

Modelo ionosférico regional aplicado ao Sistema de Posicionamento Global - GPS

Maurício Roberto Veronez

Programa de Pós-Graduação em Geologia, UNISINOS. Av. Unisinos, 950, 93022-000 São Leopoldo RS, Brasil. veronez@unisinos.br

Paulo Cesar Lima Segantine

Programa de Pós-Graduação em Transportes (Área de Mensuração), EESC/USP. Av. Trabalhador São-carlense, 400, 13566-960 São Carlos SP, Brasil. seganta@sc.usp.br

Adriane Brill Thum

Curso de Engenharia Civil (Laboratório de Topografia), UNISINOS. Av. Unisinos, 950, 93022-000 São Leopoldo RS, Brasil. adrianebt@unisinos.br

ABSTRACT

REGIONAL IONOSPHERIC MODEL APPLIED TO GLOBAL POSITIONING SYSTEM. The positioning of points with the GPS system has become an important tool used in many different areas of knowledge. However, in some situations, the demand for great accuracies has caused the inconvenience of high cost when dual frequency receptors are purchased. Even with technological advances, the ionosphere is one of the error sources that affect the positioning of points. For users that have dual frequency equipments, this error is modeled with great efficiency through the processing of data with iono free solution. In Brazil, most users have equipments that gather information from the C/A code only, and/or from the C/A code and carrier L₁. In this case, a few models are used, like the Klobuchar's for example, with error reduction for absolute positioning of 50%, approximately. For relative positioning, with bases further than 20 km, the use of this model is not the most appropriate. In this context, this work consists in the development of a method that can model the ionospheric delay with a second degree polynomial, based on sequential adjustment of observations. The necessary information for this modeling was taken from GPS stations of the Brazilian Network for Continuous Monitoring - RBMC. Evenly, with Single Point Positioning, it has been proved that the offered model has lead to a positional error reduction of near 65% if compared to the processing without the use of any ionospheric model.

Key words: Regional model, ionosphere, sequential adjustment, GPS.

RESUMO

O posicionamento de pontos com o sistema GPS é uma ferramenta importante e aplicável nas mais diferentes áreas do conhecimento. No entanto, em algumas situações, a exigência de informações mais precisas e exatas levou à aquisição de receptores de dupla frequência, que elevam os custos. Mesmo com os avanços tecnológicos, a ionosfera é uma das fontes de erro que mais afetam o posicionamento de pontos. Para os usuários que possuem equipamentos de dupla frequência, este erro é modelado com grande eficiência por meio do processamento de dados com solução *iono free*. No Brasil, a maioria dos usuários possui equipamentos que captam informações apenas do código C/A e/ou código C/A e portadora L₁. Neste caso, se faz uso de alguns modelos, como por exemplo, o de Klobuchar, com redução do erro nos posicionamentos absolutos de, aproximadamente, 50%. Contudo, nos posicionamentos relativos, com bases superiores a 20 km, a utilização deste modelo não é a mais indicada. Neste contexto, este trabalho apresenta o desenvolvimento de um método que possibilita modelar o atraso ionosférico por meio de um polinômio do segundo grau, baseado no ajustamento sequencial das observações. As informações necessárias para esta modelagem são as fornecidas pelas estações GPS da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo - RBMC. Horizontalmente, por meio do método de posicionamento *Single Point* comprovou-se que o modelo proposto proporcionou uma redução no erro posicional de aproximadamente 65%, quando comparado com o processamento sem a utilização de nenhum modelo ionosférico.

Palavras-chave: Modelo regional, ionosfera, ajustamento sequencial, GPS.

INTRODUÇÃO

A literatura, bem como os trabalhos práticos realizados diariamente com o Sistema de Posicionamento Global (*Global Positioning System* ou GPS), mostram que várias são as fontes de erros que afetam o posicionamento de pontos. Dentre as prin-

cipais, destacam-se aquelas relacionadas aos satélites GPS, à refração troposférica e ionosférica, à interrupção do sinal, o multicaminhamento, o centro de fase da antena, o posicionamento da estação de referência para a metodologia de levantamento relativo, o nível de ruído dos receptores e os efeitos de degradação dos sinais.

A atmosfera é dividida normalmente em duas camadas, a troposfera e a ionosfera, caracterizadas pelas condições particulares de propagação dos sinais eletromagnéticos. O processo de posicionamento de pontos através do sistema GPS está diretamente relacionado com a propagação e recepção destes sinais, que afetam

igualmente as ondas de rádio (Osório, 1992). As propriedades da ionosfera podem variar de acordo com as coordenadas geográficas ou geomagnéticas, hora local, altitude, estação do ano, ciclo de manchas solares e tempestades geomagnéticas (Camargo, 1999).

O efeito da ionosfera é proporcional ao número de elétrons livres presentes (TEC ou *Total Electron Content*) ao longo do caminho do satélite até a antena de um receptor. O TEC é uma grandeza que igualmente afeta o posicionamento de pontos, variando no tempo e no espaço, em função do fluxo de ionização solar, da atividade magnética, do ciclo de manchas solares, estação do ano, hora do dia, localização e direção do raio vetor do satélite (Leick, 2003). Fonseca Júnior (2002) elaborou uma série histórica do comportamento do TEC, no período compreendido entre janeiro de 1997 a dezembro de 2001, determinado a cada duas horas, em treze estações pertencentes à Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo - RBMC. Esse trabalho possibilitou uma melhor compreensão da ionosfera no Brasil, servindo de suporte para o desenvolvimento de pesquisas voltadas para aprimoramento de modelos ionosféricos, aplicáveis ao sistema GPS.

