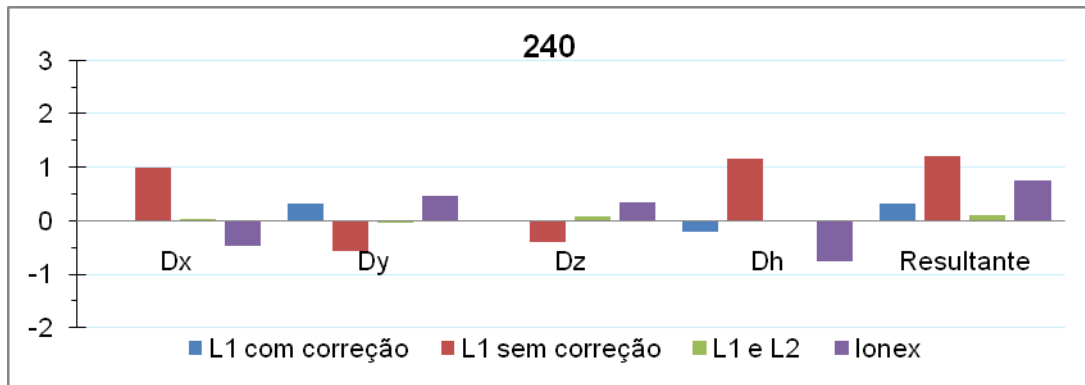


Figura 68: Valores das discrepâncias para o dia 240

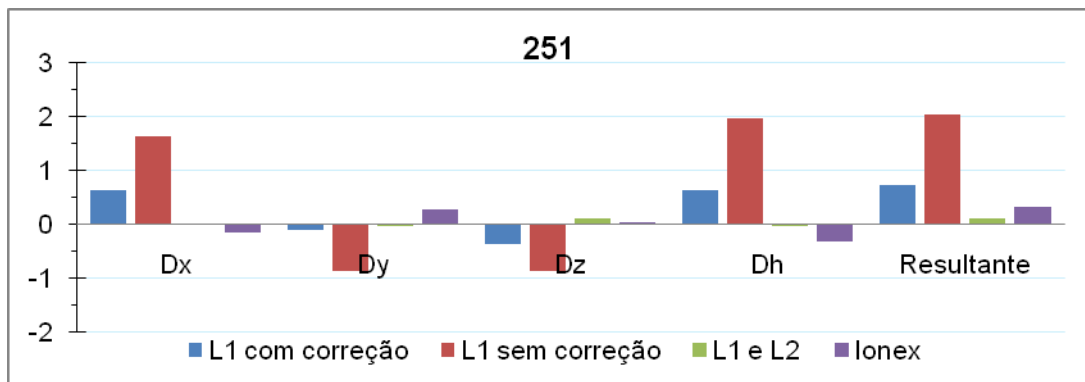


Figura 69: Valores das discrepâncias para o dia 251

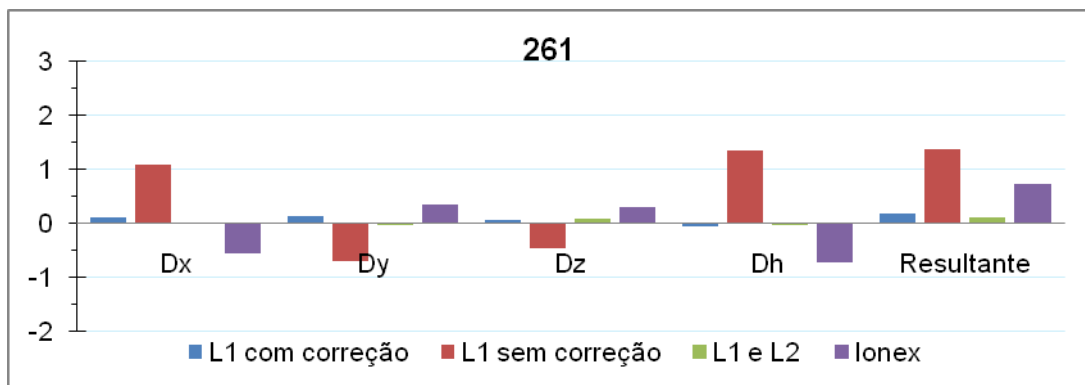


Figura 70: Valores das discrepâncias para o dia 261

