

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-6138-PRP/201

MODELO IONOSFÉRICO EM BAIXAS LATITUDES NO BRASIL

RELATÓRIO FINAL

Letícia Teixeira Cottini
Inez Staciarini Batista

Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC/CNPQ)

NPE
São José dos Campos
fevereiro de 1997

RESUMO

A densidade eletrônica é um parâmetro muito importante para estudos geofísicos e para as telecomunicações trans-ionosféricas. O conhecimento prévio da densidade eletrônica é útil em diversas aplicações, tais como rádio-astronomia, geodésia espacial e navegação de satélites e veículos espaciais. Os sistemas de GPS (Global Positioning System), que estão sendo amplamente utilizados nas mais diversas aplicações, necessitam de um modelo ionosférico preciso, para produzirem resultados de alta confiabilidade.

Os modelos ionosféricos globais, tais como o IRI (International Reference Ionosphere), não são adequados para representar a densidade eletrônica ionosférica na região em estudo. Sendo assim, este trabalho tem por objetivo criar um modelo ionosférico para prever o comportamento da ionosfera de baixas latitudes na região brasileira.

Os dados utilizados foram obtidos entre 1990 e 1993, através de uma Digissonda instalada em Cachoeira Paulista. Foram utilizados os cinco dias magneticamente mais calmos de cada mês para formar a base de dados do modelo.

Como a quantidade de dados não era suficiente para se obter uma boa representatividade em uma base mensal, os dados foram agrupados em estações do ano. Além disso, os dados não estão uniformemente distribuídos em relação ao número de manchas solares.

Uma vez que todos os coeficientes foram gerados e passaram a fazer parte de um banco de dados, o modelo consiste de um programa bastante simples, para o qual o usuário deve fornecer, como parâmetro de entrada, a “estação do ano” e o “número médio de manchas solares” do período em questão, e o modelo fornece, como

saída, os valores horários da densidade eletrônica média, para a época solicitada, para as 24 horas do dia.

Os resultados do modelo foram testados para alguns casos específicos, mostrando boa concordância. Sugere-se a ampliação da base de dados de entrada para se obter maior representatividade, tanto ao longo do ano (base mensal) quanto em termos de número de manchas solares, para que o modelo possa ficar mais preciso.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS-----	viii
LISTA DE TABELAS -----	ix
1. INTRODUÇÃO-----	1
2 - AJUSTE DE FUNÇÕES - Princípio do mínimos quadrados de Legendre -----	2
3. ANÁLISE DE DADOS -----	3
3.1 - Ajuste de curvas -----	3
3.2 - Elaboração do modelo -----	8
4. CONCLUSÃO - -----	21
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS -----	22
APÊNDICE A - Listagem do programa “POLI.C” -----	23
APÊNDICE B - Listagem do programa “RECIPES.C” -----	25
APÊNDICE C - Gráficos de comparação entre os métodos de ajuste utilizados -----	31
APÊNDICE D - Listagem do programa “DIONCP.C”-----	48
APÊNDICE E - Gráficos elaborados utilizando-se arquivos de densidade pelo modelo.-----	50

LISTA DE FIGURAS

3.1 - Ajuste de curva feito através do aplicativo “ <i>Grapher for Windows</i> ”-----	4
3.2 - Ajuste de curva feito com os coeficientes gerados pelo “Grapher for Windows” ---	5
3.3 - Ajuste de curva feito com os coeficientes gerados pelo “RECIPES.C” -----	7
3.4 - Comparação entre as curvas da média e as ajustadas através dos coeficientes gerados pelo “Grapher for Windows” e dos gerados pelo programa “RECIPES” --	8
3.5 - Gráfico da interpolação linear para Primavera à 01:00 hora universal -----	15
3.6 - Gráfico da interpolação linear para Primavera às 13:00 hora universal -----	15
3.7 - Arquivo de saída do programa DIONCP.C para Primavera, com número de manchas solares igual a 120.30-----	19
3.8 - Gráfico de comparação entre a curva gerada pelo dado real e gerada pelo modelo.	20
C1 - Gráficos de comparação entre os métodos de ajuste utilizados -----	32
E1 - Gráficos elaborados utilizando-se arquivos gerados pelo modelo.-----	51

LISTA DE TABELAS

3.1 - Densidade eletrônica (cm^{-3}) - inverno (dados interpolados)-----	9
3.2 - Densidade eletrônica (cm^{-3}) - verão (dados interpolados)-----	10
3.3 - Densidade eletrônica (cm^{-3}) - primavera (dados interpolados)-----	11
3.4 - Densidade eletrônica (cm^{-3}) - outono (dados interpolados)-----	12
3.5 - Coeficientes da reta $y=ax+b$ - primavera e verão-----	16
3.5 - Coeficientes da reta $y=ax+b$ - outono e inverno-----	17

1. INTRODUÇÃO

A densidade eletrônica é um parâmetro muito importante para estudos geofísicos e para as telecomunicações trans-ionosféricas. O conhecimento prévio da densidade eletrônica é útil em diversas aplicações, tais como rádio-astronomia, geodésia espacial e navegação de satélites e veículos espaciais. Os sistemas de GPS (Global Positioning System), que estão sendo amplamente utilizados nas mais diversas aplicações, necessitam de um modelo ionosférico preciso, para produzirem resultados de alta confiabilidade.

Este trabalho foi desenvolvido com o objetivo de se criar um modelo ionosférico para prever o comportamento da ionosfera de baixas latitudes na região brasileira, para condições ionosféricas magneticamente não perturbadas. Este modelo tem como finalidade gerar curvas de densidade eletrônica, de acordo com a data e o número de manchas solares fornecidos pelo usuário.

Os dados utilizados neste trabalho foram obtidos através de uma Digissonda (ionossonda digital) instalada em Cachoeira Paulista, SP. Estes dados foram tratados até passarem a fazer parte de arquivos que contêm a média dos cinco dias menos perturbados de cada mês (mais detalhes sobre o tratamento de tais dados podem ser encontrados em Cottini e Batista, 1995).

Os conceitos básicos indispensáveis ao bom entendimento deste trabalho tais como os conceitos de ionosfera, ionossonda, ionograma, os fundamentos do modelo IRI, conceitos de perturbação magnética, critérios usados para classificar os períodos em magneticamente calmos ou perturbados podem ser encontrados em Cottini e Batista, (1995).

2 - AJUSTE DE FUNÇÕES

(Princípio dos mínimos quadrados de Legendre)

Quando se trabalha com resultados experimentais, nem sempre a solução desejada $f(x)$ é obtida, conhecendo-se apenas uma aproximação $g(x)$ para ela. Via de regra, a diferença entre essas funções é uma flutuação aleatória indesejável, devendo, portanto, ser removida para conveniente interpretação do resultado.

Em geral, a relação funcional $f(x)$ é também desconhecida, usando-se para ela uma aproximação $\phi(x)$, dada pela combinação de funções mais simples $\phi_i(x)$ (Zamlutti, 1982).

O princípio de Legendre é obtido do critério dos resíduos ponderados, usando-se como função peso, $\omega(x)$, o valor:

$$\omega(x) = q(x) r(x),$$

onde $q(x)$ é o valor relativo à qualidade da medida, e $r(x)$ é o resíduo dado pela diferença:

$$r(x) = g(x) - \phi(x).$$

O erro, ε , da aproximação é dado por:

$$\varepsilon = \left\langle U \left[r(x) \right]^2, U \left[w(x) \right] \right\rangle = \int_a^b q(x) r^2(x) dx.$$

No caso discreto a integral reduz-se a uma somatória.

O princípio de Legendre estabelece como melhor aproximação aquela que minimiza o valor de ε acima.

3. ANÁLISE DOS DADOS

3.1- Ajuste de curvas

Os ajustes das curvas de média foram feitos de duas maneiras distintas. Em uma primeira etapa, foram feitos ajustes polinomiais na curva da média de cada mês, utilizando-se o aplicativo "Grapher for Windows", o qual gera automaticamente os respectivos arquivos contendo os coeficientes polinomiais. Na segunda etapa, foi elaborado um programa na Linguagem C, denominado "Recipes.c", utilizando-se subrotinas retiradas do livro "Numerical Recipes in C" (Press et al.,1992), para a geração de coeficientes polinomiais a partir do arquivo de média de cada mês.

Foram elaborados gráficos no software "*Grapher for Windows*" utilizando-se os arquivos de média dos cinco dias mais calmos de cada mês. Estes arquivos são denominados "arqmAAMM.dat", onde "AA" corresponde aos dois últimos algarismos do ano e "MM" corresponde ao mês. Foram feitos ajustes polinomiais na curva da média, através de uma ferramenta do "*Grapher for Windows*". O próprio aplicativo gera os coeficientes polinomiais, sendo necessário apenas que se escolha o grau do polinômio. O arquivo que contém os coeficientes gerados pelo "Grapher for Windows" é denominado "indAAMM.dat".

A figura 3.1 mostra a curva da média da variação diurna da densidade do pico da camada F dos cinco dias mais calmos do mês de agosto de 1991 e a curva ajustada usando o aplicativo "*Grapher for Windows*".

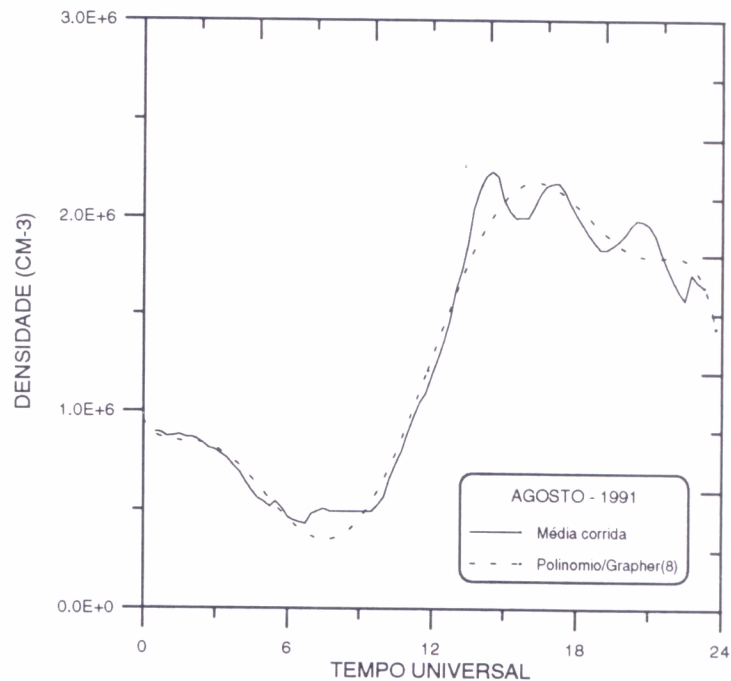


Fig. 3.1 - Ajuste de curva feito através do aplicativo “*Grapher for Windows*”.