Soma-se a isto o fato de que o erro associado à refração ionosférica é de difícil correção. Segundo Hofmann-Wellenhof *et al.* (2001), o método mais eficiente para minimizar os efeitos da refração ionosférica é o uso de dois sinais com diferentes frequências, porque a refração delas depende.

As mensagens de navegação transmitidas pelos satélites do sistema GPS trazem informações que permitem efetuar correções da ionosfera para receptores GPS de uma frequência, ao utilizar o modelo de Klobuchar (1987). Porém, vários estudos realizados mostraram que este modelo pode remover apenas algo em torno de 50% do efeito ionosférico (Newby e Langley, 1992).

Uma das formas de aumentar a eficiência na remoção dos efeitos ionosféricos no posicionamento de pontos por meio do sistema GPS é a implementação de modelos regionais a partir de receptores de dupla frequência. Por meio da RBMC,

implementada e gerenciada pela Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), é possível estudar modelos específicos para nossa realidade.

Assim, o objetivo desse trabalho foi o de investigar um modelo regional para correção do atraso ionosférico baseado em uma função polinomial, com o intuito de melhorar a exatidão no posicionamento de pontos realizados com receptores GPS de uma frequência.

METODOLOGIA

Existem várias possibilidades de minimização dos efeitos ionosféricos no processo de posicionamento de pontos com o sistema GPS. Para os usuários de equipamentos GPS que trabalham com programas comerciais e só captam informações do código C/A, o modelo ionosférico mais utilizado é o de Klobuchar (1987). Para os usuários que possuem equipamentos de uma frequência (portadora L_1 e código C/A) além deste, outras formas eficientes são possíveis, visando minimizar o efeito ionosférico como, por exemplo, realizar uma combinação entre as observáveis.

Quando se pensa em modelos regionais, existe a possibilidade de melhorar a eficiência na minimização dos efeitos ionosféricos por meio da determinação de parâmetros matemáticos, os quais podem ser utilizados para beneficiar os usuários de equipamentos de frequência simples e/ou código C/A. A determinação desses parâmetros é baseada nas observáveis de equipamentos GPS de dupla frequência, que compõem uma rede de monitoramento contínuo.

Por ser o atraso e/ou avanço ionosférico uma função dos sinais transmitidos pelos satélites GPS, por meio de um conjunto de estações de monitoramento contínuo de dupla frequência é possível estabelecer funções do tipo:

$$(R_{2r}^s - R_{1r}^s) = \left(\frac{f_1^2 - f_2^2}{f_2^2} \right) \cdot (\Delta_{1r}^{IONOS}) \quad (1)$$

onde:

- (i) R_{1r}^s e R_{2r}^s representam as pseudodistâncias observáveis nas frequências

portadoras f_1 e f_2 , respectivamente, em relação a um determinado satélite e à antena receptora, em metros;

- (ii) Δ_{1r}^{IONOS} representa o atraso ionosférico da pseudodistância observável, em relação a um determinado satélite e à antena receptora, em metros.

O efeito ionosférico Δ_{1r}^{IONOS} ilustrado na equação (1) pode ser modelado por meio de várias funções matemáticas. Nesse trabalho, optou-se por utilizar o modelo polinomial de segundo grau composto por seis coeficientes. Para tanto, na estimativa dos parâmetros deste modelo, utilizou-se o método seqüencial de ajustamento de observações. Este processo é uma derivação do Método dos Mínimos Quadrados (MMQ), com a vantagem de que o ajustamento não ocorre de forma global e sim época a época, possibilitando eliminar a influência de observações ruidosas na estimativa dos parâmetros.

Segundo Antunes (1996), o conceito da solução seqüencial baseia-se na divisão do conjunto das observações em grupos, com os quais se executa um tratamento matemático seqüencial de ajustamento. Nos grupos já ajustados, dos quais resulta uma estimativa da solução, é acrescentado um novo grupo de observações. Este acréscimo origina uma correção à estimativa já existente, permitindo manter a correlação entre grupos.

Princípio do modelo seqüencial de ajustamento

Para simplificar a dedução do modelo matemático, se estabelece que o conjunto de observações é formado apenas por dois grupos e de acordo com as equações do método paramétrico. As equações, elucidadas a seguir, são baseadas em Antunes (1996).

$$(A_1^T \cdot P_1 \cdot A_1) X + (A_1^T \cdot P_1 \cdot L_1) = 0 \quad (2)$$

$$V_1 = A_1 \cdot X + L_1 \quad (3)$$

$$(A_2^T \cdot P_2 \cdot A_2) X + (A_2^T \cdot P_2 \cdot L_2) = 0 \quad (4)$$

$$V_2 = A_2 \cdot X + L_2 \quad (5)$$

onde:

- (i) A_1^T e A_2^T correspondem respectivamente, às matrizes transpostas dos coeficientes do sistema de equações normais, para o primeiro e segundo grupo de observações;
- (ii) A_1 e A_2 correspondem respectivamente, às matrizes dos coeficientes do sistema de equações normais, para o primeiro e segundo grupo de observações;
- (iii) P_1 e P_2 correspondem respectivamente, às matrizes peso do primeiro e do segundo grupo de observações;
- (iv) L_1 e L_2 correspondem respectivamente, aos vetores de observações do primeiro e do segundo grupo de observações;
- (v) V_1 e V_2 correspondem respectivamente, aos vetores dos resíduos do primeiro e do segundo grupo de observações;
- (vi) "X" corresponde ao vetor dos parâmetros ajustados.