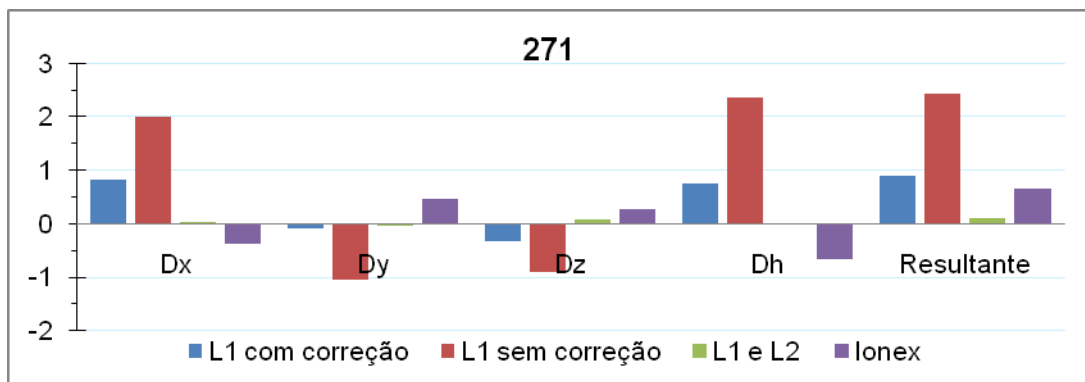


Figura 71: Valores das discrepâncias para o dia 271

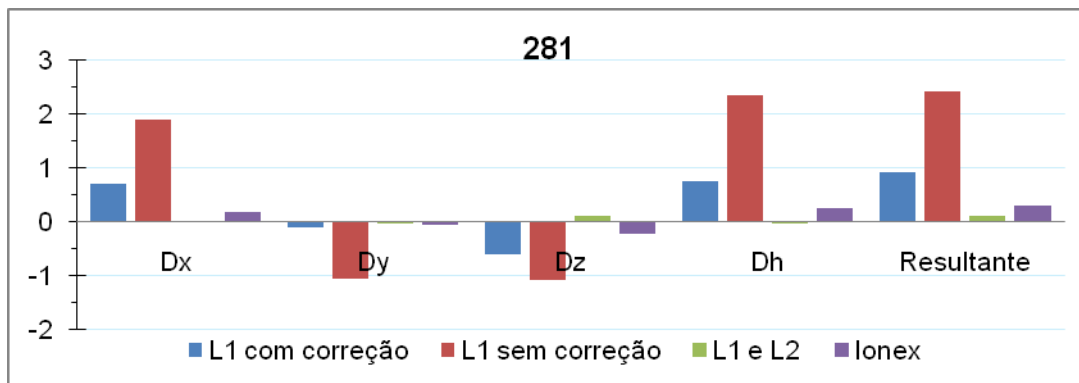


Figura 72: Valores das discrepâncias para o dia 281

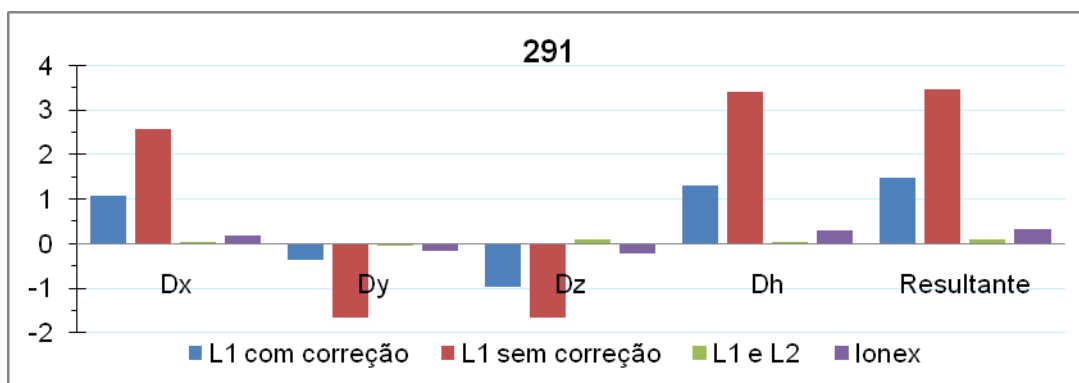