Foi elaborado um programa para refazer as curvas utilizando os coeficientes polinomiais gerados pelo “*Grapher for Windows*”. Este programa foi elaborado na linguagem C e foi denominado de “*POLI.C*”. O “*POLI*” lê os dados de um arquivo que contenha os coeficientes polinomiais e monta um novo arquivo contendo os parâmetros hora e densidade. No apêndice B é apresentada a listagem do referido programa.

Para a execução deste programa é necessário que se entre com os nomes dos arquivos de entrada e de saída. Os arquivos de entrada não têm nomes fixos, porém devem conter os coeficientes polinomiais (estes devem estar separados por espaços em branco). Os arquivos de saída são denominados de “*polNAAMM.dat*”, onde “*N*” representa a referência de onde foram retirados os coeficientes, “*AA*” corresponde aos dois últimos algarismos do ano e “*MM*” corresponde ao mês. No apêndice A são apresentados dois modelos do arquivo “*polNAAMM.dat*”

A figura 3.2 mostra a curva da média da variação diurna da densidade do pico da camada F do mês de agosto de 1991 e a curva ajustada através do arquivo gerado pelo programa “*POLI.C*” utilizando-se os coeficientes gerados pelo “*Grapher for Windows*”.

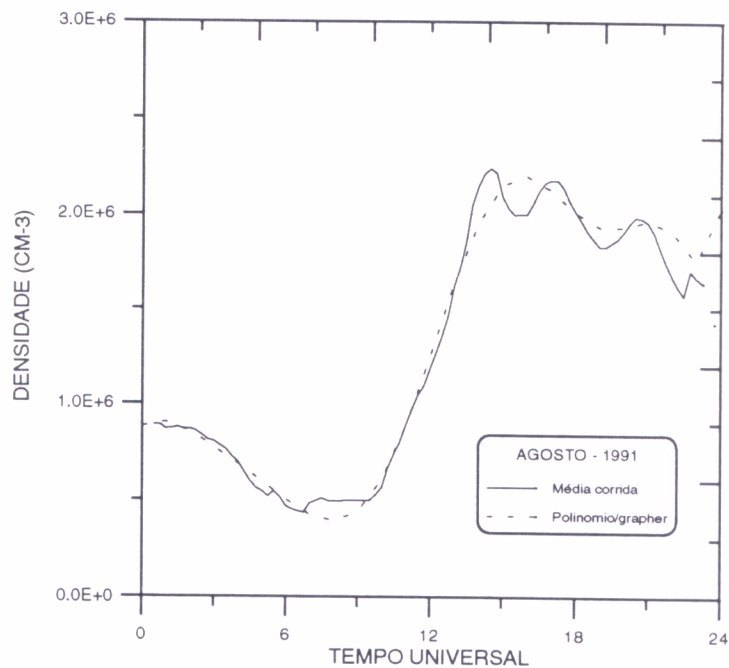


Fig. 3.2 - Ajuste de curva feito com os coeficientes gerados pelo “*Grapher for Windows*”.

Devido a aparição de distorções nas curvas ajustadas através do arquivo gerado pelo programa “*POLI.C*”, utilizando-se os coeficientes gerados pelo “*Grapher for Windows*”, quando o grau do polinômio é superior a 9, houve a necessidade de testar um novo método para o ajuste das curvas.

Foi elaborado um programa na linguagem C chamado de “*RECIPES.C*”, utilizando-se subrotinas retiradas de um livro denominado de “*NUMERICAL RECIPES IN C*” (Press, et al., 1992). Este livro contém diversas subrotinas prontas e testadas que são específicas para serem utilizadas em diversos tipos

de cálculos numéricos. Existem duas versões deste livro, uma contendo subrotinas na linguagem Fortran e outra na linguagem C. O programa “*RECIPES*” lê os arquivos de média “*arqmAAMM*” que são formados pelos seguintes parâmetros: hora, altura, densidade, pico, densidade e número de elementos (quantidade de elementos utilizados para o cálculo da média em cada horário) e gera um novo arquivo contendo os coeficientes polinomiais. O número de coeficientes depende do grau do polinômio desejado. No apêndice C é apresentada a listagem do referido programa.

Para a execução deste programa é necessário que se entre com o nome do arquivo de entrada, o nome do arquivo de saída e o grau do polinômio. O arquivo de saída é denominado de “*coefAAMM*”. Este novo arquivo será utilizado posteriormente na execução do programa “*POLI.C*”. No apêndice A é apresentado um modelo do arquivo *coefAAMM.dat*.

A figura 3.3 mostra a curva da média da variação diurna da densidade do pico da camada F do mês de agosto de 1991 e a curva ajustada através do arquivo gerado pelo programa “*POLI.C*”, utilizando os coeficientes gerados pelo programa “*RECIPES.C*”.

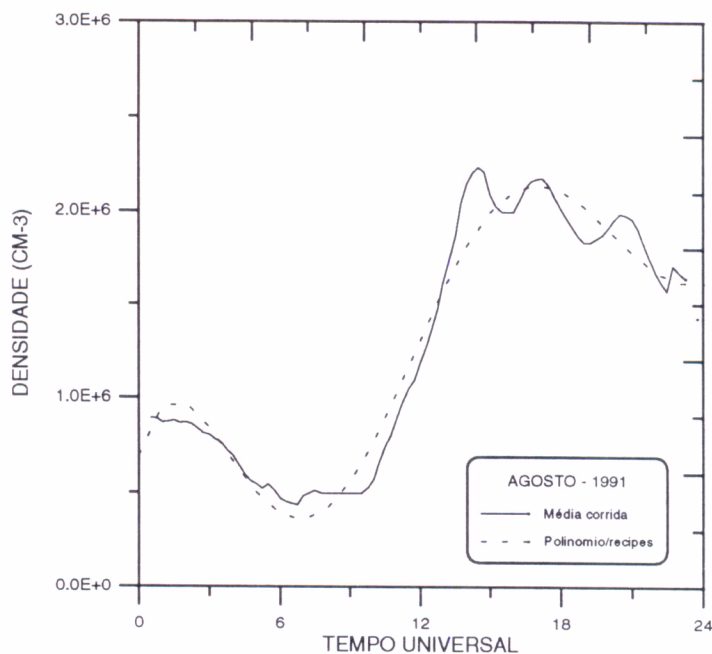


Fig. 3.3 - Ajuste de curva feito com os coeficientes gerados pelo “*RECIPES.C*”.

Foram elaborados gráficos no “*Grapher for Windows*” para se comparar as curvas geradas pelo próprio aplicativo e as geradas com os arquivos montados pelo programa “*POLI.C*” através dos coeficientes fornecidos pelo “*Grapher for Windows*” e dos coeficientes fornecidos pelo “*RECIPES.C*”.

A figura 3.4 mostra a curva da média da variação diurna da densidade do pico da camada F para o mês de agosto de 1991 e as curvas ajustadas através dos arquivos gerados pelo “*POLI.C*” com coeficientes do “*Grapher for Windows*” e com coeficientes do “*RECIPES.C*”. No apêndice C são apresentados os gráficos elaborados para os demais meses.

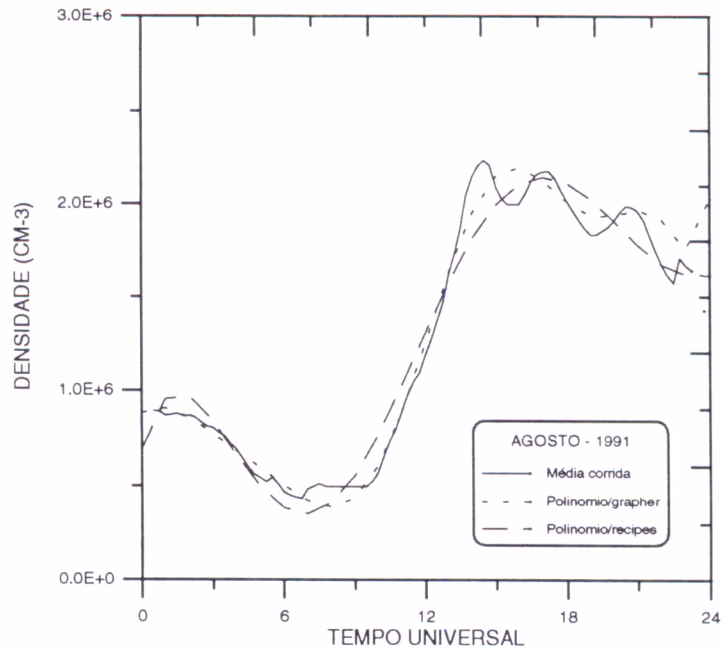


Fig. 3.4 - Comparação entre as curvas da média e as ajustadas através dos coeficientes gerados pelo aplicativo “*Grapher for Windows*” e dos gerados pelo programa “*RECIPES*”.

Através da análise dos gráficos elaborados com as curvas geradas pelos dois métodos utilizados, chegou-se a conclusão de que o melhor método para a continuação do trabalho seria a utilização dos coeficientes gerados pelo aplicativo “*Grapher for Windows*”, pois o ajuste se encontra bem mais suave.

3.2- Elaboração do modelo

Para a elaboração do banco de dados do modelo foi necessária a seleção dos meses que seriam utilizados. Esta seleção foi feita analisando-se a quantidade de dados existentes, referentes aos dias magneticamente calmos, utilizados para os cálculos das médias de cada mês.