A solução do sistema formado pelas equações 3 e 5, por aplicação do método dos mínimos quadrados, resulta da minimização da função ϕ dado por:

$$\begin{aligned} \phi &= V_1^T \cdot P_1 \cdot V_1 + V_2^T \cdot P_2 \cdot V_2 - \\ &2 \cdot k_1^T \cdot (A_1 \cdot X + L_1 - V_1) - \\ &2 \cdot k_2^T \cdot (A_2 \cdot X + L_2 - V_2) = \min \end{aligned} \quad (6)$$

Igualando a zero as derivadas parciais da função "f" em relação a V_1, V_2, X, k_1 e k_2 , tem-se:

$$k_1 = -(P_1 \cdot A_1 \cdot X) - (P_1 \cdot L_1) \quad (7)$$

$$k_2 = -(A_2 \cdot (N_1)^{-1} \cdot A_2^T + (P_2)^{-1}) \cdot (A_2 \cdot X_1 + L_2) \quad (8)$$

$$N_1 = (A_1^T \cdot P_1 \cdot A_1) \quad (9)$$

$$X = X_1 + (N_1)^{-1} \cdot (A_2^T \cdot k_2) \quad (10),$$

e a Matriz Variância Covariância (MVC) dos parâmetros ajustados pode ser obtida por:

$$\Sigma_X = \Sigma_{X_1} + \Delta \Sigma_X \quad (11)$$

$$\Delta \Sigma_X = \hat{\sigma}_0^2 \cdot (N_1)^{-1} \cdot A_2^T \cdot \beta \quad (12)$$

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4}{n_1 + n_2 + u} \quad (13),$$

onde,

- (i) $\beta = [(P_2)^{-1} + A_2 \cdot (N_1)^{-1} \cdot A_2^T]^{-1} \cdot A_2 \cdot (N_1)^{-1}$
- (ii) $\alpha_1 = (X^T \cdot A_2^T \cdot P_2 \cdot L_2)$
- (iii) $\alpha_2 = (V_1^T \cdot P_1 \cdot V_1)$
- (iv) $\alpha_3 = (\Delta X^T \cdot A_1^T \cdot P_1 \cdot L_1)$
- (v) $\alpha_4 = (L_2^T \cdot P_2 \cdot L_2)$
- (vi) n_1 é o número de observações utilizado no primeiro grupo do sistema de equações;
- (vii) n_2 é o número de observações utilizado no segundo grupo do sistema de equações;
- (viii) u é o número de parâmetros a serem determinados;
- (ix) $\hat{\sigma}_0^2$ é a variância de unidade de peso *a posteriori*;
- (x) Σ_X é igual ao MVC dos parâmetros ajustados, referente ao ajustamento seqüencial;
- (xi) Σ_{X_1} é igual à MVC dos parâmetros ajustados, referente ao primeiro grupo de observações;
- (xii) $\Delta \Sigma_X$ é o acréscimo que deve ser somado à MVC dos parâmetros ajustados, no processo do ajustamento seqüencial.

Matrizes do ajustamento de observações

O modelo utilizado neste trabalho é representado pela equação abaixo:

$$(R_{2r}^S - R_{1r}^S) = \begin{pmatrix} f_1^2 - f_2^2 \\ f_2^2 \end{pmatrix} \cdot (\Delta_{1r}^{IONOS}) \quad (14),$$

e o efeito ionosférico Δ_{1r}^{IONOS} , foi modelado segundo um polinômio de segunda ordem conforme a equação 15:

$$\Delta_{1r}^{IONOS} = c_1 + c_2 \cdot (\phi^*) + c_3 \cdot (\lambda^*) + c_4 \cdot (\phi^*)^2 + c_5 \cdot (\lambda^*)^2 + c_6 \cdot (\phi^*) \cdot (\lambda^*) \quad (15),$$

onde:

- (i) ϕ^* e λ^* é, respectivamente, igual a latitude e longitude do ponto sub-ionosférico e,

- (ii) $c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6$ são os coeficientes do polinômio a serem determinados.

Ao substituir a equação (15) na (14), tem-se:

$$(R_{2r}^S - R_{1r}^S) = \begin{pmatrix} f_1^2 - f_2^2 \\ f_2^2 \end{pmatrix} \cdot \begin{bmatrix} c_1 + c_2 \cdot (\phi^*) + \\ c_3 \cdot (\lambda^*) + c_4 \cdot (\phi^*)^2 + \\ c_5 \cdot (\lambda^*)^2 + \\ c_6 \cdot (\phi^*) \cdot (\lambda^*) \end{bmatrix} \quad (16)$$

Ao considerar a equação 16, é possível estruturar as principais matrizes a serem utilizadas no processo de ajustamento de observações: a matriz dos coeficientes "A", o vetor das observações "L" e a MVC das observações.

Para cada um dos receptores "r" e satélites "S" envolvidos no processo, para uma única época, tem-se a matriz A:

$$A = \begin{matrix} (r, S_1) \\ \dots \\ (r, S_n) \\ (r, S_n) \\ (r, S_1) \\ \dots \\ (r, S_n) \end{matrix} \begin{matrix} B & B \cdot \phi^* & B \cdot \lambda^* & B \cdot (\phi^*)^2 & B \cdot (\lambda^*)^2 & B \cdot (\phi^*) \cdot (\lambda^*) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ B & B \cdot \phi^* & B \cdot \lambda^* & B \cdot (\phi^*)^2 & B \cdot (\lambda^*)^2 & B \cdot (\phi^*) \cdot (\lambda^*) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ B & B \cdot \phi^* & B \cdot \lambda^* & B \cdot (\phi^*)^2 & B \cdot (\lambda^*)^2 & B \cdot (\phi^*) \cdot (\lambda^*) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ B & B \cdot \phi^* & B \cdot \lambda^* & B \cdot (\phi^*)^2 & B \cdot (\lambda^*)^2 & B \cdot (\phi^*) \cdot (\lambda^*) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ B & B \cdot \phi^* & B \cdot \lambda^* & B \cdot (\phi^*)^2 & B \cdot (\lambda^*)^2 & B \cdot (\phi^*) \cdot (\lambda^*) \end{matrix}$$