Figura 73: Valores das discrepâncias para o dia 291

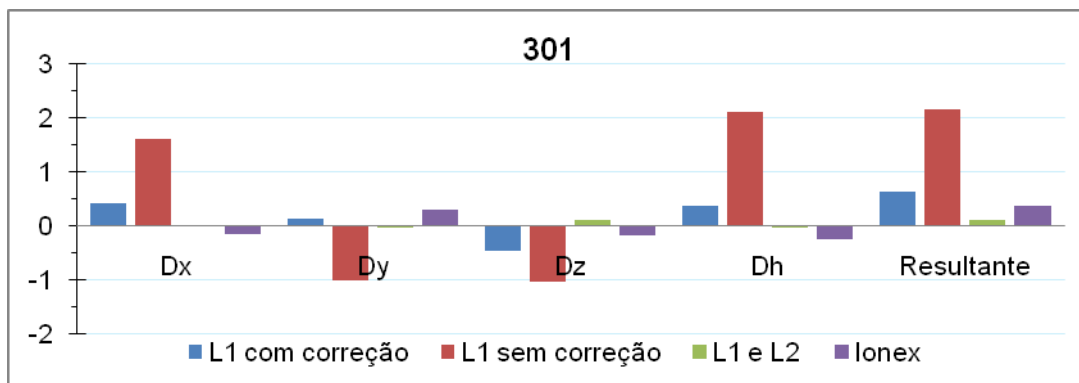


Figura 74: Valores das discrepâncias para o dia 301

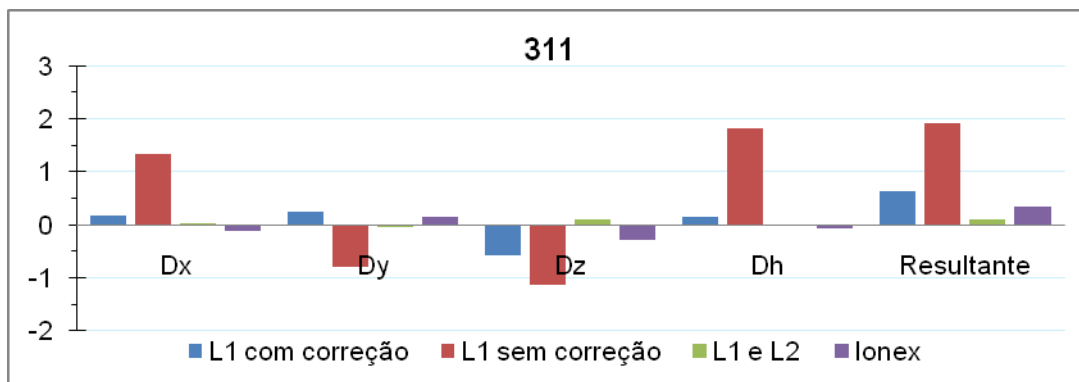


Figura 75: Valores das discrepâncias para o dia 311

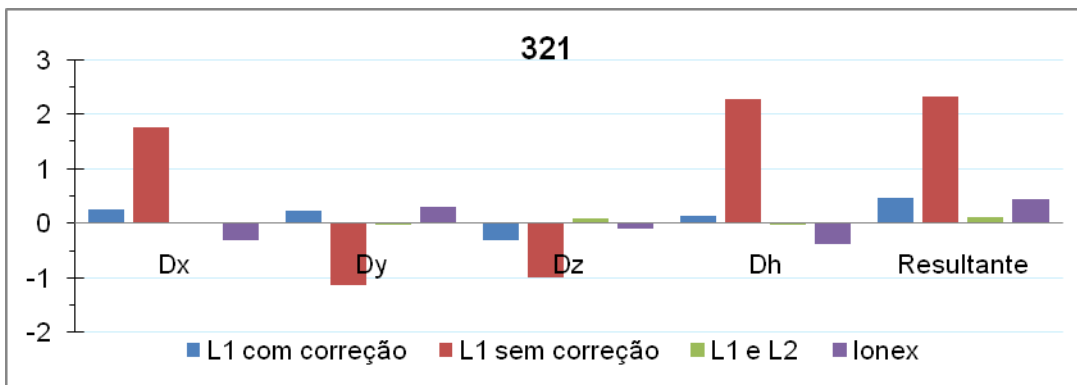