Devido a existência de poucos dados, preferiu-se agrupar os meses por estações, ficando os grupos organizados do seguinte modo: inverno, contendo maio,

junho, julho e agosto; verão, contendo novembro, dezembro e janeiro; primavera, contendo setembro e outubro; e outono, contendo março e abril. Para cada estação a atividade solar varia entre baixa, média e alta, porém com uma distribuição não uniforme.

Para os meses selecionados, foram elaboradas curvas utilizando-se o “Grapher for Windows”, testando-se qual seria o melhor grau para o ajuste dos polinômios e gerando-se os respectivos coeficientes polinomiais. Foram gerados arquivos com os respectivos coeficientes. Utilizando-se tais arquivos como dados de entrada para o programa “POLI.C”, temos a geração de arquivos contendo a densidade dos respectivos dados interpolados.

As tabelas 3.1, 3.2, 3.3 e 3.4 mostram os valores da densidade dos dados interpolados para as distintas estações. O número entre parênteses, abaixo de cada mês, indica o número médio de manchas solares para o período em estudo.

TABELA 3.1 - Densidade eletrônica (cm⁻³) - inverno (dados interpolados)

Hora	Junho/93 (49.8)	Mai/93 (61.3)	Agosto/92 (64.5)	Julho/92 (85.7)	Agosto/91 (176.3)
0	5.57E+05	7.06E+05	4.16E+05	3.17E+05	9.53E+05
1	4.05E+05	4.96E+05	3.64E+05	3.84E+05	8.54E+05
2	4.18E+05	4.65E+05	3.69E+05	3.73E+05	8.45E+05
3	4.72E+05	4.30E+05	3.90E+05	3.63E+05	8.13E+05
4	5.07E+05	3.72E+05	4.03E+05	3.64E+05	7.24E+05
5	5.04E+05	3.15E+05	4.02E+05	3.63E+05	5.92E+05
6	4.71E+05	2.82E+05	3.89E+05	3.51E+05	4.58E+05
7	4.28E+05	2.79E+05	3.78E+05	3.30E+05	3.69E+05
8	3.98E+05	3.02E+05	3.83E+05	3.14E+05	3.61E+05
9	4.00E+05	3.46E+05	4.18E+05	3.23E+05	4.57E+05
10	4.45E+05	4.15E+05	4.96E+05	3.74E+05	6.57E+05
11	5.35E+05	5.20E+05	6.21E+05	4.77E+05	9.41E+05
12	6.63E+05	6.74E+05	7.92E+05	6.25E+05	1.27E+06
13	8.10E+05	8.83E+05	1.00E+06	8.00E+05	1.60E+06
14	9.55E+05	1.14E+06	1.23E+06	9.70E+05	1.89E+06
15	1.07E+06	1.40E+06	1.45E+06	1.10E+06	2.09E+06
16	1.15E+06	1.62E+06	1.63E+06	1.16E+06	2.18E+06
17	1.15E+06	1.74E+06	1.75E+06	1.13E+06	2.16E+06
18	1.08E+06	1.70E+06	1.76E+06	1.03E+06	2.06E+06
19	9.50E+05	1.51E+06	1.67E+06	8.96E+05	1.94E+06
20	7.72E+05	1.20E+06	1.46E+06	7.77E+05	1.83E+06
21	5.87E+05	8.94E+05	1.16E+06	7.32E+05	1.79E+06
22	4.49E+05	7.14E+05	8.31E+05	7.71E+05	1.79E+06
23	4.24E+05	7.06E+05	5.94E+05	7.88E+05	1.71E+06
24	5.88E+05	6.09E+05	6.27E+05	4.59E+05	1.25E+06

TABELA 3.2 - Densidade eletrônica (cm^{-3}) - verão (dados interpolados)

Hora	Novembro/93 (35.6)	Dezembro/93 (48.9)	Janeiro/93 (59.3)	Novembro/92 (91.8)
0	2.10E+06	8.55E+05	1.20E+06	3.32E+06
1	1.27E+06	6.75E+05	1.36E+06	2.94E+06
2	9.76E+05	6.87E+05	1.33E+06	2.67E+06
3	8.95E+05	7.28E+05	1.23E+06	2.41E+06
4	8.51E+05	7.30E+05	1.10E+06	2.11E+06
5	7.77E+05	6.82E+05	9.60E+05	1.76E+06
6	6.67E+05	6.02E+05	8.19E+05	1.41E+06
7	5.49E+05	5.19E+05	6.88E+05	1.09E+06
8	4.61E+05	4.64E+05	5.82E+05	8.57E+05
9	4.31E+05	4.59E+05	5.23E+05	7.40E+05
10	4.78E+05	5.14E+05	5.30E+05	7.65E+05
11	6.01E+05	6.31E+05	6.17E+05	9.33E+05
12	7.86E+05	8.02E+05	7.88E+05	1.22E+06
13	1.01E+06	1.01E+06	1.03E+06	1.59E+06
14	1.24E+06	1.23E+06	1.33E+06	1.97E+06
15	1.44E+06	1.45E+06	1.64E+06	2.30E+06
16	1.61E+06	1.64E+06	1.92E+06	2.53E+06
17	1.73E+06	1.78E+06	2.12E+06	2.63E+06
18	1.81E+06	1.85E+06	2.22E+06	2.60E+06
19	1.86E+06	1.84E+06	2.20E+06	2.52E+06
20	1.89E+06	1.76E+06	2.07E+06	2.49E+06
21	1.91E+06	1.60E+06	1.89E+06	2.61E+06
22	1.86E+06	1.41E+06	1.75E+06	2.91E+06
23	1.62E+06	1.24E+06	1.77E+06	3.20E+06
24	9.53E+05	1.21E+06	2.09E+06	2.88E+06

TABELA 3.3 - Densidade eletrônica (cm^{-3}) - primavera (dados interpolados)

Hora	Setembro/93 (22.4)	Setembro/94 (25.7)	Outubro/93 (56.4)	Outubro/91 (144.1)
0	3.47E+05	5.77E+05	1.42E+06	4.51E+06
1	3.78E+05	3.67E+05	1.09E+06	3.91E+06
2	3.94E+05	4.09E+05	9.66E+05	3.96E+06
3	4.04E+05	4.46E+05	8.88E+05	3.63E+06
4	4.07E+05	4.17E+05	7.85E+05	2.87E+06
5	4.00E+05	3.48E+05	6.52E+05	1.98E+06
6	3.83E+05	2.88E+05	5.15E+05	1.26E+06
7	3.61E+05	2.75E+05	4.09E+05	8.59E+05
8	3.45E+05	3.21E+05	3.62E+05	7.98E+05
9	3.48E+05	4.13E+05	3.92E+05	9.89E+05
10	3.86E+05	5.26E+05	5.02E+05	1.31E+06
11	4.71E+05	6.30E+05	6.85E+05	1.64E+06
12	6.09E+05	7.06E+05	9.23E+05	1.91E+06
13	7.98E+05	7.47E+05	1.19E+06	2.11E+06
14	1.02E+06	7.64E+05	1.47E+06	2.26E+06
15	1.26E+06	7.78E+05	1.73E+06	2.37E+06
16	1.47E+06	8.14E+05	1.94E+06	2.47E+06
17	1.62E+06	8.84E+05	2.09E+06	2.56E+06
18	1.65E+06	9.79E+05	2.17E+06	2.59E+06
19	1.54E+06	1.06E+06	2.16E+06	2.57E+06
20	1.28E+06	1.08E+06	2.06E+06	2.51E+06
21	9.12E+05	9.78E+05	1.90E+06	2.52E+06
22	5.40E+05	7.48E+05	1.71E+06	2.74E+06
23	3.72E+05	5.34E+05	1.58E+06	3.23E+06
24	7.51E+05	7.51E+05	1.67E+06	3.66E+06

TABELA 3.4 - Densidade eletrônica (cm^{-3}) - outono (dados interpolados)

Hora	Abril/94 (16.1)	Março/94 (31.7)	Abril/90 (140.3)
0	5.60E+05	7.80E+05	3.92E+06
1	2.85E+05	5.86E+05	3.79E+06
2	3.60E+05	6.56E+05	3.73E+06
3	4.06E+05	7.08E+05	3.28E+06
4	3.89E+05	6.67E+05	2.50E+06
5	3.60E+05	5.60E+05	1.65E+06
6	3.58E+05	4.43E+05	9.58E+05
7	3.86E+05	3.72E+05	6.02E+05
8	4.29E+05	3.76E+05	6.18E+05
9	4.77E+05	4.63E+05	9.41E+05
10	5.40E+05	6.18E+05	1.44E+06
11	6.49E+05	8.17E+05	1.96E+06
12	8.41E+05	1.03E+06	2.39E+06
13	1.14E+06	1.25E+06	2.64E+06
14	1.51E+06	1.46E+06	2.71E+06
15	1.91E+06	1.66E+06	2.67E+06
16	2.22E+06	1.85E+06	2.61E+06
17	2.33E+06	2.02E+06	2.64E+06
18	2.19E+06	2.17E+06	2.81E+06
19	1.81E+06	2.26E+06	3.11E+06
20	1.37E+06	2.25E+06	3.43E+06
21	1.10E+06	2.10E+06	3.63E+06
22	1.19E+06	1.83E+06	3.59E+06
23	1.42E+06	1.57E+06	3.41E+06
24	4.45E+05	1.67E+06	3.72E+06

A partir dos valores da densidade para diferentes números de manchas solares, fez-se uma pesquisa para definir um bom critério de interpolação para os dados. Observou-se que, na maioria dos horários, a densidade eletrônica representa uma variação linear com o número de manchas solares, porém este ajuste não é tão bom em horários próximos das 20 horas. Nesta etapa do trabalho optou-se por adotar o ajuste linear para todos os horários. Deve-se estar atento para o fato que nos horários entre 18 e 22 horas outros tipos de ajustes devem ser investigados, utilizando um número maior de dados.

Dessa forma foram feitas as interpolações lineares para todas as estações do ano e para todos os horários, e os coeficientes da reta foram determinados. As figuras 3.5 e 3.6 mostram dois exemplos dos resultados obtidos para a interpolação linear, para a “primavera”, às 01:00 e 13:00, hora universal. Com este procedimento pode-se obter a densidade eletrônica, em função do número de manchas solares, para cada estação e para cada horário, através da equação:

$$y = ax + b \quad (1)$$

onde “a” e “b” foram os coeficientes determinados pelo procedimento descrito anteriormente, x é o número de manchas solares e y é a densidade eletrônica.

