

ALTURA REAL DA IONOSFERA: UMA COMPARAÇÃO ENTRE DOIS MÉTODOS

Inez S. Batista, Lúcia A.T. Limiro, M.A. Abdu

O perfil de altura real da ionosfera obtido a partir de ionogramas é uma ferramenta muito útil para os estudos ionosféricos. Neste trabalho faz-se uma comparação entre os perfis deduzidos usando dois métodos: POLAN e Digissonda. O POLAN é o método polinomial de cálculo de altura real que tem sido mais usado recentemente pela comunidade científica, para fins de compatibilidade dos resultados. A Digissonda também calcula a altura real usando um método polinomial. A vantagem da Digissonda é que a tarefa de conversão do ionograma em perfil de altura real é bem mais simples uma vez que os dados já estão em forma digital e prontos para serem processados. Foi observado que, para a maioria dos casos analisados no período março/abril de 1990, há uma boa concordância entre os perfis obtidos pelos dois métodos e que, em média, os perfis da Digissonda podem ser usados para os mesmos estudos nos quais o POLAN tem sido usado. Apesar de que algumas discrepâncias tenham sido observadas elas são previsíveis (ocorrem quando a densidade eletrônica da região F, à noite, está muito acima dos valores médios para períodos magneticamente calmos), portanto não invalidariam o uso dos perfis deduzidos pela Digissonda, perante o POLAN. No entanto, é necessária uma revisão dos dois métodos para que a causa dessas discrepâncias seja corrigida.

THE IONOSPHERIC REAL-HEIGHT: A COMPARISON BETWEEN TWO METHODS – The ionospheric real height profiles from ionograms are very useful in ionospheric studies. In this work, the real height profiles deduced using two different methods, POLAN and Digisonde, are intercompared. POLAN is the polynomial method whose use has been recommended by the international scientific community. Digisonde also uses a polynomial method to calculate real height profiles. The advantage of the Digisonde over the POLAN is the facility that it offers to calculate the profiles because, in this case, the data are already in the digital form and ready to be processed. The intercomparison of the results obtained during the period March/April 1990 shows a good agreement of the real height profiles obtained using the two methods. It was also observed that during some disturbed periods the two methods strongly disagree, but this only occurs when the night-time F region peak density is much higher than its quiet-time mean value. It is concluded that Digisonde real height profiles can be used in the same studies in which POLAN are being used, once one pays attention to the discrepancies observed during disturbed periods, at night. It is also suggested that it is necessary to make a revision in the two methods in order to correct for the problems leading to the disagreement between their results in some special cases.

1. INTRODUÇÃO

A técnica de sondagem vertical da ionosfera por ondas de rádio permite que se meça o tempo que um pulso emitido em uma dada frequência, f , leva para percorrer o espaço entre a superfície da Terra e o ponto da ionosfera onde ele foi refletido. Este tempo

multiplicado pela velocidade da luz no vácuo é chamado de altura virtual, h' . Durante um experimento (sondagem) a frequência da onda de rádio é incrementada de forma a se fazer a cobertura de um amplo intervalo de frequências, obtendo-se, dessa forma, um gráfico de altura virtual em função da frequência da onda de rádio transmitida. Esse gráfico é chamado de

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Av. dos Astronautas, 1758, Caixa Postal 515, 12201 São José dos Campos, SP

ionograma. A Fig. 1 mostra um exemplo de um ionograma registrado em Cachoeira Paulista, SP (22°S, 45°O), às 16:50 horas (1950 UT) do dia 20 de junho de 1990, pela Digissonda 256 que é um equipamento

que registra os ionogramas digitalmente e permite o processamento dos dados praticamente em tempo real (Reinisch et al., 1989).

```

-----+-----
+       I N P E - Lab. Sonda / Cachoeira Paulista / Brasil       +
+   Lat. 22.55 Long. 45.00 Beog. fH=0.6 MHz Dip = -28         +
+ DIGISSONDE 256 - VS. 02.90 UNIVERSITY OF LOVELL, USA  BS# 200 +
-----+-----
DIGISSONDE 256
PPPPPPP SS D UU XLIT NRW HEIB PR MUF 100 200 400 600 800 1000 1500 3000 KM
0083100 01 I 20 41D1 634 1239 A1 9.7 9.9 10.3 11.1 12.2 13.8 16.5 29.8 MHZ
foF2 foF1 foE foEs MUF M3000 h'F h'F2 h'E h'E2 fmin fxi fE
9.40 ****/**** ***/3.0P **** 30.5 3.25 222 *** 90 *** 2.80 9.8 *** **
AUTOSCALED TRACES (KM):
2. *****
3. 229. 224. 224. 224. 219. 219. 219. 219. 219.
4. 219. 219. 219. 224. 224. 224. 224. 224. 224.
5. 224. 229. 224. 229. 229. 229. 229. 229. 229.
6. 229. 234. 234. 234. 239. 239. 239. 239. 244.
7. 244. 249. 249. 254. 254. 259. 259. 259. 264.
8. 274. 279. 284. 289. 294. 299. 304. 319. 329.
9. 354. 359. 414. 489. 569.
PROFILE - ULCAR
N = .0 KM
FSTART PEAK HT A0 A1 A2 A3 A4 DEV ROOTS
(MHZ) (KM) (KM) (KM) (KM) (KM) (KM) (KM)/PT
E .199 110.0 20.0 PARABOLIC E MODEL
F1
F2 2.710 261.341-129.819 -2.913 -10.586 -7.080 -.952 13.2 -
    
```