Figura 76: Valores das discrepâncias para o dia 321

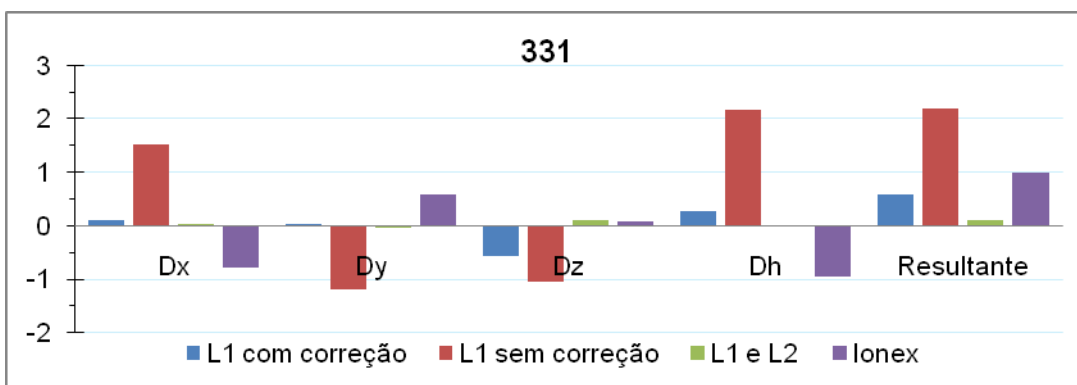


Figura 77: Valores das discrepâncias para o dia 331

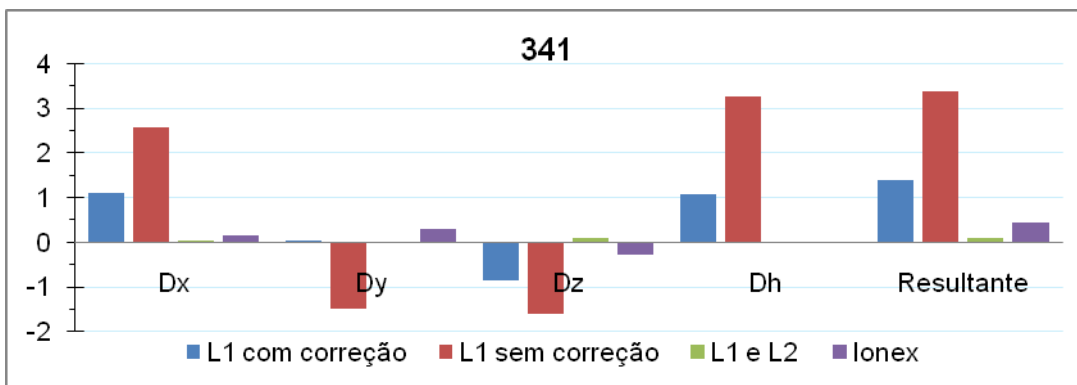


Figura 78: Valores das discrepâncias para o dia 341