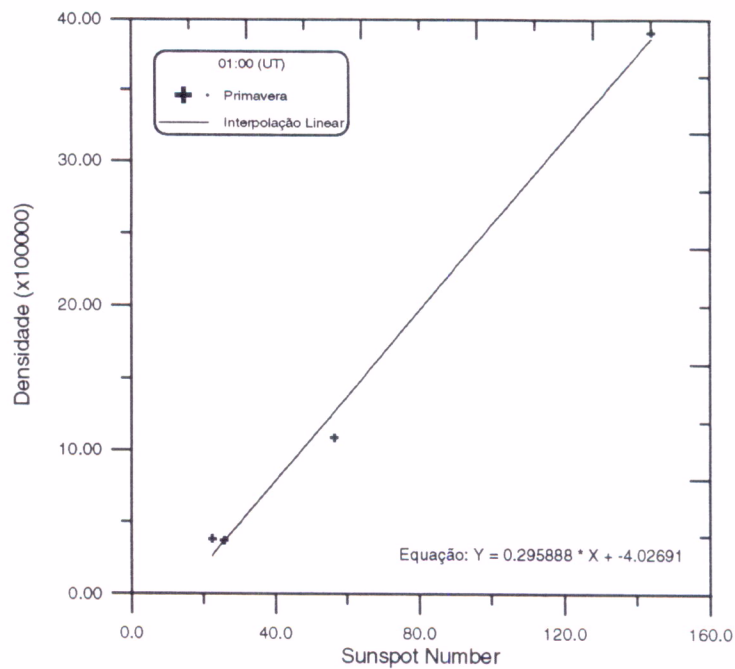


Fig. 3.5 - Gráfico da interseção linear para Primavera à 01:00 hora universal

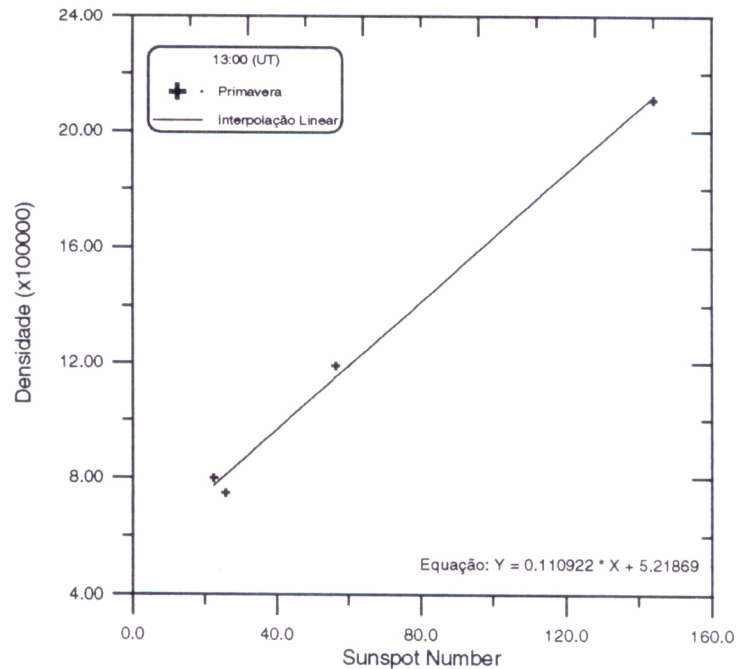


Fig. 3.6 - Gráfico da interseção linear para Primavera às 13:00 hora universal

Nas tabelas 3.5 e 3.6 estão listados os coeficientes encontrados através das interpolações lineares.

TABELA 3.5 - Coeficientes da reta $y = ax + b$ - Primavera e Verão

hora (ut)	Primavera		Verão	
	coef. a	coef. b	coef. a	coef. b
00	0.289781	-0.902361	0.426809	-8.69117
01	0.295888	-4.02691	0.353117	-5.18611
02	0.298625	-4.23704	0.340571	-5.90214
03	0.269279	-3.31568	0.299326	-4.4728
04	0.206372	-1.62885	0.247648	-2.60898
05	0.134535	0.0886617	0.193362	0.941542
06	0.0772184	1.31588	0.14579	0.157963
07	0.0452184	1.94968	0.105215	0.917812
08	0.0392444	2.12596	0.0756134	1.45637
09	0.0516775	2.14324	0.0575087	1.99524
10	0.0724324	2.30833	0.0527575	2.61008
11	0.0919215	2.85208	0.0616021	3.32664
12	0.104867	3.8525	0.0818298	4.17023
13	0.110922	5.21869	0.110637	5.08347
14	0.112204	6.8115	0.13998	6.18017
15	0.109584	8.53437	0.163864	7.42344
16	0.106817	10.0963	0.1744	8.97785
17	0.104745	11.3751	0.169613	10.6598
18	0.101994	12.1336	0.149265	12.4083
19	0.101827	11.9965	0.127792	13.5231
20	0.110297	10.2701	0.122356	13.3182
21	0.128075	7.81513	0.151392	11.108
22	0.171867	3.66348	0.226032	6.51169
23	0.229212	0.0444733	0.323635	0.512875

TABELA 3.6 - Coeficientes da reta $y = ax + b$ - Outono e Inverno

hora (ut)	Outono		Inverno	
	coef. a	coef. b	coef. a	coef. b
00	0.256754	2.39321	0.439372	2.63661
01	0.286921	-2.4533	0.0365385	1.80815
02	0.275647	-1.46306	0.0359954	1.78969
03	0.233398	0.0125846	0.0317909	2.15366
04	0.169533	1.22364	0.0241884	2.62303
05	0.102579	2.13497	0.0146055	3.07373
06	0.0479828	2.85481	0.00561259	3.41079
07	0.0187841	3.35557	-1.78614E-006	3.56816
08	0.0178161	3.62627	-0.000256105	3.53841
09	0.0398068	3.77411	0.00589252	3.37229
10	0.0736505	4.04212	0.0176365	3.23045
11	0.105443	4.80874	0.328385	3.31398
12	0.124906	6.3717	0.0481697	3.83218
13	0.123428	9.02773	0.0606784	4.87542
14	0.103416	12.4492	0.0682166	6.39968
15	0.0728902	16.2298	0.0694517	8.14158
16	0.0455894	19.4082	0.0646552	9.82138
17	0.0367761	20.9941	0.0574062	10.8358
18	0.0532339	20.5622	0.0524307	10.6713
19	0.0949606	17.9793	0.539009	9.2146
20	0.144823	14.4196	0.0635227	6.51849
21	0.180601	11.443	0.0810405	3.23334
22	0.181772	10.6362	0.0975981	0.568213
23	0.16361	11.075	0.0970995	-0.0541461

O valor de y , obtido pela equação (1), com “a” e “b” dados pelas tabelas 3.5 e 3.6, devem ser multiplicados por 10^5 para que se obtenha a densidade em unidade de elétrons/cm³

Definidas as equações lineares referentes a cada horario de cada estação, foi montado o banco de dados a ser utilizado pelo programa “DIONCP.C”. O banco de dados é constituído por quatro arquivos, ou seja, um arquivo para cada estação, os quais contêm os coeficientes “a” e “b” para todos os horários. O programa “DIONCP.C” foi elaborado na linguagem C, utiliza como dados de entrada a estação do ano e o número de manchas solares para o período que se deseja calcular a densidade eletrônica, e o nome de um arquivo de saída. Utilizando-se o banco de dados existente, o programa gera um arquivo de saída contendo as densidades, em função da hora, para os parâmetros de entrada. No apêndice D encontra-se a listagem do programa “DIONCP.C”.

Deve-se salientar que o programa ficou bem simples e fácil de ser utilizado. O usuário executa o programa DIONCP.EXE, o qual solicita na tela a estação do ano (opções: primavera / verão / outono / inverno), o número de manchas solares e o nome de saída. Para este último, o usuário pode especificar o diretório onde deseja que o arquivo seja gravado, por exemplo, “a:\cpver100.dat” ou “c:\user\cpinv110.dat”. O programa então calcula a densidade eletrônica, em função da hora universal, produzindo um valor para cada horário, e os dados são gravados no arquivo especificado, em colunas, onde a primeira coluna corresponde a hora e a segunda coluna corresponde à densidade eletrônica, a qual deve ser multiplicada por 10^5 para que se obtenha a densidade em unidade de elétrons/cm³.

A figura 3.7 mostra um exemplo do formato do arquivo de saída. De posse desses arquivos, para diferentes condições, o usuário pode utilizar “softwares” gráficos para visualizar os dados.

Local: Cachoeira Paulista	
Estacao do ano: primavera	
Sunspot Number: 125.30	
Hora	Densidade
0	35.407200
1	33.047859
2	33.180672
3	30.424980
4	24.229862
5	16.945898
6	10.991345
7	7.615546
8	7.043283
9	8.618431
10	11.384109
11	14.369844
12	16.992334
13	19.117216
14	20.870661
15	22.265247
16	23.480471
17	24.499649
18	24.913448
19	24.755424
20	24.090315
21	23.862928
22	25.198416
23	28.764738

Fig. 3.7 - Arquivo de saída do programa DIONCP.C para a Primavera, com número de manchas solares igual a 120.30

Para uma análise inicial da eficiência do modelo, foram elaborados gráficos no “Grapher for Windows”, utilizando-se os arquivos de densidade gerados pelo programa “DIONCP.C” para os meses cujos dados fizeram parte do cálculo das médias utilizadas na elaboração do banco de dados do modelo. Em todos os gráficos pode-se observar uma grande coerência entre a curva gerada pelo modelo e a curva da média. No apêndice E são apresentados os referidos gráficos.

O modelo foi também testado utilizando um conjunto de dados que não foram utilizados no cálculo das médias utilizadas na elaboração do banco de dados

do modelo. O resultado de tal comparação está mostrado na figura 3.8, onde são comparados o resultado do modelo com os dados do mês de setembro de 1991, com número de manchas solares igual a 125.3 (o referido dado não tem participação no banco de dados do programa). Observa-se uma boa concordância entre 04:00 e 16:00 UT, porém nos demais horários o modelo subestima a observação.