A grandeza "B", presente na matriz A e o vetor L correspondem, respectivamente, a:

$$B = \begin{pmatrix} f_1^2 - f_2^2 \\ f_2^2 \end{pmatrix}$$

$$L = \begin{pmatrix} (R_{2r}^S - R_{1r}^S)_{r_1} \\ \dots \\ (R_{2r}^S - R_{1r}^S)_{r_n} \\ (R_{2r}^S - R_{1r}^S)_{r_1} \\ \dots \\ (R_{2r}^S - R_{1r}^S)_{r_n} \\ (R_{2r}^S - R_{1r}^S)_{r_1} \\ \dots \\ (R_{2r}^S - R_{1r}^S)_{r_n} \end{pmatrix}$$

O experimento

As informações utilizadas na estimativa dos parâmetros do modelo ionosférico provêm das estações da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC), referentes ao ano de 2000/2001 e disponibilizadas para a comunidade pelo IBGE. A Figura 1 ilustra a disposição dessas estações.

Neste trabalho, optou-se por utilizar os dados referentes ao ano de 2001, pela intensa atividade solar ocorrida nesse período. A estimativa dos parâ-

metros do modelo polinomial se deu por meio de um ajustamento seqüencial de observações, em períodos de 24 horas.

Para verificar o comportamento temporal dos parâmetros os dias utilizados foram definidos por um estudo dos dados das estações da RBMC, de tal forma que fossem aproveitadas somente as estações que tivessem informações completas durante o período de 24 horas. As Tabelas 1, 2, 3 e 4 ilustram os dias utilizados na estimativa dos parâmetros.

Com o objetivo de facilitar o desenvolvimento do trabalho, foi ainda utilizado um programa em linguagem Visual Basic-5.0, chamado MODEIONO, composto pelos, Módulo 1, de estruturação dos dados de entrada; Módulo 2, de ajustamento dos parâmetros do modelo e, Módulo 3, de cálculo do atraso ionosférico e geração do arquivo RINEX, com a observável de interesse corrigida do atraso ionosférico.

Para testar a eficiência do modelo, foram realizadas duas etapas, a primeira onde o vértice BRAZ, pertencente à RBMC, que não participou da estimativa dos parâmetros do modelo polinomial, foi processado de forma absoluta, em um período de 24 horas, desconsiderando o uso de qualquer tipo de modelo ionosférico. A segunda etapa foi realizada com igual procedimento, mas com correção do código C/A por meio do módulo 3 do programa MODEIONO, gerando-se um novo arquivo RINEX com a observável corrigida do atraso ionosférico. Assim, o arquivo RINEX também foi processado sem habilitar nenhum modelo ionosférico. Nas duas etapas, foram utilizadas as efemérides transmitidas. O modelo troposférico utilizado foi o de Hopfield (1969), com um ângulo de elevação dos satélites maior ou igual a 15 graus.

O programa utilizado para processar o vértice BRAZ foi o SKI - 2.3 da LEI-CA. As análises de discrepâncias foram realizadas segundo as equações:

$$\Delta_N = N_{(\text{conhecido})} - N_{(\text{calculado})} \quad (17)$$

$$\Delta_E = E_{(\text{conhecido})} - E_{(\text{calculado})} \quad (18)$$

$$\Delta_H = h_{(\text{conhecido})} - h_{(\text{calculado})} \quad (19)$$

onde,

(i) D_N e D_E correspondem às discre-

Disposição das Estações da RBMC

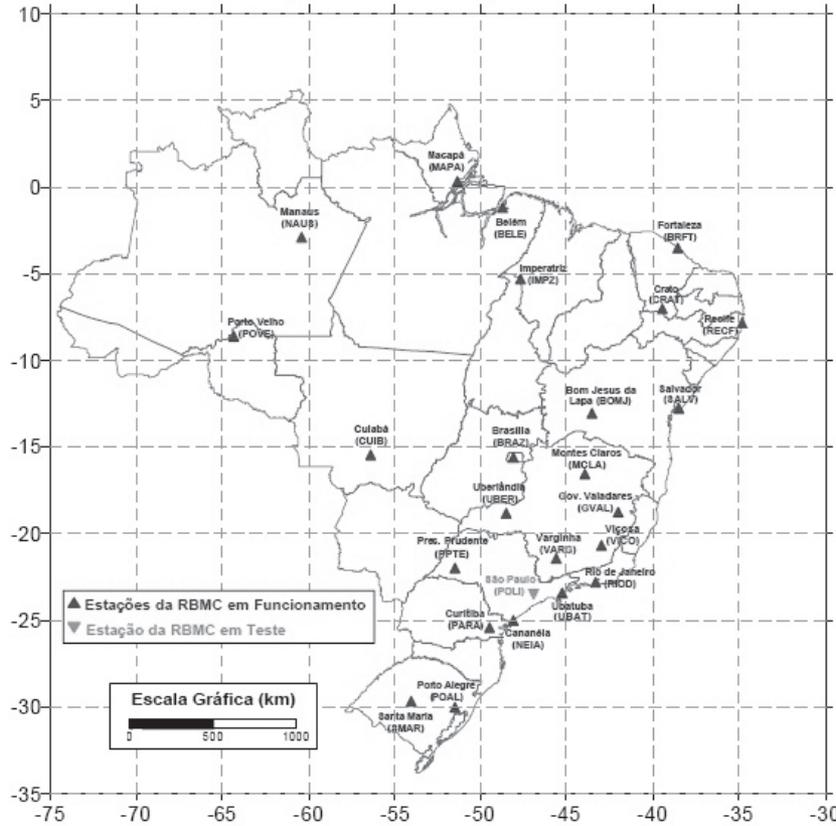


Figura 1. Disposição das estações da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC) (a partir de IBGE, 2007).
Figure 1. Disposition of the Brazilian Network for Continuous Monitoring (RBMC) (from IBGE, 2007).