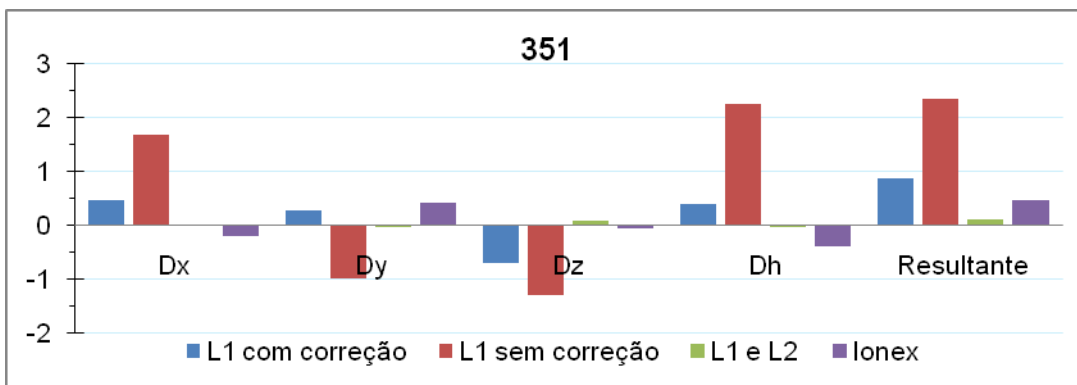


Figura 79: Valores das discrepâncias para o dia 351

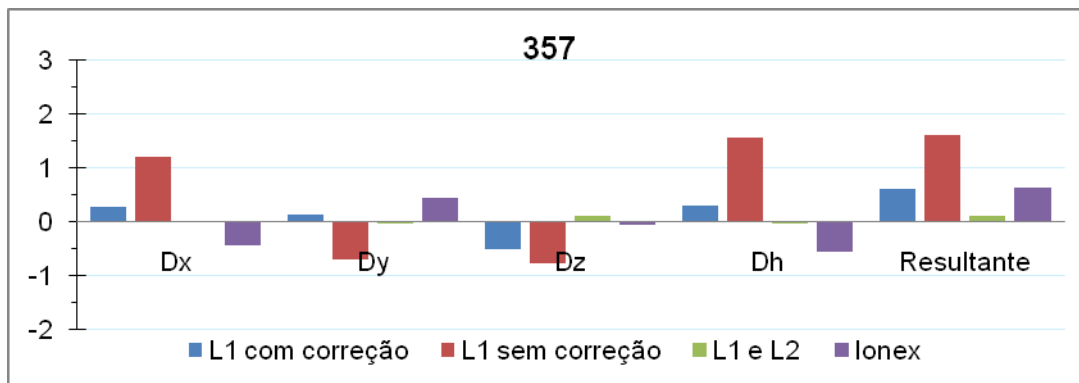


Figura 80: Valores das discrepâncias para o dia 357

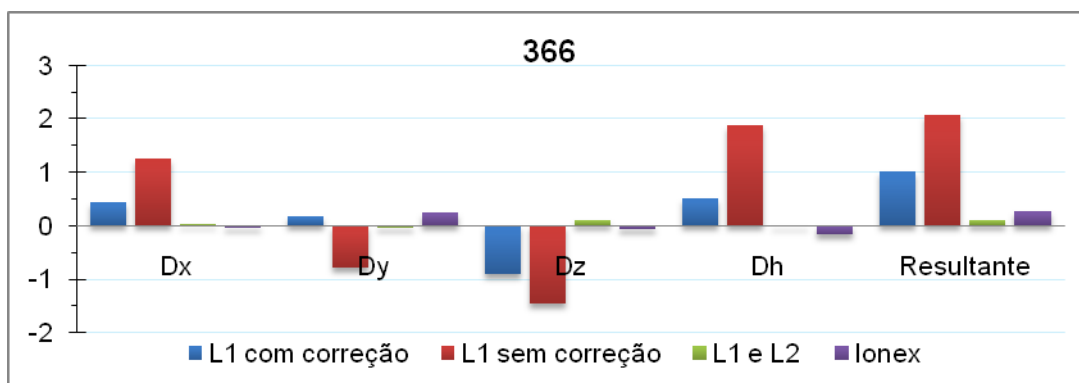


Figura 81: Valores das discrepâncias para o dia 366