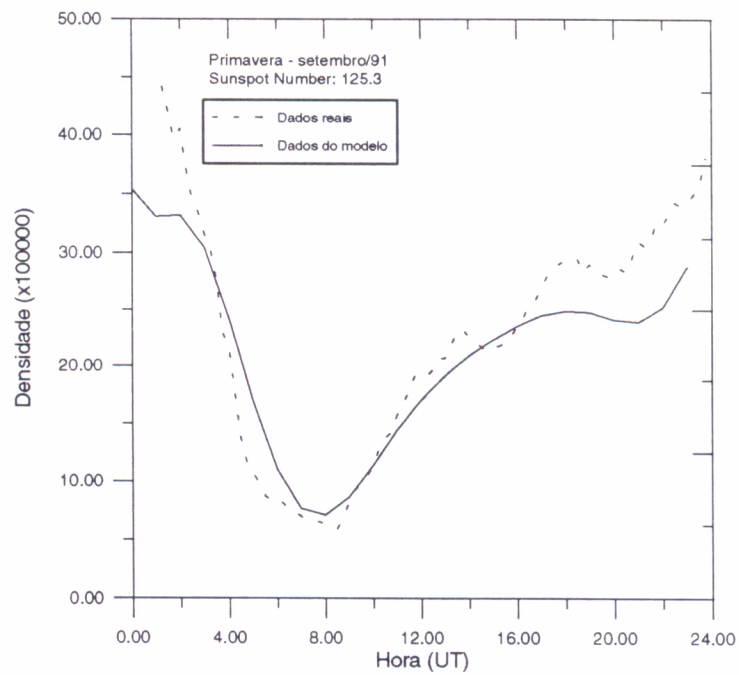


Fig. 3.8 - Gráfico de comparação entre a curva gerada pelo dado real e gerada pelo modelo.

4. CONCLUSÃO

Através da análise de alguns métodos utilizados para o ajuste das curvas, o ajuste linear feito através do aplicativo “Grapher for Windows” foi o que obteve melhor resultado para a maioria dos horários.

Como a cobertura dos dados é muito pequena, o modelo teve que ser feito para as quatro estações do ano (inverno, verão, primavera e outono) ,utilizando-se uma pequena variação de atividade solar (baixa, média e alta).

O modelo gerado alcançou as expectativas esperadas, apesar de não ter eficiência para uma grande cobertura de dados e atividade solar. Posteriormente, com o aumento da quantidade de dados, o banco de dados poderá ser otimizado, melhorando em grande parte a eficiência do programa.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Cottini, L. T.; Batista, I.S. **Estudos ionosféricos em latitudes baixas e equatoriais usando ionossondas**: relatório de pesquisa. São José dos Campos, INPE, 1995. 134p. (INPE-5672-PRE/193).

Press, W.H.; Teukolsky, S.A.; Vetterling, W.T.; Flannery, B.P. **Numerical recipes in C**. Cambridge University Press, 1992.

Zamlutti, C.J. **Fundamentos de análise numérica para computadores digitais**. São José dos Campos, INPE, 1982. V.2. (INPE-2327-MD/017).

APÊNDICE - A

Listagem do programa “*POLI.C*”

```
/* POLI.C - Programa para ajuste polinomial de curvas de densidade  eletrônica - Inpe
- outubro / 1995 */
```

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
```

```
FILE *PS,*PE;
int i,g;
float h,nmf,a[11];
char arqsai[12],arqentra[12],x[10];
```

```
main(){
```

```
    printf("Nome do arquivo de entrada => ");
    scanf("%s",arqentra);
    if((PE=fopen(arqentra,"r"))==NULL){
        printf("Nao posso abrir o arquivo de entrada");
        exit(1);
    }
```

```
    printf("Nome do arquivo de saida => ");
    scanf("%s",arqsai);
    if((PS=fopen(arqsai,"w"))==NULL){
        printf("Nao Posso Criar o arquivo de saida\n");
        exit(1);
    }
```

```
    i=0;
    while((fscanf(PE,"%s",x)) !=EOF){
        a[i]=atof(x);
        i++;
    }
```

```
    if (i>=10) {
        printf ("Exedeu o limite (grau max.=9)");
        exit(1);
    }
```

```
    fprintf(PS,"  Hora  Densidade\n\n");
    for(i=0;i<=24;i++) {
```

```
h=i;
nmf=((a[0])+(a[1]*h)+(a[2]*h*h)+(a[3]*h*h*h)+(a[4]*h*h*h*h)+
      (a[5]*h*h*h*h*h)+(a[6]*h*h*h*h*h*h)+(a[7]*h*h*h*h*h*h*h)+
      (a[8]*h*h*h*h*h*h*h*h)+(a[9]*h*h*h*h*h*h*h*h*h) +
      (a[10]*h*h*h*h*h*h*h*h*h*h));
fprintf(PS, "%10.2f  %f\n",h,nmf);
}

fclose(PE);
fclose(PS);
exit(0);
}
```

APÊNDICE - B

Listagem do programa “*RECIPES.C*”.

```
/*RECIPES.C - Programa para calculo dos coeficientes polinomiais (Numerical
Recipes) - Inpe - dez 95*/
```

```
#include <conio.h>
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <math.h>
#include "nrutil.h"
```

```
void funcao(float X, float afunc[], int MA);
void lfit (float x[],float y[],float sig[],int ndat,float a[],int ia[],
int ma, float **covar, float *chisq, void (*funcs)(float,float[],int));
```

```
void funcao (float X,float afunc[],int MA)
{
  int e,ex=0;
  for (e=1;e<=MA;e++){
    if(X==0.0){
      if(ex==0)afunc[e]=1.0;
      else afunc[e]=0.0;
    }
    else afunc[e]=(float)(pow((float)X,(int)ex));
    ex++;
  }
}
```

```
void lfit(x,y,sig,ndat,a,ia,ma,covar,chisq,funcs)
float **covar,*chisq,a[],sig[],x[],y[];
int ia[],ma,ndat;
void (*funcs)(float X,float afunc[],int MA);
{
```

```
void covsrt(float **covar,int ma,int ia[],int mfit);
void gaussj(float **a,int n,float b[][2],int m);
```

```
int i,j,k,l,m,mfit=0;
float ym,wt,sum,sig2i,beta[12][2],*afunc;
```

```

afunc=vector(1,ma);

for (j=1;j<=ma;j++)
  if (ia[j]) mfit++;
if (mfit == 0) nrerror("lfit: no parameters to be fitted");
for (j=1;j<=mfit;j++) {
  for (k=1;k<=mfit;k++){
    covar[j][k]=0.0;
    beta[j][1]=0.0;
  }
}

for (i=1;i<=ndat;i++) {
  (*funcs)(x[i],afunc,ma);
  ym=y[i];
  if (mfit < ma) {
    for (j=1;j<=ma;j++)
      if (!ia[j]) ym -= a[j]*afunc[j];
  }
  sig2i=1.0/SQR(sig[i]);

  for (j=0,l=1;l<=ma;l++) {
    if (ia[l]) {
      wt=afunc[l]*sig2i;
      for (j++,k=0,m=1;m<=l;m++)
        if (ia[m]) covar[j][++k] += wt*afunc[m];
      beta[j][1] += ym*wt;
    }
  }
}

for (j=2;j<=mfit;j++)
  for (k=1;k<j;k++)
    covar[k][j]=covar[j][k];

gaussj(covar,mfit,beta,1);

for (j=0,l=1;l<=ma;l++)
  if (ia[l]) a[l]=beta[++j][1];

*chisq=0.0;
for (i=1;i<=ndat;i++) {
  (*funcs)(x[i],afunc,ma);
  for (sum=0.0,j=1;j<=ma;j++)sum += a[j]*afunc[j];
  *chisq += SQR((y[i]-sum)/sig[i]);
}

```



```

        covsrt(covar,ma,ia,mfit);
        free_vector(afunc,1,ma);
    }

```

```

#define SWAP(a,b) {swap=(a);(a)=(b);(b)=swap;}

```

```

void covsrt(covar,ma,ia,mfit)
float **covar;
int ia[],ma,mfit;
{
    int i,j,k;
    float swap;
    for (i=mfit+1;i<=ma;i++)
        for (j=1;j<=i;j++) covar[i][j]=covar[j][i]=0.0;
    k=mfit;
    for (j=ma;j>=1;j--) {
        if (ia[j]) {
            for (i=1;i<=ma;i++) SWAP(covar[i][k],covar[i][j])
            for (i=1;i<=ma;i++) SWAP(covar[k][i],covar[j][i])
            k--;
        }
    }
}
#undef SWAP

```

```

#define SWAP(a,b) {temp=(a);(a)=(b);(b)=temp;}

```

```

void gaussj(a,n,b,m)
float **a,b[][2];
int m,n;
{
    int *indxc,*indxr,*ipiv;
    int i,icol,irow,j,k,l,ll;
    float big,dum,pivinv,temp;

    indxc=ivector(1,n);
    indxr=ivector(1,n);
    ipiv=ivector(1,n);

    for (j=1;j<=n;j++) ipiv[j]=0;
    for (i=1;i<=n;i++) {

```

```

big=0.0;
for (j=1;j<=n;j++)
    if (ipiv[j] != 1)
        for (k=1;k<=n;k++) {
            if (ipiv[k] == 0) {
                if (fabs(a[j][k]) >= big) {
                    big=fabs(a[j][k]);
                    irow=j;
                    icol=k;
                }
            } else if (ipiv[k] > 1) nrerror("gaussj: Singular
Matrix-1");
        }
    ++(ipiv[icol]);
    if (irow != icol) {
        for (l=1;l<=n;l++) SWAP(a[irow][l],a[icol][l])
        for (l=1;l<=m;l++) SWAP(b[irow][l],b[icol][l])
    }
    indxr[i]=irow;
    indxc[i]=icol;
    if (a[icol][icol] == 0.0) nrerror("gaussj: Singular Matrix-2");
    pivinv=1.0/a[icol][icol];
    a[icol][icol]=1.0;
    for (l=1;l<=n;l++) a[icol][l] *= pivinv;
    for (l=1;l<=m;l++) b[icol][l] *= pivinv;
    for (ll=1;ll<=n;ll++)
        if (ll != icol) {
            dum=a[ll][icol];
            a[ll][icol]=0.0;
            for (l=1;l<=n;l++) a[ll][l] -= a[icol][l]*dum;
            for (l=1;l<=m;l++) b[ll][l] -= b[icol][l]*dum;
        }
}
for (l=n;l>=1;l--) {
    if (indxr[l] != indxc[l])
        for (k=1;k<=n;k++)
            SWAP(a[k][indxr[l]],a[k][indxc[l]]);
}
free_ivector(ipiv,1,n);
free_ivector(indxr,1,n);
free_ivector(indxc,1,n);
}

```

FILE *pe,*ps;

void main(void)