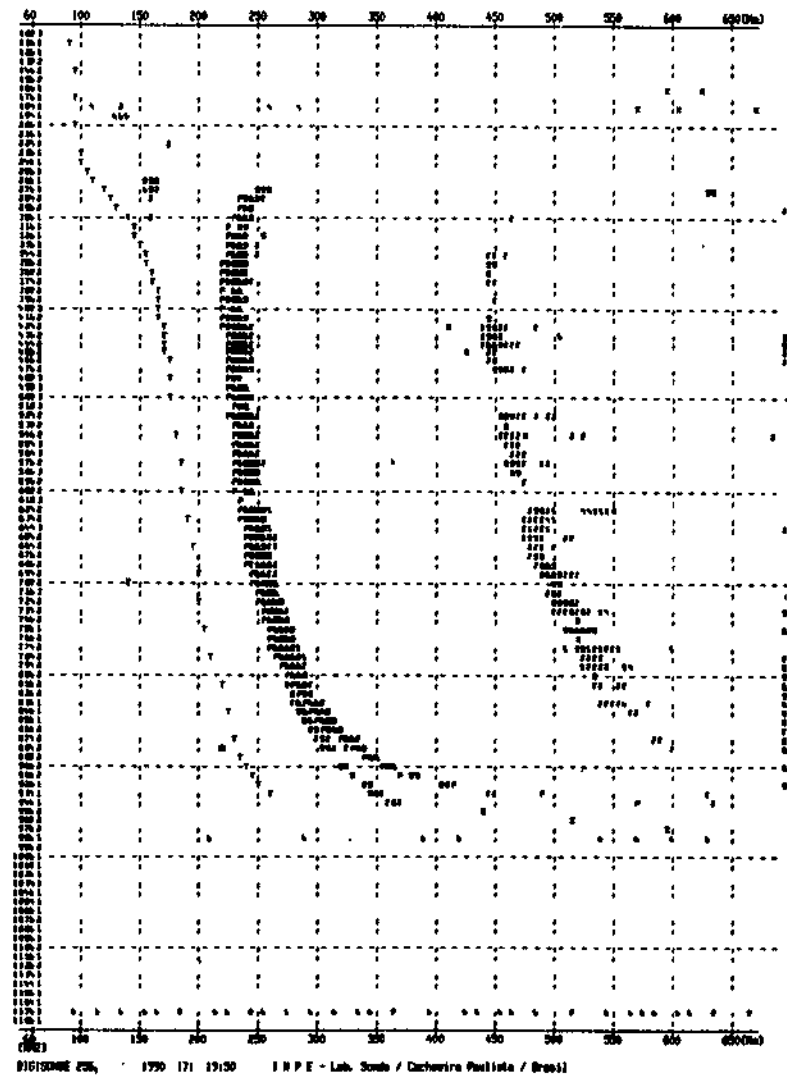


Figura 1. Ionograma registrado pela Digissonda em Cachoeira Paulista.

Figure 1. Digissonde ionogram from Cachoeira Paulista.

2. REVISÃO TEÓRICA

Conhecer apenas a altura virtual em função da frequência, no entanto, não é suficiente para a maioria dos estudos ionosféricos; é necessário conhecer a altura real, h . As duas alturas estão relacionadas pela equação integral.

$$h'(f) = \int_0^{h(f)} \mu'(f, f_N, f_H, \theta, \nu) dh, \quad (1)$$

onde μ' é o índice de refração de grupo, que é função da frequência da onda f , da frequência de plasma na altura de reflexão, f_N , da girofrequência, f_H , da fre-

quência de colisão entre elétrons e partículas neutras, ν , e do ângulo θ que o vetor campo magnético terrestre faz com a direção vertical. O índice de refração de grupo é definido por:

$$\mu' = \frac{d}{df} (f\mu) \quad (2)$$

onde μ é o índice de refração do meio (veja, por exemplo, Ratcliffe (1962)).

Devido à presença do campo magnético terrestre, a onda de rádio emitida se divide em duas componentes, a ordinária e a extraordinária, e o índice de refração é uma função complexa, dada pela equação de Appleton-Hartree

$$n^2 = 1 - \frac{X}{1 - iZ - (1/2) Y_T^2 / (1 - X - iZ) \pm [(1/4) Y_T^4 / (1 - X - iZ)^2 + Y_L^2]^{(1/2)}}, \quad (3)$$

onde $n = \mu - i\chi$ é o índice de refração complexo e

$$X = f_N^2 / f^2,$$

$$Z = \nu / 2\pi f, \quad (4)$$

$$Y_T = f_H \sin \theta / f,$$

$$Y_L = f_H \cos \theta / f.$$

A primeira aproximação que é feita no cálculo do índice de refração é supor o meio sem colisões, ou seja, $Z \ll 1$ na eq. (3). Essa aproximação é válida na região de altura sondada por uma ionossonda (≥ 100 km). No pior caso, para um valor de $\nu = 92000 \text{ seg}^{-1}$ em 100 km (Rishbeth & Garriot, 1969) e uma frequência da onda $f = 1 \text{ MHz}$, a relação $Z = \nu/2\pi f$ seria da ordem de 0,01. A segunda aproximação é supor que a propagação ocorre sempre na direção transversal ao campo magnético e, nesse caso, a eq. (3) torna-se bastante simples e passa a depender apenas das frequências de plasma e da onda. Os índices de refração de grupo para as ondas ordinária (o) e extraordinária (x) serão então dados por (Paul, 1967):

$$\mu'_o = \frac{1}{\sqrt{1 - X}}, \quad (5)$$

$$\mu'_x = \frac{1}{\sqrt{1 - \bar{X}}},$$

$$\text{onde } \bar{X} = f_N^2 / (f^2 - f_H^2).$$

Pode-se observar das eqs. (5) que os índices de refração tendem a infinito quando $X \rightarrow 1$ (onda ordinária) ou $\bar{X} \rightarrow 1$ (onda extraordinária). Essa condição ocorre exatamente na altura onde a onda de rádio é refletida, ou seja, $f_N^2 = f^2(o)$ ou onde $f_N^2 = f^2 - f_H^2(x)$.