Tabela 1. Dias utilizados na estimativa dos parâmetros do modelo polinomial no verão. A estação BRAZ não participou do processo de estimativa dos parâmetros, pois foi utilizada na validação do modelo por meio do método de posicionamentos *Single Point*.

Table 1. Days used in the estimation of parameters of the polynomial model in the summer. The BRAZ station was not considered in the estimation of the parameters due to this use in the validation of the model by the Single Point method of positioning.

	Dias do Ano: Verão												
	5	6	7	13	14	16	23	24	25	54	56	69	72
BRAZ*													
CUIB	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
CRATO	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
VICO	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
IMPZ	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
POAL	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X
RECF	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
SALV	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

Tabela 2. Dias utilizados na estimativa dos parâmetros do modelo polinomial no outono.
Table 2. Days used in the estimation of parameters to the polynomial model in autumn.

	Dias do Ano: Outono								
	80	94	102	103	104	109	155	156	157
BRAZ									
CUIB	X	X	X	X	X	X	X	X	X
CRATO	X	X	X	X	X	X	X	X	X
VICO	X	X	X	X	X	X	X	X	X
IMPZ	X	X	X	X	X	X	X	X	X
POAL	X	X	X	X	X	X	X	X	X
RIOD	X	X	X	X	X	X	X	X	X
RECF	X	X	X	X	X	X	X	X	X
SALV	X	X	X	X	X	X	X	X	X

Tabela 3. Dias utilizados na estimativa dos parâmetros do modelo polinomial no inverno.
Table 3. Days used in the estimation of parameters of the polynomial model in the winter.

	Dias do Ano: Inverno								
	184	186	193	199	202	204	205	206	207
BRAZ									
CUIB	X	X	X	X	X	X	X	X	X
CRATO	X	X	X	X	X	X	X	X	X
VICO	X	X	X	X	X				X
IMPZ	X	X	X	X	X	X	X	X	X
MANA	X	X	X	X	X	X	X	X	X
POAL	X	X	X	X	X	X	X	X	X
RIOD								X	X
RECF	X	X	X	X	X	X	X	X	X

Tabela 4. Dias utilizados na estimativa dos parâmetros do modelo polinomial na primavera.
Table 4. Days used in the estimation of parameters of the polynomial model during spring.

	Dias do Ano: Primavera								
	298	301	302	312	315	316	318	323	327
BRAZ									
CUIB	X	X	X	X			X		X
CRATO	X	X	X	X	X		X	X	X
VICO	X	X	X	X	X	X	X	X	X
IMPZ	X	X	X	X	X	X	X	X	X
MANA	X	X	X	X	X	X	X		X
POAL	X	X	X	X	X	X	X	X	X
RIOD	X	X	X	X	X	X	X	X	X
RECF	X	X	X	X	X	X	X	X	X
BOMJ	X	X	X	X	X	X	X	X	X
SALV	X	X	X	X	X	X	X	X	

- pâncias entre os valores das coordenadas UTM conhecidas, e as advindas do processamento GPS, em relação ao elipsóide WGS-84;
- (ii) D_h corresponde à discrepância entre a altura geométrica conhecida e a advinda do processamento GPS, em relação ao elipsóide WGS-84;
 - (iii) $N_{(conhecido)}$ e $N_{(calculado)}$, correspondem respectivamente, às coordenadas UTM - Norte conhecida e a calculada, aplicando-se um determinado modelo ionosférico;
 - (iv) $E_{(conhecido)}$ e $E_{(calculado)}$, correspondem respectivamente, às coordenadas UTM - Este, conhecida e a calculada, aplicando-se um determinado modelo ionosférico;
 - (v) $h_{(conhecido)}$ e $h_{(calculado)}$ correspondem às alturas geométricas conhecida e a advindas do processamento GPS, em relação ao elipsóide WGS-84.

As coordenadas UTM do vértice BRAZ tomadas como verdadeiras no processo de validação do modelo constam da Tabela 5. Os dias utilizados no processamento GPS na metodologia *Single Point* são listados na Tabela 6.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados demonstram que o modelo polinomial proporcionou bons resultados quando se utiliza o posicionamento horizontal, especialmente quando se leva em conta que não foi empregado nenhum modelo ionosférico. No período do verão estudado, através do modelo polinomial, o dia 5 foi o único que apresentou um erro médio diário superior a dois metros, ficando abaixo deste valor nos demais dias (Figura 2).

Por meio de uma análise de eficiência para o período de verão, o posicionamento através do modelo polinomial proporcionou um erro médio quadrático horizontal de 1,748 m, enquanto que a não utilização de qualquer modelo ionosférico resultou em um erro de 5,831 m. Se a análise for realizada no posicionamento vertical, o erro médio quadrático horizontal, com e sem a utilização do modelo foi de

2,982 m e 8,409 m, respectivamente. As Figuras 2 e 3 ilustram os erros médios quadráticos horizontais e os desvios padrão para os dias do verão estudado.

Para o período do outono, o modelo polinomial mostrou praticamente o mesmo comportamento no processo de minimização do efeito ionosférico, quando comparado com o verão. Em relação ao posicionamento horizontal, o erro médio quadrático horizontal diário foi sempre inferior a 2,2 m.