```

{
float x[96],y[96],sig[96],a[15]**covar,chisq;
char h[10],f[15],p[15],d[15],n[15],arqentra[12],arqsai[12];
int i,j,ma,ndat,g,ia[15];

ndat=ma=g=0;
for(i=0;i<=96;i++){
    x[i]=0.0;
    y[i]=0.0;
    sig[i]=1.0;
}

clrscr();
printf("Nome do arquivo de entrada => ");
scanf("%s",arqentra);
if((pe=fopen(arqentra,"r"))==NULL){
    printf("Nao posso abrir o arquivo de entrada");
    exit(1);
}
printf("Nome do arquivo de saida => ");
scanf("%s",arqsai);
if((ps=fopen(arqsai,"w"))==NULL){
    printf("Nao posso criar o arquivo de saida");
    exit(1);
}
printf ("Entre com o grau do polinomio => ");
scanf("%d",&g);
ma=g+1;

if(ma>12){
    printf("excedeu limite");
    exit(1);
}
covar=matrix(1,ma,1,ma);

for(i=1;i<=ma;i++){
    ia[i]=1;
}

i=1;
while((fscanf(pe,"%s %s %s %s %s",h,f,p,d,n))!=EOF){
    x[i]=atof(h);
    y[i]=atof(d);
    i++;
}
ndat=i-1;

```

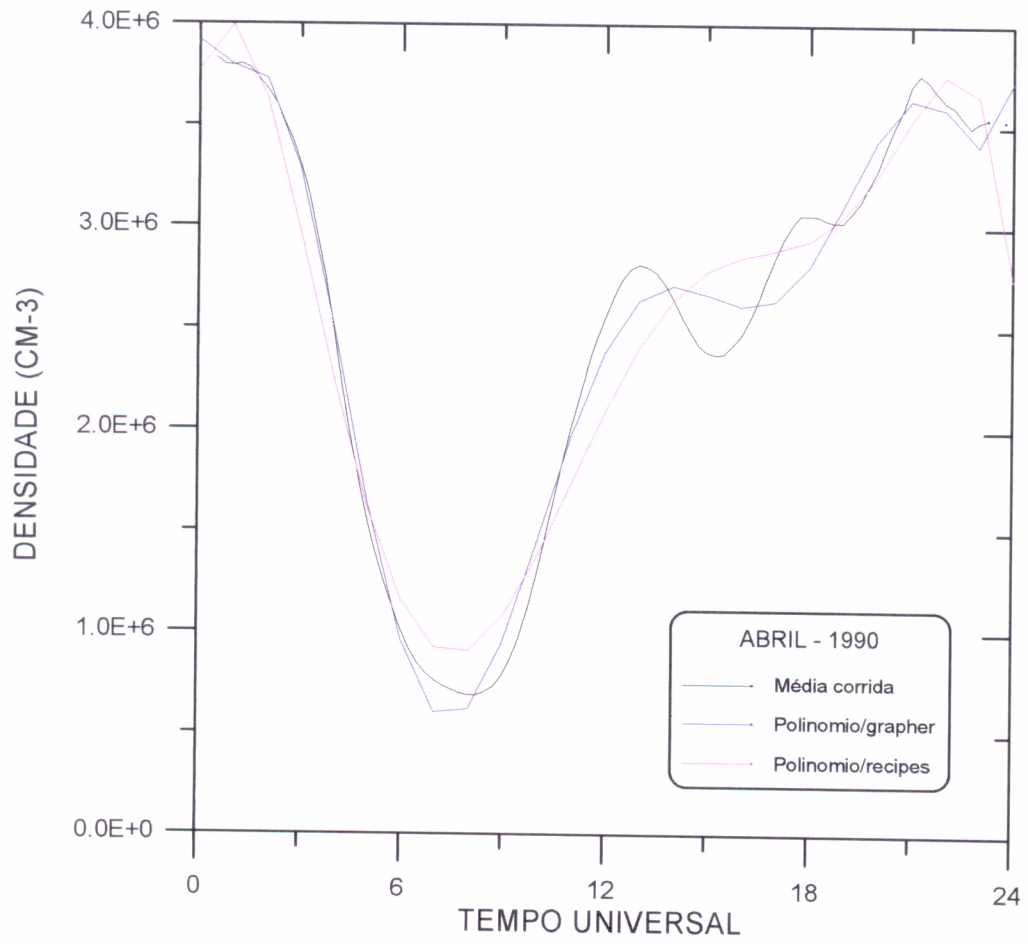
```
fclose(pe);

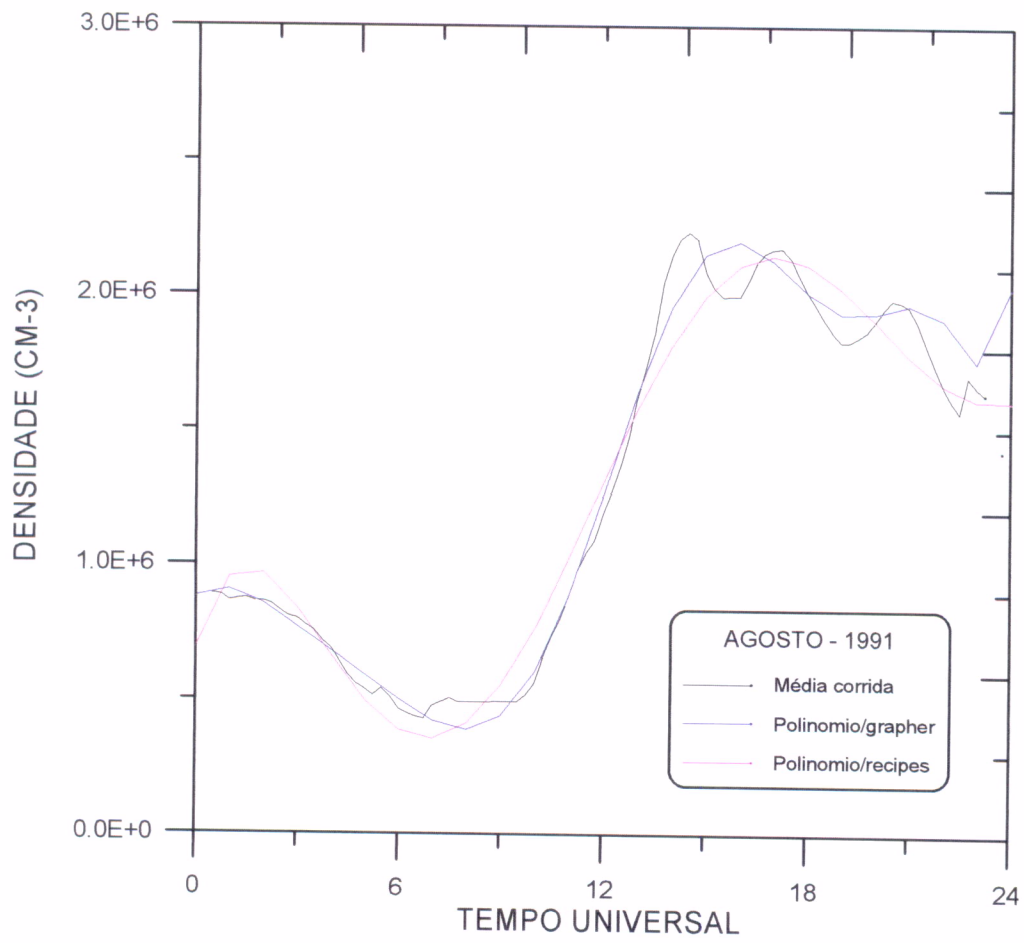
lfit(x,y,sig,ndat,a,ia,ma,covar,&chisq,funcao);
fprintf(ps,"COEFICIENTES POLINOMIAIS\n\n");
printf("COEFICIENTES POLINOMIAIS\n\n");