Além das simplificações já mencionadas para encontrar-se uma solução para a eq. (1) costuma-se também mudar a variável de integração de h para uma função φ da densidade eletrônica. Os valores mais frequentemente usados para essa função são $\varphi = f_N^2$, f_N e $\log f_N^2$ (Wright & Smith, 1967). Com a transformação a eq. (1) fica dada por:

$$h'(f) = \int_{\varphi_0}^{\varphi(f)} \mu'(f, f_N) \frac{dh}{d\varphi} d\varphi. \quad (6)$$

3. MÉTODOS DE CÁLCULO DO PERFIL DE ALTURA REAL

Os métodos para calcular os perfis de altura real a partir da solução da eq. (1) ou (6) que já foram mais testados e têm sido usados com mais frequência são os laminares e os polinomiais (Paul, 1967; Titheridge, 1988).

O método laminar de primeira ordem, ou laminação linear, pode ser considerado como a primeira solução sistemática para o problema do cálculo da altura

real. Este método consiste em usar uma série de pares de pontos (h_i, f_i) , $i = 1, \dots, n$, lidos no ionograma, e usar estes pontos para determinar as alturas reais de reflexão h_i , nas respectivas frequências. A laminação linear consiste então em supor que, dentro de cada intervalo considerado, a frequência de plasma f_N (ou a densidade eletrônica $\sim f_N^2$) varia linearmente com a altura ($d\phi/dh = \text{cte}$). Com essa suposição o problema se resume em resolver o sistema de n equações com n incógnitas que surge quando os n pares de pontos (h_i, f_i) são substituídos em (6). A precisão dos perfis resultantes é bastante limitada, sobretudo porque não existe continuidade da derivada da função ϕ em cada um dos pontos amostrados. É necessário, portanto, um número bem grande de pontos para se obter uma boa estimativa do perfil, principalmente próximo ao pico de uma camada onde o gradiente $d\phi/dh$ varia rapidamente com a altura.

Uma sensível melhora no cálculo do perfil de altura real é obtida quando a laminação linear é substituída por uma laminação parabólica, por exemplo (método laminar de segunda ordem). Nesse caso o perfil é representado por uma série de parábolas de forma que, em cada ponto, tanto a função quanto a sua derivada são contínuas. Da mesma maneira que na laminação linear, o perfil fica definido a partir dos n parâmetros obtidos para cada uma das n alturas virtuais medidas. Embora este método conduza a resultados melhores que os obtidos com a laminação linear, ele continua pouco preciso nas regiões onde o gradiente $d\phi/dh$ não varia linearmente com a altura, como ocorre próximo aos picos das camadas e onde há pontos de inflexão. Paul & Wright (1963) observaram que um polinômio de segunda ordem conduz aos melhores resultados para esse tipo de laminação. O aumento da ordem do polinômio conduz a instabilidades numéricas.

O método polinomial aborda o problema da solução da eq. (1) de uma maneira diferente do método laminar, supondo que a curva $N(h)$ possa ser representada por um único polinômio sobre o intervalo todo, ou por uma série de polinômios sobre segmentos do intervalo, os quais se superpõem nas extremidades de cada intervalo (Titheridge, 1967). No caso mais simples, usa-se um único polinômio para representar o perfil todo, e são necessárias tantas alturas virtuais quantos forem os coeficientes desconhecidos do polinômio (geralmente de 5 a 10). No entanto o número (n) de coeficientes (ou a ordem do polinômio) é um valor bem crítico pois valores muito altos podem levar a instabilidades da solução. Para a maioria dos casos o número ideal de termos do polinômio fica entre 4 e 6 (Titheridge, 1985). Por esse motivo o método de polinômios superpostos costuma ser mais conveniente na maioria dos casos. Nesse caso usa-se um polinômio diferente para cada intervalo, tomando-se o cuidado para que os

polinômios se ajustem aos dados em ambos os lados do intervalo.

3.1 Cálculo de altura real usando o POLAN

Um método polinomial que tem sido amplamente usado para o cálculo de altura real é o POLAN (POLynomial ANalysis, Titheridge, 1985). Este método supõe a variação da altura real com a frequência dada pela seguinte equação:

$$h(f_N) - h_0 = \sum_{j=1}^n q_j (f_N - f_0)^j = \sum_{j=1}^n q_j A_j, \quad (7)$$

onde o ponto (h_0, f_0) é a "origem" do polinômio de altura real e n é a ordem do polinômio. Este método supõe que o perfil de altura seja conhecido até a altura h_0 , e que o efeito do desvio dos raios ao se propagarem na ionosfera tenha sido levado em conta para corrigir as alturas virtuais nas frequências acima de f_0 , resultando na altura virtual reduzida, h'' . Em cada par (h_i, f_i) a eq. (6) para $\phi = f_N$ assume a forma

$$h'' - h_0 = \int_{f_0}^{f_R} \mu'(f_i, f_N) \frac{dh}{df_N} df_N, \quad (8)$$

onde f_R é a frequência de plasma na altura de reflexão da onda.