Quando se analisam os sete dias de processamento, os valores médios do erro horizontal com e sem modelo, foram de 1,773 m e 3,318 m, respectivamente, proporcionando uma melhora de 1,545 m. As Figuras 4 e 5 ilustram os erros médios quadráticos horizontais e

os desvios padrão para os dias do outono estudado.

Em relação ao erro vertical, a melhora em média não foi tão evidente, se comparado àquela obtida no período do verão. Os valores médios encontrados no período com e sem o uso do modelo foram, respectivamente, 2,612 m e 3,269 m.

Para o período do inverno, o modelo polinomial mostrou comportamentos similares àquelas do verão e outono. Com exceção do dia 184, cujo erro foi de 2,1 m, nos demais foi sempre inferior a 1,9 m.

Ao analisar os sete dias de processamento (Figuras 6 e 7), os erros médios quadráticos horizontais com e sem o uso de modelo ionosférico, foram de 1,701 m e 3,227 m, respectivamente.

Em relação ao erro vertical, nos sete dias de processamento, os valores médios foram 3,036 m e 3,492 m, respectivamente, com e sem o uso de modelo o que, do ponto de vista prático, não foi tão significativo.

Para a primavera, os resultados encontrados foram semelhantes aos anteriormente obtidos. Ao analisar os sete dias de processamento, os valores médios do erro horizontal foram, com e sem o uso de modelo, respectivamente, de 1,884 m e 4,655 m. As Figuras 8 e 9 ilustram os erros médios quadráticos horizontais e os desvios padrão para os dias da primavera estudados.

Em relação ao erro vertical, o modelo polinomial proporcionou melhores resultados se comparado com o período do

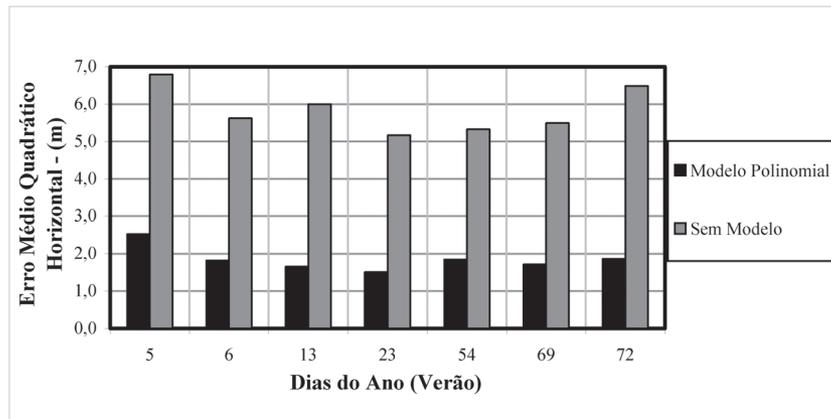


Figura 2. Erro médio quadrático horizontal do vértice BRAZ referente a alguns dias do verão, com e sem a utilização de modelo ionosférico.

Figure 2. Mean square horizontal error of the BRAZ vertex in relation to some summer days, with and without the use of an ionospheric model.

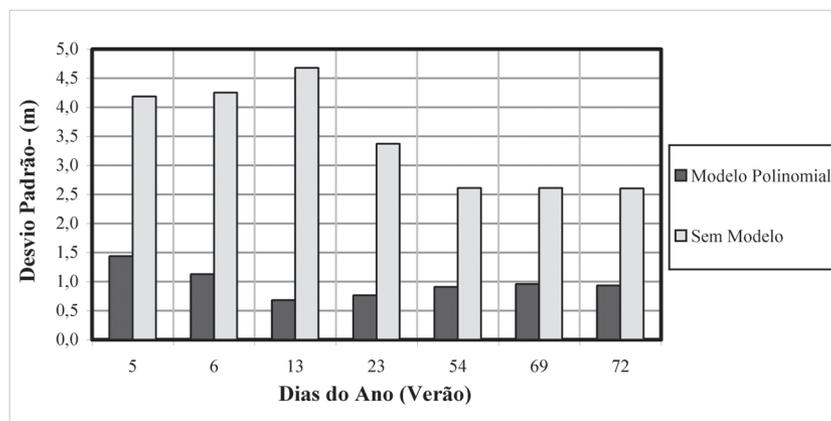


Figura 3. Desvio padrão do vértice BRAZ referente a alguns dias do verão, com e sem a utilização de modelo ionosférico.

Figure 3. Standard deviation of the BRAZ vertex in relation to some summer days, with and without the use of an ionospheric model.

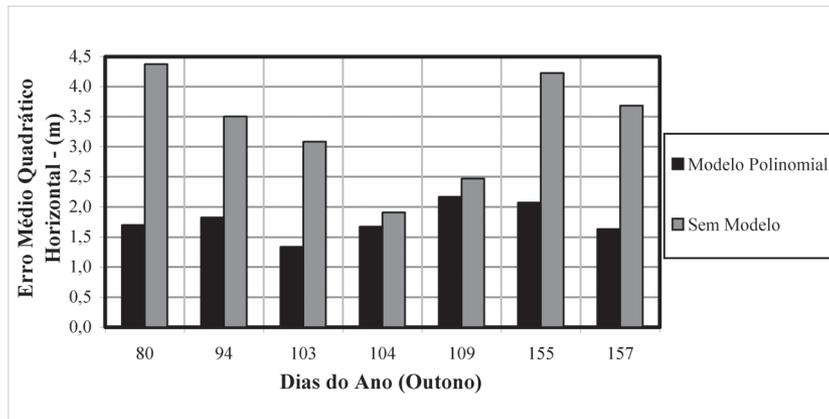


Figura 4. Erro médio quadrático horizontal do vértice BRAZ referente a alguns dias do outono, com e sem a utilização de modelo ionosférico.