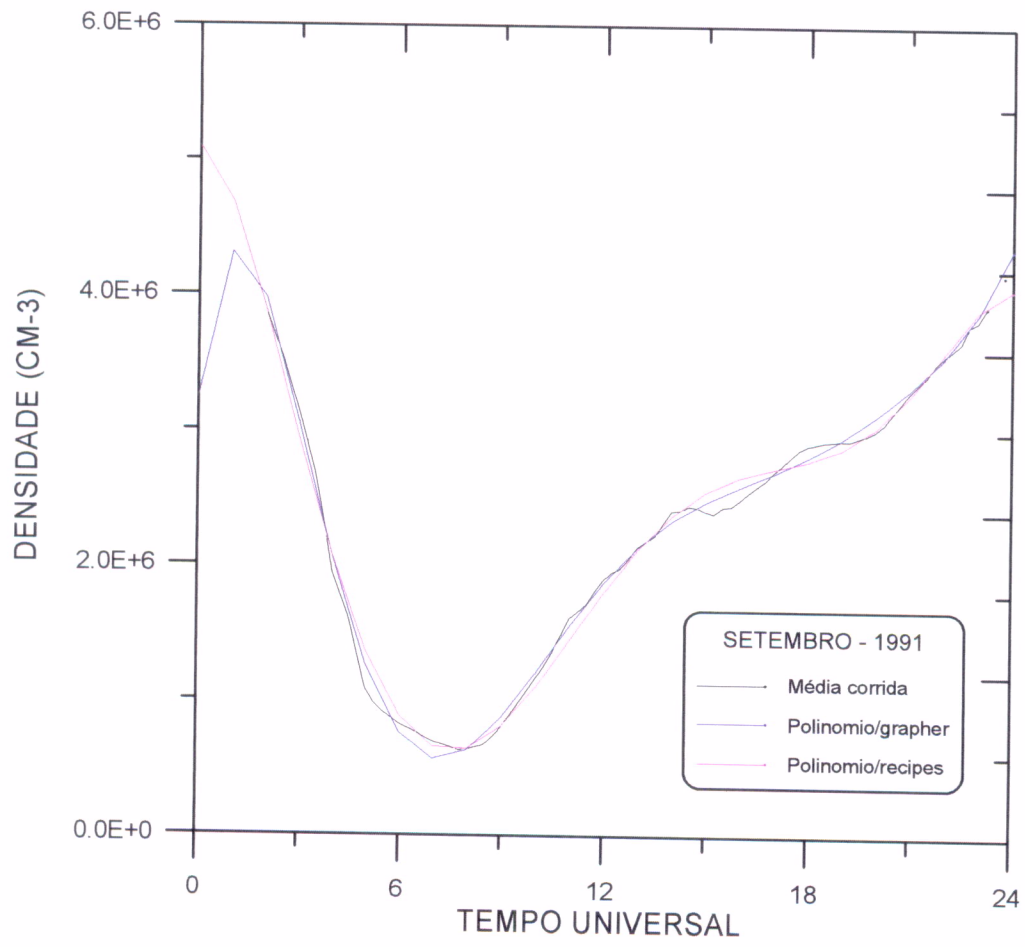
for(i=1;i<=ma;i++){
    fprintf(ps,"%f\n",a[i]);
    printf("%f\n",a[i]);
}
free_matrix(covar,1,ma,1,ma);
fclose(ps);
exit(0);
}
```

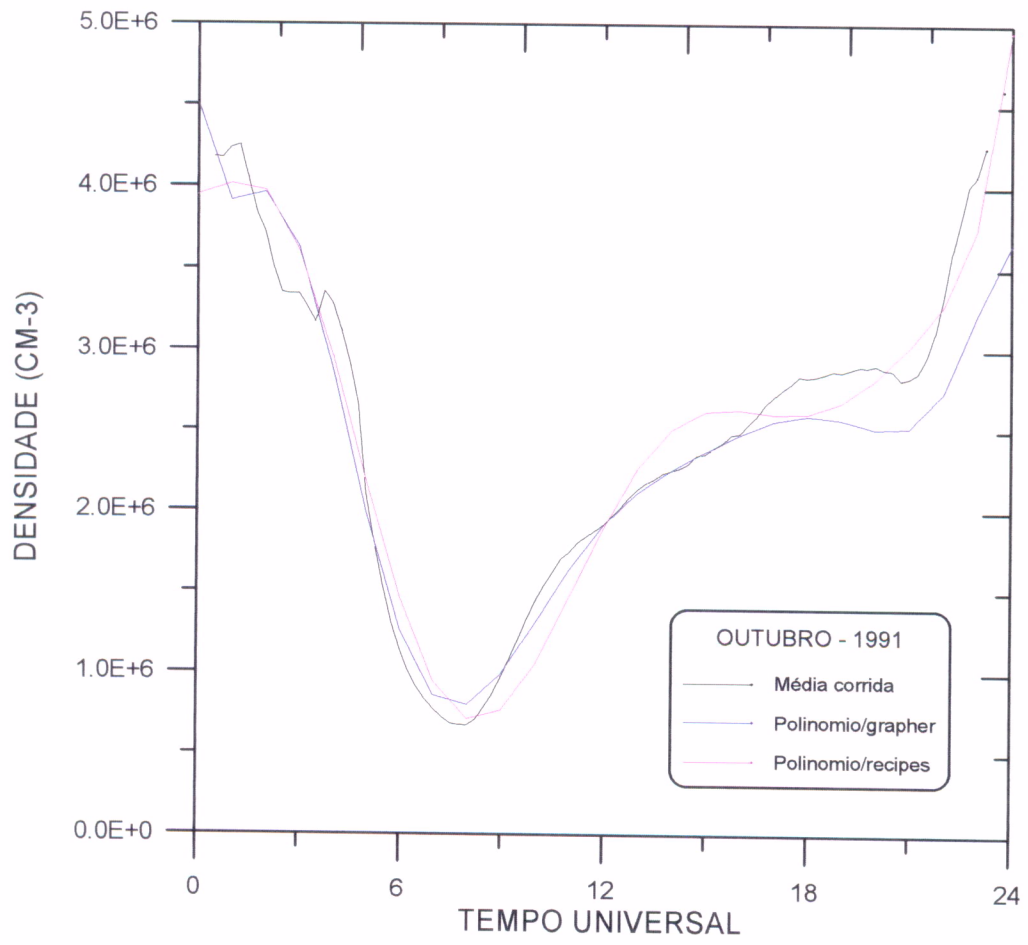
APÊNDICE - C

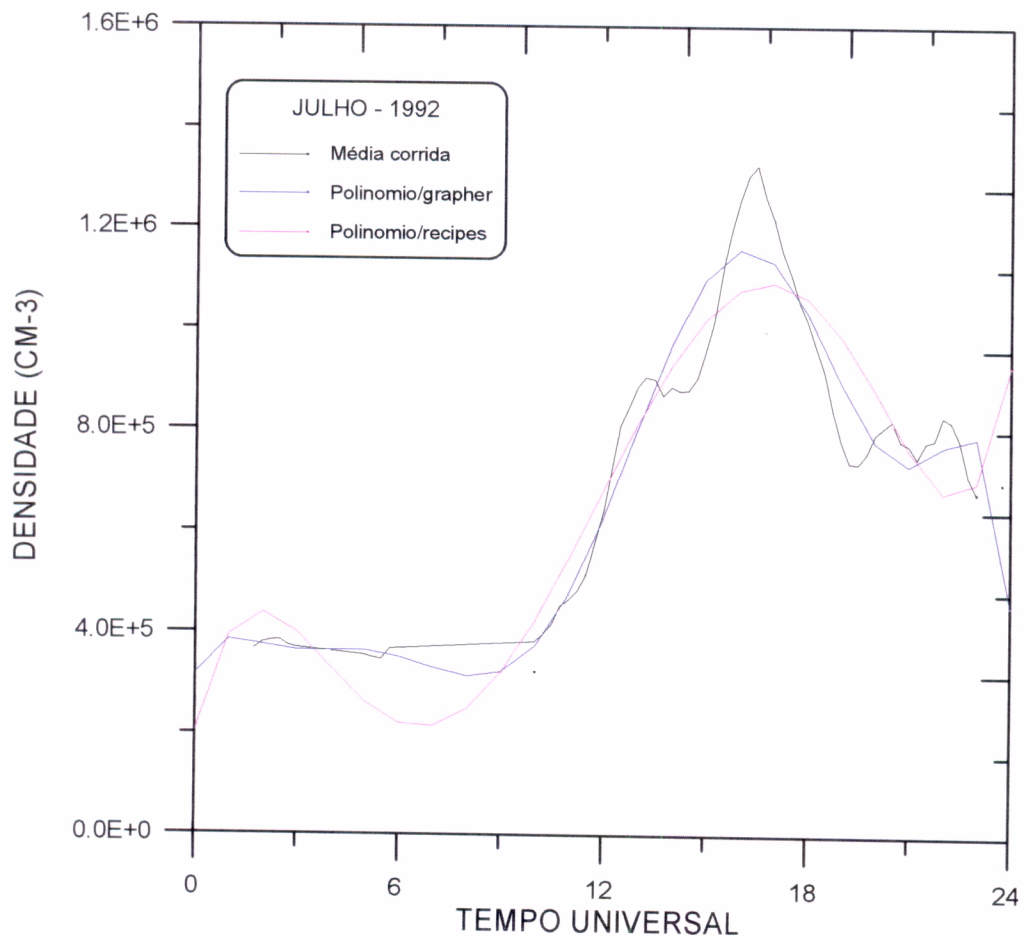