Derivando a eq. (7) em relação a f_N obtém-se $dh/df_N = \sum_{j=1}^n j q_j (f_N - f_0)^{j-1}$, cuja substituição em (8) resulta em:

$$h'' - h_0 = \sum_{j=1}^n q_j B_{ij}, \quad (9)$$

onde:

$$B_{ij} = j \int_{f_0}^{f_R} \mu'(f_i, f_N) (f_N - f_0)^{j-1} df_N. \quad (10)$$

O problema agora resume-se em calcular os coeficientes B_{ij} . Uma vez que estes coeficientes sejam conhecidos o conjunto de equações lineares resultantes da expansão de (9) para os diversos pares (h_i, f_i) pode ser resolvido para os q_j s os quais, substituídos em (7) resultarão na solução do problema. A solução da eq. (10) envolve ainda algumas transformações. A primeira delas é usar $(\mu' - 1)$ ao invés de μ' na integração, resultando em:

$$B_{ij} = A_{ij} + C_{ij}, \tag{11}$$

$$C_{ij} = j \int_{f_0}^{f_R} (\mu' - 1) (f_N - f_0)^{j-1} df_N.$$

A outra transformação consiste em mudar a variável de integração de f_N para t , onde $t^2 = 1 - (f_N^2/f_R^2)$. Estas mudanças garantem um integrando bem comportado perto do ponto de reflexão, onde μ' tende a infinito. Dessa forma, C_{ij} será dado por:

$$C_{ij} = j f_R^2 \int_0^{(1-f_0^2/f_R^2)^{1/2}} (\mu' - 1) \frac{t}{f_N} (f_N - f_0)^{j-1} dt. \tag{12}$$

Observa-se que $t = 0$ no ponto de reflexão $f_N = f_R$. A eq. (12) é resolvida usando uma integração Gaussiana de m pontos. O integrando é calculado em cada um dos m pontos do intervalo. Dessa forma, tem-se:

$$C_{ij} = t_0 j f_R^2 \sum_{k=1}^m G_k W_k (f_{N_k} - f_0)^{j-1}, \tag{13}$$

onde $t_0 = (1 - f_0^2/f_R^2)^{1/2}$, $G_k = (\mu'_k - 1) t_k / f_{N_k}$, $f_{N_k} = f_R (1 - t_k^2)^{1/2}$ e os W_k 's são os pesos Gaussianos correspondentes. Dessa forma os C_{ij} são determinados, e como os coeficientes A_{ij} são determinados diretamente a partir dos ionogramas, os B_{ij} tornam-se conhecidos para cada par (i,j) , onde i representa o ponto no ionograma e j representa a ordem do polinômio usado na expressão. Dessa forma, o sistema de eqs. (9) fica completamente determinado quando se usam n pares $(h_i'; f_i)$, onde n é a ordem do polinômio. Nesse caso, o sistema de equações pode ser representado por:

$$\begin{pmatrix} h_1'' - h_0 \\ h_2'' - h_0 \\ \vdots \\ h_n'' - h_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} B_{11} & B_{12} & \dots & B_{1n} \\ B_{21} & B_{22} & \dots & B_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ B_{n1} & B_{n2} & \dots & B_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \\ \vdots \\ q_n \end{pmatrix} \tag{14}$$

que conduz a uma solução única para os q_j 's. Logo, a solução do problema pode ser encontrada através da eq. (7).

3.2 Cálculo da altura real pela Digissonda

A conversão de altura virtual em altura real nunca foi feita sistematicamente pelos observatórios ionosféricos por ser um processo muito trabalhoso. Atualmente, com as ionossondas digitais acopladas a microcomputadores, esta tarefa tem-se tornado bem mais simples, uma vez que os parâmetros ionosféricos são reduzidos automaticamente e a conversão para altura real pode ser feita alguns segundos após o registro do ionograma. A Digissonda 256 (Reinisch et al., 1989) é um equipamento que possui esse tipo de facilidade, e tem o seu método próprio para resolver o problema de altura real (Reinisch & Huang, 1982, 1983; Huang & Reinisch, 1982). O método usado é o polinomial, porém difere do POLAN em alguns pontos e as principais diferenças serão apontadas aqui.

A formulação é simplificada pelo uso de frequências reduzidas, definidas por:

$$\begin{aligned} f_i &= f_i^2 && \text{para o traço O} \\ f_i &= f_i^2 - f_i f_H && \text{para o traço X,} \\ f_i &= f_i^2 + f_i f_H && \text{para o traço Z,} \end{aligned} \tag{15}$$

de forma que a condição de reflexão de cada componente é dada por $f_i = f_N$.

Nesta formulação, a transformação de coordenadas usada para integrar a eq. (6) é $t^2 = (f_i^2 - f_N^2)/(f_i^2 - f_0^2)$. Com essa substituição, e tomando $\varphi = f_N^2$, a eq. (6) ficará

$$h'(f_i) = 2 (f_i^2 - f_0^2) \int_0^1 \mu' t \frac{dh}{df_N^2} dt. \tag{16}$$

Analogamente ao POLAN, supõe-se que a altura real possa ser expandida em polinômios

$$h = q_{n+1} + g^{1/2} \sum_{j=0}^n q_j T_j^*(g), \tag{17}$$

onde $g(t) = \ln(f_N/f_{N_m})/\ln(f_0/f_{N_m})$, $f_N^2 = f_i^2 - t^2(f_i^2 - f_0^2)$; $0 \leq g \leq 1$. f_{N_m} é a frequência crítica da camada e $T_j^*(g)$ são polinômios de Chebyshev (Huang & Reinisch, 1982) que podem ser calculados a partir de

$$\begin{aligned} T_j^*(g) &= 2(2g - 1) T_{j-1}^*(g) - T_{j-2}^*(g), \\ T_0^*(g) &= 1, \\ T_1^*(g) &= 2g - 1. \end{aligned} \tag{18}$$

Da definição de $g(t)$ pode-se observar que em $f_N = f_{N_m}$, $g(t) = 0$, portanto $h_m = q_{n+1}$. Analogamente, em $f_N = f_0$, $g(t) = 1$, $T_j^*(1) = 1$ e a altura nesse ponto, denotada por h_0 , será dada por $h_0 = q_{n+1} + \sum_{j=0}^n q_j$. Dessa forma tem-se que

$$h_m - h_0 = - \sum_{j=0}^n q_j. \quad (19)$$

Usando o procedimento análogo ao POLAN, po-

$$B_{ij} = \frac{f_i^2 - f_0^2}{2 \ln(f_0^2 / f_{N_m}^2)} \int_0^1 \frac{\mu' t}{f_N^2 g^{1/2}} \left\{ T_i^*(g) + 2g \frac{d}{dg} T_i^*(g) \right\} dt. \quad (21)$$

As eqs. (20) e (21) são equivalentes às (9) e (10) (note-se também as eqs. (11) e (12)) da formulação POLAN, e a eq. (17) é equivalente à (7).