Figure 4. Mean square horizontal error of the BRAZ vertex in relation to some autumn days, with and without the use of an ionospheric model.

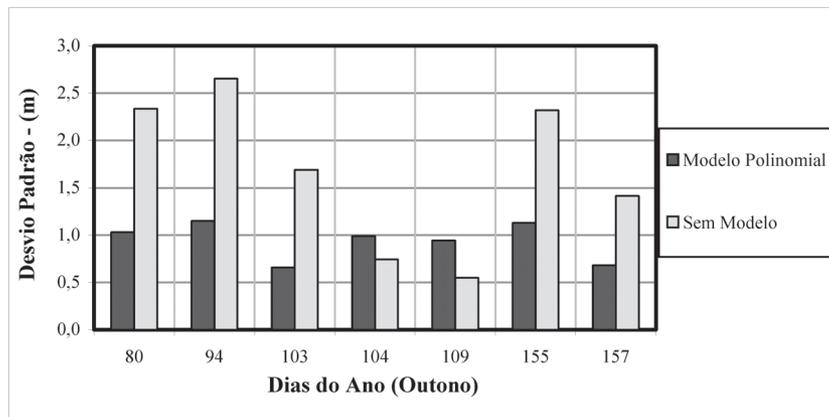


Figura 5. Desvio padrão do vértice BRAZ referente a alguns dias do outono, com e sem a utilização de modelo ionosférico.

Figure 5. Standard deviation of the BRAZ vertex in relation to some autumn days, with and without the use of an ionospheric model.

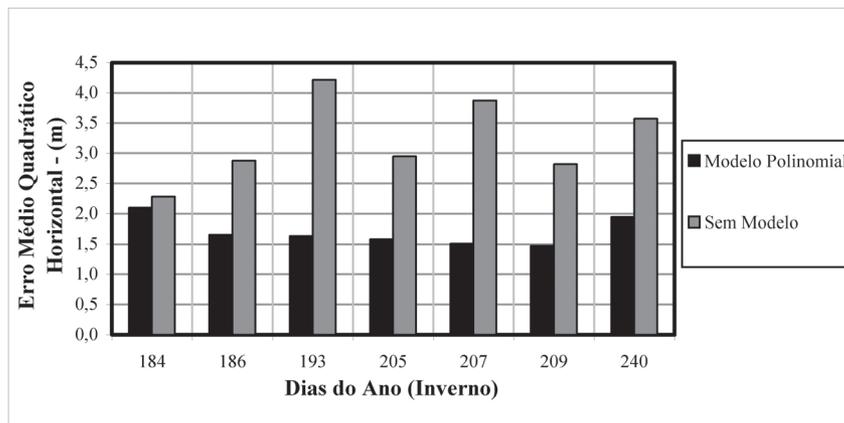


Figura 6. Erro médio quadrático horizontal do vértice BRAZ referente a alguns dias do inverno, com e sem a utilização de modelo ionosférico.

Figure 6. Mean square horizontal error of the BRAZ vertex in relation to some winter days, with and without the use of an ionospheric model.

Tabela 5. Coordenadas UTM do vértice BRAZ tomadas como verdadeiras no processo de validação do modelo ionosférico proposto pelo método *Single Point*.

Table 5. UTM coordinates of the BRAZ vertex considered true in the process of validation of the ionospheric model by the Single Point method.

Vértice	Coordenadas UTM - Elipsóide WGS-84 – Meridiano Central 45°W		
	N(m)	E(m)	h (m)
BRAZ	8234747,061	191901,872	1105,949

Tabela 6. Dias do ano utilizados no processamento de informações GPS para analisar a eficiência do modelo ionosférico proposto.

Table 6. Days of year used in the GPS data processing in order to analyze the efficiency of the proposed ionospheric model.

<i>Dias do Ano</i>													
Verão							Outono						
5	6	13	23	54	69	72	80	94	103	104	109	155	157
X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Inverno							Primavera						
184	185	186	193	194	199	202	298	302	315	318	323	327	329
X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

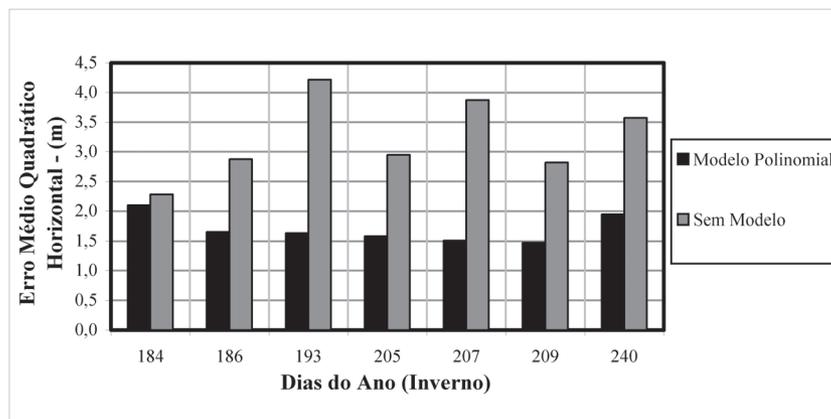


Figura 7. Desvio padrão do vértice BRAZ referente a alguns dias de inverno, com e sem a utilização de modelo ionosférico.
Figure 7. Standard deviation of the BRAZ vertex in relation to some winter days, with and without the use of an ionospheric model.