A abordagem usada para resolver a eq. (20) para os coeficientes q_j 's é a de minimizar o erro entre os valores de h_i calculados por essa equação e lidos no ionograma, através do método dos mínimos quadrados, ou seja, minimiza o erro

$$\epsilon = \sum_{i=1}^m [h_i - (\Delta h_{Ei} + \Delta h_{Vi} + \sum_{j=0}^n q_j B_{ij})]^2, \quad (22)$$

onde i é o número de pontos no traço da camada F. Minimizar este erro significa resolver o conjunto de equações dado por:

$$\sum_{i=1}^m (h_i - \Delta h_{Ei} - \Delta h_{Vi}) B_{ik} = \sum_{j=0}^n q_j C_{jk}, \quad (23)$$

onde

$$C_{jk} = \sum_{i=1}^m B_{ij} B_{ik} \quad j, k = 0, 1, \dots, n. \quad (24)$$

Aqui, como no caso do POLAN, o problema agora resume-se em calcular os coeficientes B_{ij} . Porém, a solução não pode ser obtida diretamente pois a solução da eq. (21) depende de f_i e de μ' , que dependem ambos do perfil que é a incógnita do problema. A abordagem adotada para resolver (21) é a iterativa. Supõe-se um perfil inicial $f(h)$, conhecido. As eqs. (15) e (21) podem então ser resolvidas e os B_{ij} calculados são introduzidos em (23), conduzindo a uma

de-se derivar a eq. (17) em relação a f_N^2 e substituir o resultado em (16), de forma que

$$h''(f_i) = h'(f_i) - \Delta h'_E - \Delta h'_V = \sum_{j=0}^n q_j B_{ij}, \quad (20)$$

onde $h''(f_i)$ é a altura virtual reduzida e $\Delta h'_E$ e $\Delta h'_V$ são as correções em h' devidas à ionização abaixo da camada e à região do vale, quando for o caso, e

primeira aproximação para os q_j 's. No processo iterativo tem-se que levar em consideração o problema do vale, e alguns parâmetros são variados de forma a conseguir minimizar o erro dado pela eq. (22) (Reinisch & Huang, 1983). Os q_j 's calculados são então usados na eq. (17) para fornecer o perfil de altura real.

Um outro problema que deve ser resolvido no cálculo de altura real a partir de ionogramas é a inclusão do vale entre as regiões E e F, e a inclusão da densidade eletrônica que não é medida pelo equipamento, ou seja, aquela cuja frequência de plasma está abaixo de f_{min} , mínima frequência que produz um eco recebido pelo receptor. Os detalhes de como esse problema é resolvido nos dois métodos aqui analisados estão dados em Titheridge (1985) e Reinisch & Huang (1983).

4. COMPARAÇÃO ENTRE OS PERFIS DE ALTURA REAL CALCULADOS PELO POLAN E PELA DIGISSONDA

Neste trabalho faz-se uma comparação entre os perfis de altura real calculados pela Digissonda e aqueles calculados usando o método POLAN. Os dados usados na comparação foram registrados em Cachoeira Paulista (22°S, 45°O) por meio de uma Digissonda 256 instalada naquele local em março de 1990. A Fig. 2 mostra um conjunto de perfis de altura real da ionosfera (densidade eletrônica em função de altura) para diferentes horários e diferentes dias. Pode-se observar que a concordância entre os perfis de altura real deduzidos pelos dois métodos é muito boa, em torno do pico da região F. As discrepâncias observadas, principalmente à noite, são devidas ao tratamento diferente que os dois métodos deram para a densidade eletrônica não medida pelo equipamento. A Digissonda sempre usa um modelo ionosférico para essa ionização

que não é detectada, enquanto que o POLAN processou os mesmos dados supondo ausência de ionização abaixo de f_{\min} . No entanto, o POLAN também prevê a possibilidade de uma ionização abaixo de f_{\min} , e usa alguns modelos para o seu cálculo. Na Fig. 3 mostra-

se o perfil de altura real calculado pelo POLAN sob três condições iniciais diferentes:

- Start = -1: supõe-se ausência de ionização abaixo de f_{\min} (esta foi a condição usada nos exemplos mostrados na Fig. 2);

CACHOEIRA PAULISTA

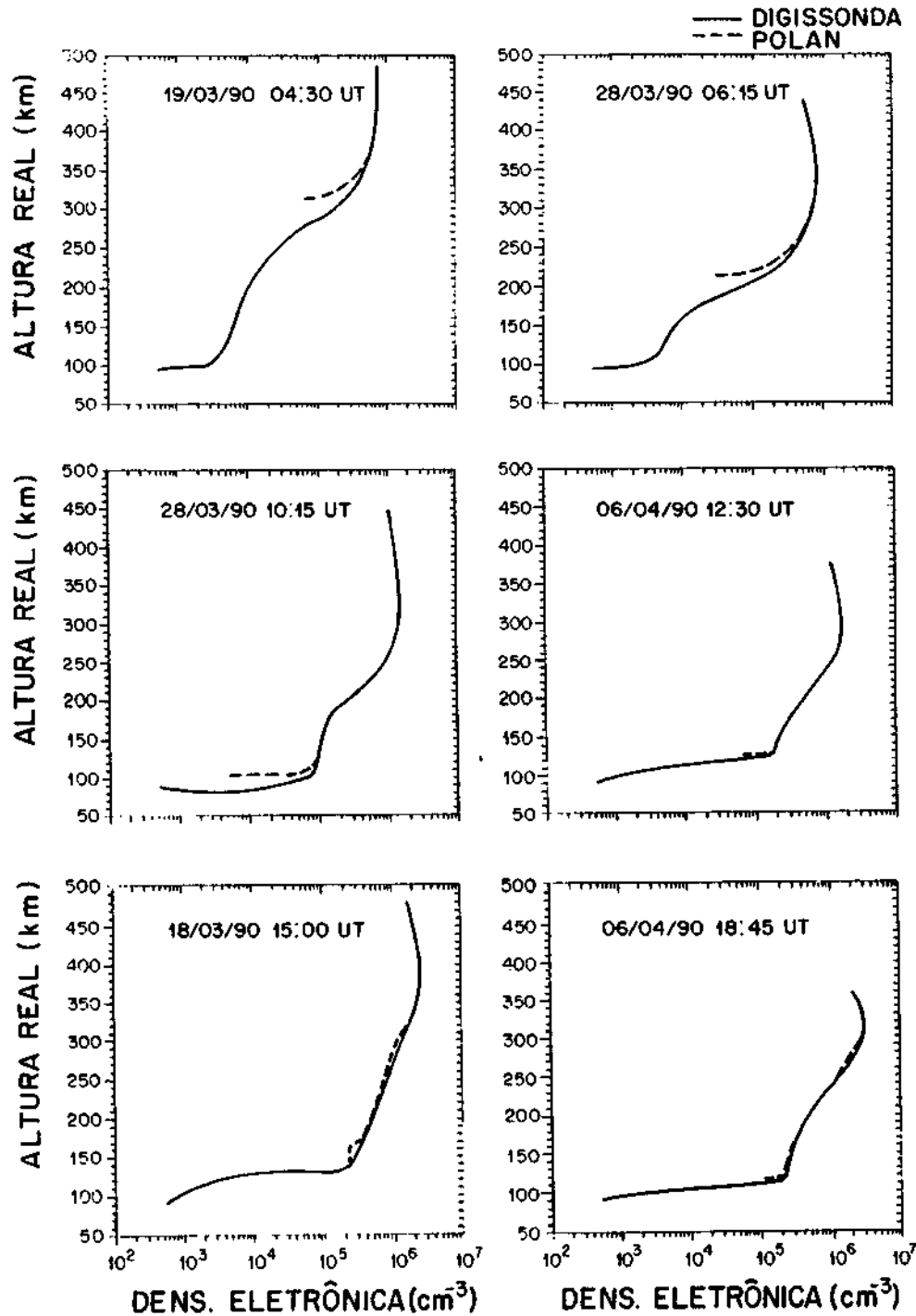


Figura 2. Comparação entre os perfis de altura real obtidos pelo POLAN e pela Digissonda.

Figure 2. Real height profiles from POLAN and from Digissonde.

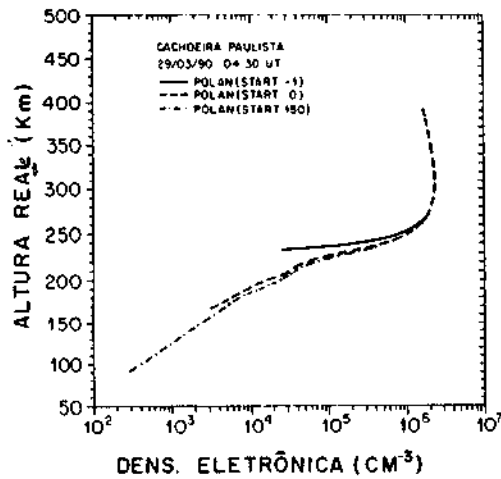


Figura 3. Perfis de altura real calculados pelo POLAN para três "starts" diferentes.

Figure 3. Real height profiles from POLAN for three different starts.

- Start = 0: extrapola a curva da altura virtual até $f = 0$ e toma o ponto (f_0, h_0) , onde $f_0 = 0,5$ MHz e $h_0 = h'$ ($f=0$) como sendo o ponto inicial da curva de altura real;

Start > 44: inicia a análise em (f_0, h_0) onde $f_0 = 0,5$ MHz e $h_0 = \text{start}$ (em km).

Dessa forma, pode-se observar que variando o parâmetro "start" no POLAN a condição inicial será alterada. Na Fig. 4 mostra-se uma comparação entre o perfil de altura real deduzido pela Digissonda e perfis

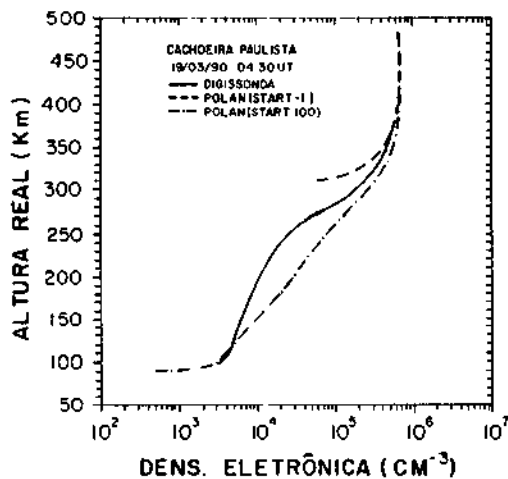


Figura 4. Comparação entre perfis de altura real obtidos pelo POLAN para dois "starts" diferentes, com o perfil deduzido pela Digissonda.

Figure 4. Real height profiles from POLAN for two different starts and from Digissonda.