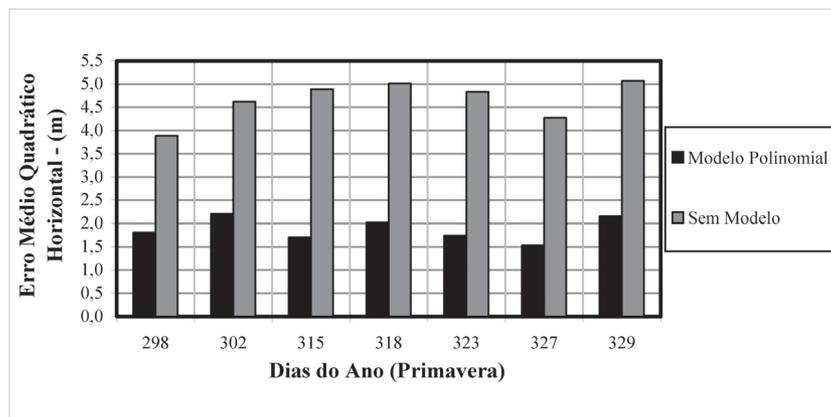


Figura 8. Erro médio quadrático horizontal do vértice BRAZ referente a alguns dias da primavera, com e sem a utilização de modelo ionosférico.
Figure 8. Mean square horizontal error of the BRAZ vertex in relation to some spring days, with and without the use of an ionospheric model.

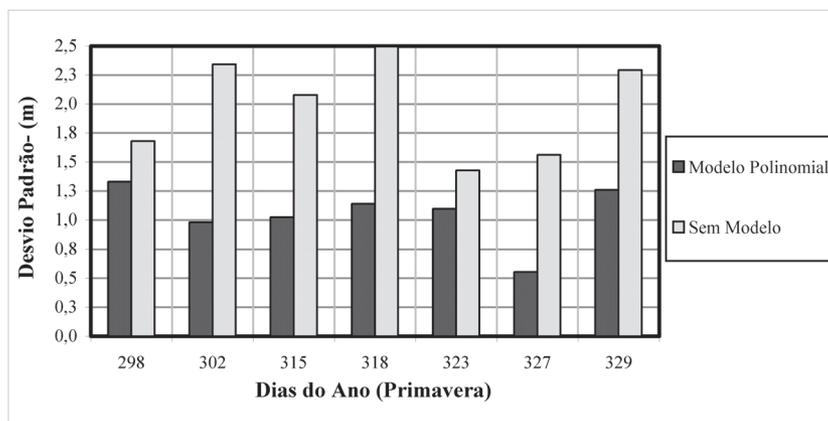


Figura 9. Desvio padrão do vértice BRAZ referente a alguns dias da primavera, com e sem a utilização de modelo ionosférico.
Figure 9. Standard deviation of the BRAZ vertex in relation to some spring days, with and without the use of an ionospheric model.

inverno. Nos sete dias de processamento os valores médios foram, com e sem o uso do modelo, de 2,692 m e 3,510 m, respectivamente.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os resultados encontrados demonstram que o modelo regional estudado, associado com o ajustamento seqüencial de observações, pode ser ferramenta eficiente no processo de filtragem das observações ruidosas geradas pelo efeito da ionosfera.

Verificou-se que uma minimização dos efeitos ionosféricos nas observáveis GPS pode se dar a partir do estudo de modelos específicos para as condições brasileiras. Por meio dos experimentos realizados, o modelo proposto, aplicado ao posicionamento *Single Point*, proporcionou bons resultados em todo o período do dia e para as quatro estações do ano. Em média, a melhora no posicionamento horizontal foi de aproximadamente 60%.

Diante disto, fica ressaltada a importância de se estruturarem outras pesquisas com o intuito de desenvolver modelos matemáticos regionais volta-

dos para as condições ionosféricas encontradas no Brasil. Recomenda-se, ainda, a aplicação de outras técnicas diferentes das que aqui foram utilizadas, como por exemplo, o uso de inteligência artificial através de Redes Neurais Artificiais (RNAs).

REFERÊNCIAS

- ANTUNES, C. 1996. Método seqüencial de ajustamento no tratamento de observações GPS. In: CONFERÊNCIA DE CARTOGRAFIA E GEODÉSIA. Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa – FCUL, Lisboa, Portugal, *Anais*, 1:5-16.
- CAMARGO, P.O. 1999. *Modelo regional da ionosfera para o uso em posicionamento com receptores GPS de uma frequência*. Curitiba, UFPr, Tese de Doutorado, 191 p.
- FONSECA JÚNIOR, E.S. 2002. *O sistema GPS como ferramenta para avaliação da refração ionosférica no Brasil*. São Paulo, Escola Politécnica da USP, Tese de Doutorado, 176 p.
- HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H. e COLLINS, J. 2001. *Global positioning system theory and*

practice. 2ª ed., Springer, New York, 389 p.

HOPFIELD, H.S. 1969. Two-quartic tropospheric refractivity profile for correcting satellite data. *Journal of Geophysical Research*, 74(18):4487-4499.

IBGE. 2007. Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC). Disponível em <<http://www.ibge.gov.br>>, acessado em 06/03/2007.

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

LEICK, A. 2003. *GPS satellite surveying*. 2ª ed., John Wiley & Sons, New York, 560 p.

NEWBY, S.P. e LANGLEY, R.B. 1992. Tree alternative empirical ionospheric models – are they better than GPS broadcast model? In: INTERNATIONAL GEODETIC ON SATELLITE POSITIONING, 6, Columbus, *Proceedings*, 1:240-244.

OSÓRIO, I.M.T.V.P. 1992. *O sistema global de posicionamento na orbitografia de satélites de baixa altitude*. Porto, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, Tese de Doutorado, 189 p.

Submetido em 15/03/07

Aceito em 01/06/07