CACHOEIRA PAULISTA

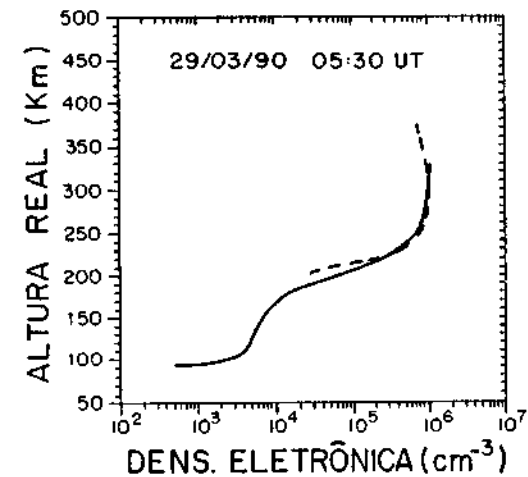
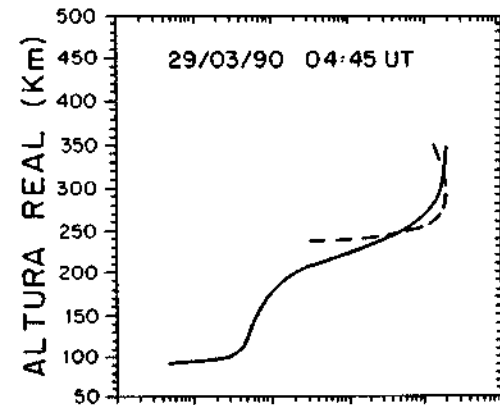
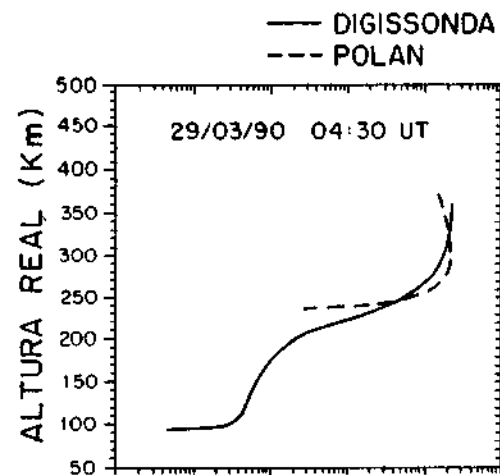


Figura 5. Comparação entre os perfis de altura real obtidos pelo POLAN e Digissonda para três casos em que os resultados não concordam.

Figure 5. POLAN and Digissonde real height profiles for three cases when the two methods are not coincident.

deduzidos pelo POLAN com dois "starts" diferentes. Nota-se que perfil do POLAN que usa condições iniciais semelhantes às usadas pela Digissonda (start = 100, ou seja $f_0 = 0,5$ MHz e $h_0 = 100$ km) é o que mais se assemelha ao perfil da Digissonda. Sob este aspecto o POLAN apresenta vantagens sobre o método de cálculo de altura real da Digissonda, a qual usa um modelo fixo para a densidade eletrônica não detectada pelo equipamento. Devido à variabilidade da ionosfera esta ionização também pode variar e o POLAN permite incluir tais variações no cálculo do perfil de altura real.

Embora para a maior parte dos casos analisados, o perfil de altura real deduzido pela Digissonda concorde muito bem com aquele deduzido pelo POLAN, pelo menos para a região F, alguns casos foram observados em que isso não é verdade. A Fig. 5 mostra uma seqüência de perfis sobre Cachoeira Paulista obtidos em 29 de março de 1990 entre 0130 e 0230 horas (0430 e 0530 UT). À 0130 (0430 UT) a altura do pico da camada F (altura onde a densidade é máxima) deduzida pela Digissonda está mais que 50 km mais alta que a deduzida pelo POLAN. Esta diferença vai diminuindo nos perfis seguintes e por volta de 0300 os dois métodos voltam a coincidir. É importante ressaltar que mudanças nas condições iniciais (diferentes "starts") do POLAN não explicariam a discrepância observada pois produzem diferenças apenas nas partes mais baixas do perfil, e não próximo ao pico da camada F, como pode ser verificado na Fig. 3.

Na madrugada do dia 29 de março de 1990 os valores da densidade eletrônica da camada F estavam bem mais altos que os valores médios geralmente observados naqueles horários ($> 2 \times 10^6$ el.cm⁻³ no pico da região F, enquanto os valores normais são da ordem de 7×10^5 el.cm⁻³). Observou-se que à medida que a densidade eletrônica no pico da região F foi diminuindo e, conseqüentemente, aproximando-se dos valores normais para o horário, a discrepância entre os perfis calculados pelos dois métodos também foi diminuindo, até desaparecer totalmente. A identificação dos processos físicos que levaram a esse comportamento anômalo da região F não é o objetivo desse trabalho, porém algumas hipóteses podem ser levantadas. O período entre 18 e 29 de março foi relativamente perturbado, com $\Sigma K_p > 30$ durante quase todo esse intervalo. O efeito das perturbações magnéticas na ionosfera é um fato já bem estudado (veja, por exemplo, Batista et al., 1991) e pode, nesse caso, ter contribuído para afetar o comportamento da região F, sobre Cachoeira Paulista. No entanto, o que é importante ressaltar aqui é que as discrepâncias observadas entre o pico da camada F obtido pelo POLAN e pela Digissonda ocorrem apenas à noite, durante períodos em que a densidade eletrônica do pico da região F está bem maior

que os valores médios normais para o horário, independente do fenômeno que ocasionou tal elevação.

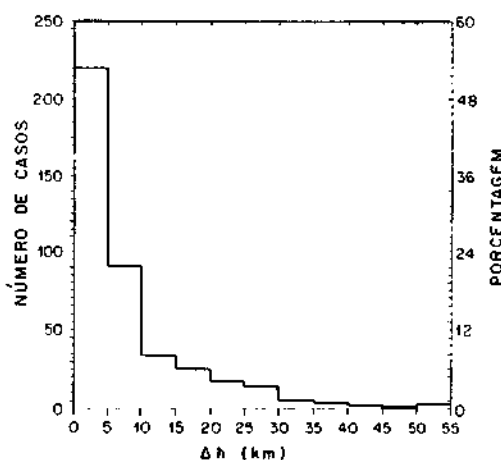


Figura 6. Diferenças entre a altura calculada pelo POLAN e pela Digissonda, para uma mesma frequência.

Figure 6. Height difference between POLAN and Digisonde for fixed frequencies.

A fim de representar quantitativamente a diferença entre os perfis de altura real obtidos pelo POLAN e pela Digissonda foi feito o seguinte procedimento. Foram tomados 416 pontos (frequência, altura real) em 21 perfis reduzidos pela Digissonda (f^o , h_D). Para a mesma frequência, tomou-se o ponto (f , h_P) nos perfis equivalentes reduzidos usando o POLAN, e fez-se a diferença $\Delta h = |h_D - h_P|$. Os valores de Δh foram então agrupados em intervalos de 5 km e o resultado é mostrado na Fig. 6, na forma de histogramas. Observa-se que em 53% dos casos analisados a diferença é menor ou igual a 5 km e que em 75% dos casos a diferença é menor ou igual a 10 km.

5. CONCLUSÕES

Foi feita uma comparação entre perfis de altura real obtidos pela Digissonda e pelo POLAN e observou-se que os dois métodos fornecem resultados similares para a maioria dos ionogramas. Alguns casos de discrepâncias foram observados, restritos a eventos anômalos da densidade eletrônica da camada F noturna. Observou-se que quando a densidade eletrônica da camada F à noite está muito acima (duas vezes) dos valores médios para períodos magneticamente calmos, a altura do pico da camada F calculada pela Digissonda está mais que 50 km mais alta que a deduzida pelo POLAN. Esta discrepância não pode ser atribuída às condições iniciais (ionização não detectada pelo equipamento) usadas pelos dois métodos, portanto deve estar embutida na própria formulação conceitual dos

mesmos. Como as discrepâncias são previsíveis é recomendável que seja feita uma avaliação dos dois métodos e, se possível, comparar os resultados com medidas "in loco" por foguetes durante os períodos em que há discrepância.

Como os dois métodos estão de acordo para a maioria dos casos, e as discrepâncias observadas podem ser previstas, pode-se recomendar o uso dos perfis de altura real obtidos pela Digissonda nos estudos em

que o POLAN está sendo recomendado, sem risco de perda da padronização.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi parcialmente subvencionado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (Processo 88/2091-0) e pelo CNPq.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BATISTA, L.S., DE PAULA, E.R., ABDU, M.A., TRIVEDI, N.B. & GREENSPAN, M - 1991 - Ionospheric effects of the 13 March 1989 magnetic storm at equatorial and low latitudes. *J. Geophys. Res.*, **96**: 13943-13952.
- HUANG XUEQUIN & REINISCH, B.W. - 1982 - Automatic calculation of electron density profiles from digital ionograms. 2. True height inversion of topside ionogram with the profile-fitting method. *Radio Sci.*, **17**: 837-844.
- PAUL, A.K. - 1967 - Ionospheric electron-density profiles with continuous gradients and underlying ionization corrections. I. The mathematical-physical problem of real-height determination from ionograms. *Radio Sci.*, **2**: 1127-1133.
- PAUL, A.K. & WRIGHT, J.W. - 1963 - Some results of a new method for obtaining ionospheric N(h) profile and their bearing on the structure of the lower F region. *J. Geophys. Res.*, **68**: 5413-5420.
- RATCLIFFE, J.A. - 1962 - The magneto-ionic theory and its applications to the ionosphere. Cambridge University Press, London, 206 pp.
- REINISCH, B.W. & HUANG XUEQUIN - 1982 - Automatic calculation of electron density profiles from digital ionograms. 1. Automatic O and X trace identification for topside ionograms. *Radio Sci.*, **17**: 421-430.
- REINISCH, B.W. & HUANG XUEQUIN - 1983 - Automatic calculation of electron density profiles from digital ionograms. 3. Processing of bottomside ionograms. *Radio Sci.*, **18**: 477-492.
- REINISCH, B.W., BIBL, K., KITROSSER, D.F., SALES, G.S., TANG, J.S., ZHANG, Z.M., BULLET, T.W. & RALLS, J.A. - 1989 - The Digisonde 256 ionospheric sounder. In *World Ionosphere/Thermosphere study* (C.H. Liu, ed.). *WITHS Handbook*, vol 2, SCOSTEP, University of Illinois, Urbana, Illinois, 350-382.
- RISHBETH, H. & GARRIOT, O.K. - 1969 - *Introduction to ionospheric physics*. Academic Press, New York, 331 pp.
- TITHERIDGE, J.E. - 1967 - The overlapping-polynomial analysis of ionogram. *Radio Sci.*, **2**: 1169-1175.
- TITHERIDGE, J.E. - 1985 - Ionogram analysis with the generalised program POLAN. US Department of Commerce, NOAA, Boulder, CO, 194 pp. (Report UAG-93).
- TITHERIDGE, J.E. - 1988 - The real height analysis of ionograms: a generalized formulation. *Radio Sci.*, **22**: 831-849.
- WRIGHT, J.W. & SMITH, G.H. - 1967 - Introductory paper Review of Current Methods for Obtaining Electron-Density Profiles from Ionograms. *Radio Sci.*, **2**: 1119-1125.

Versão recebida em: 01/01/91

Versão revista e aceita em: 26/06/91

Editor Associado: V.W.J.H. Kirchoff