Gráficos de comparação entre os métodos de ajuste utilizados.

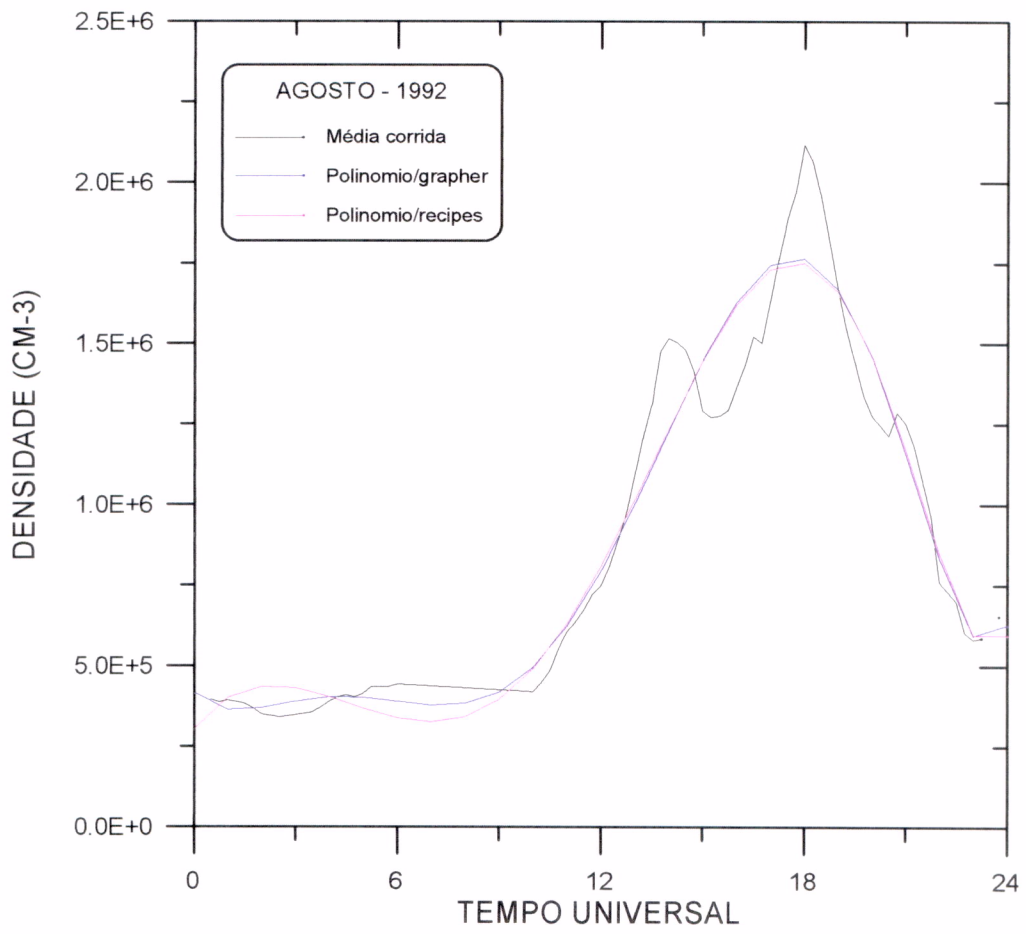


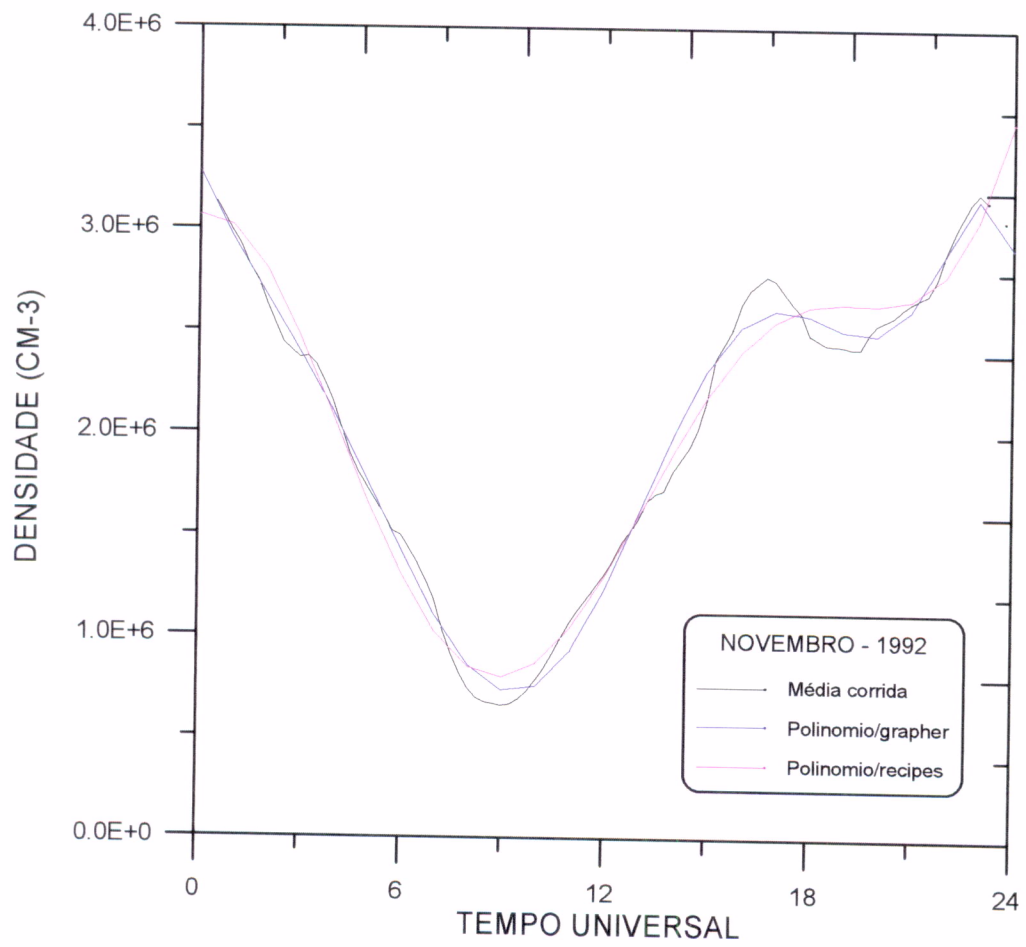


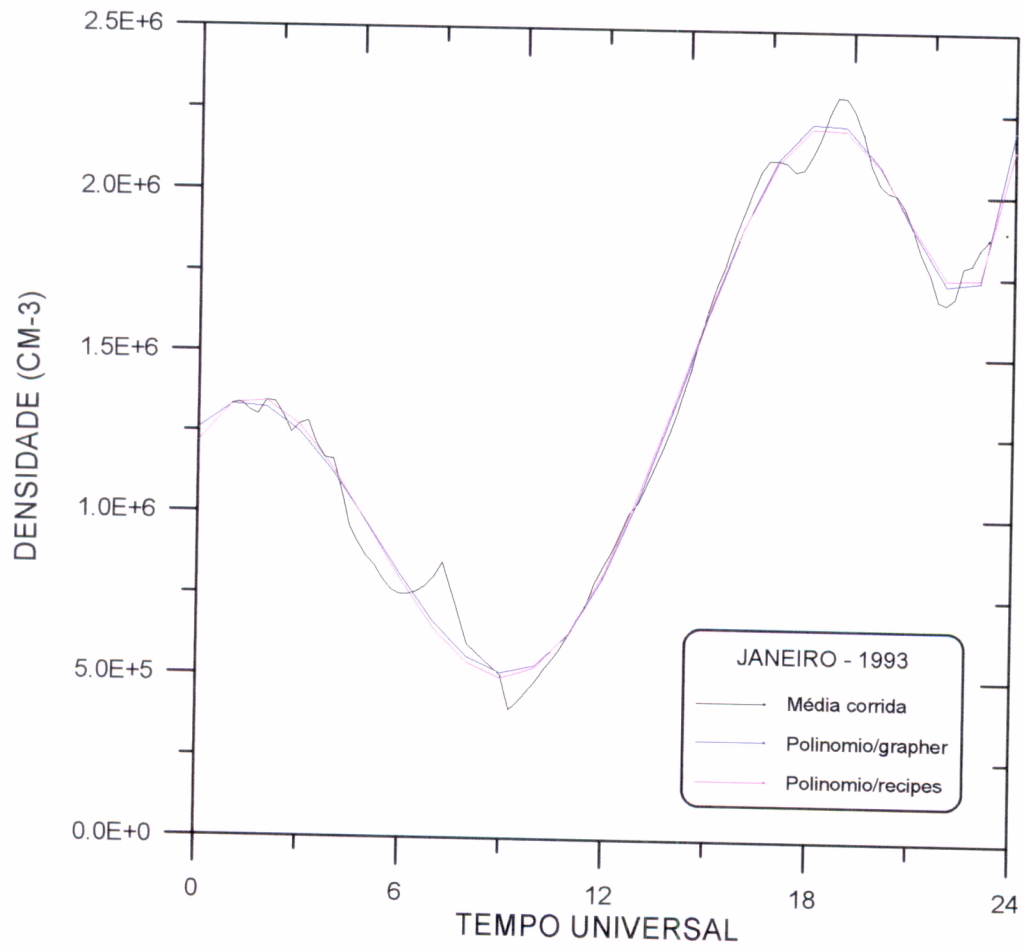


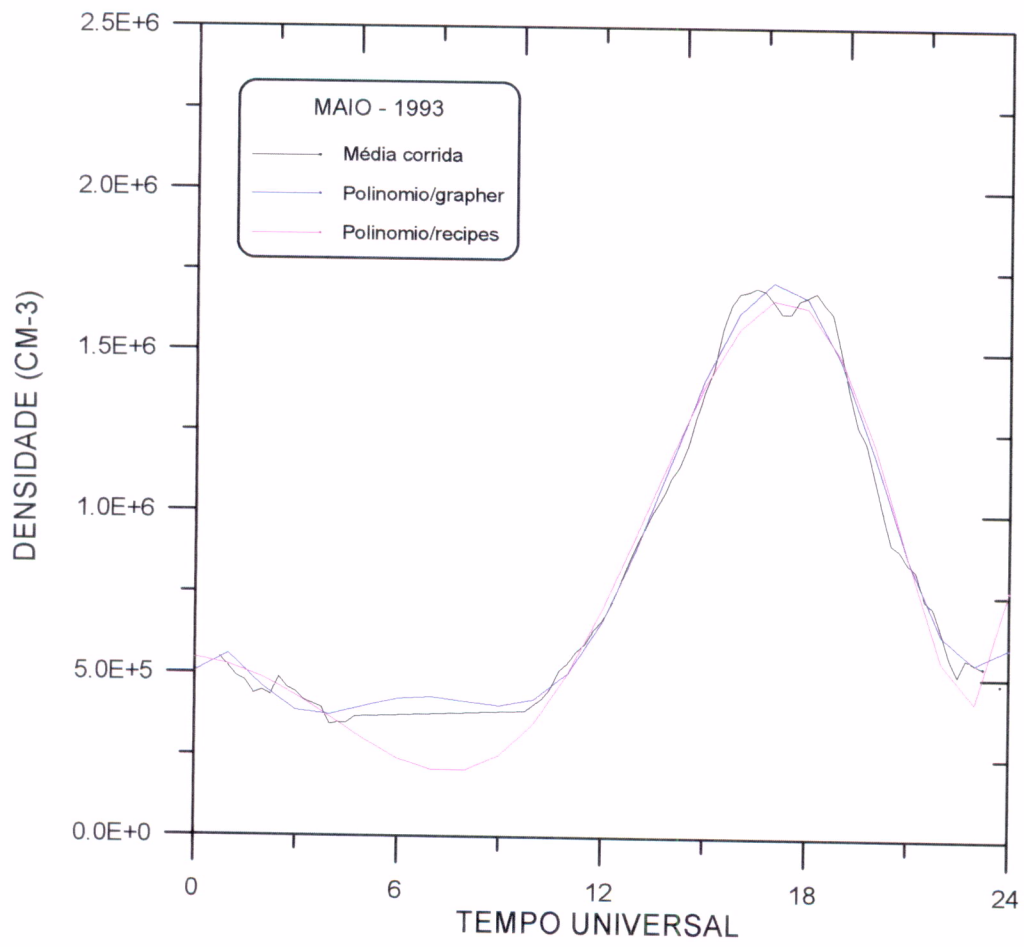


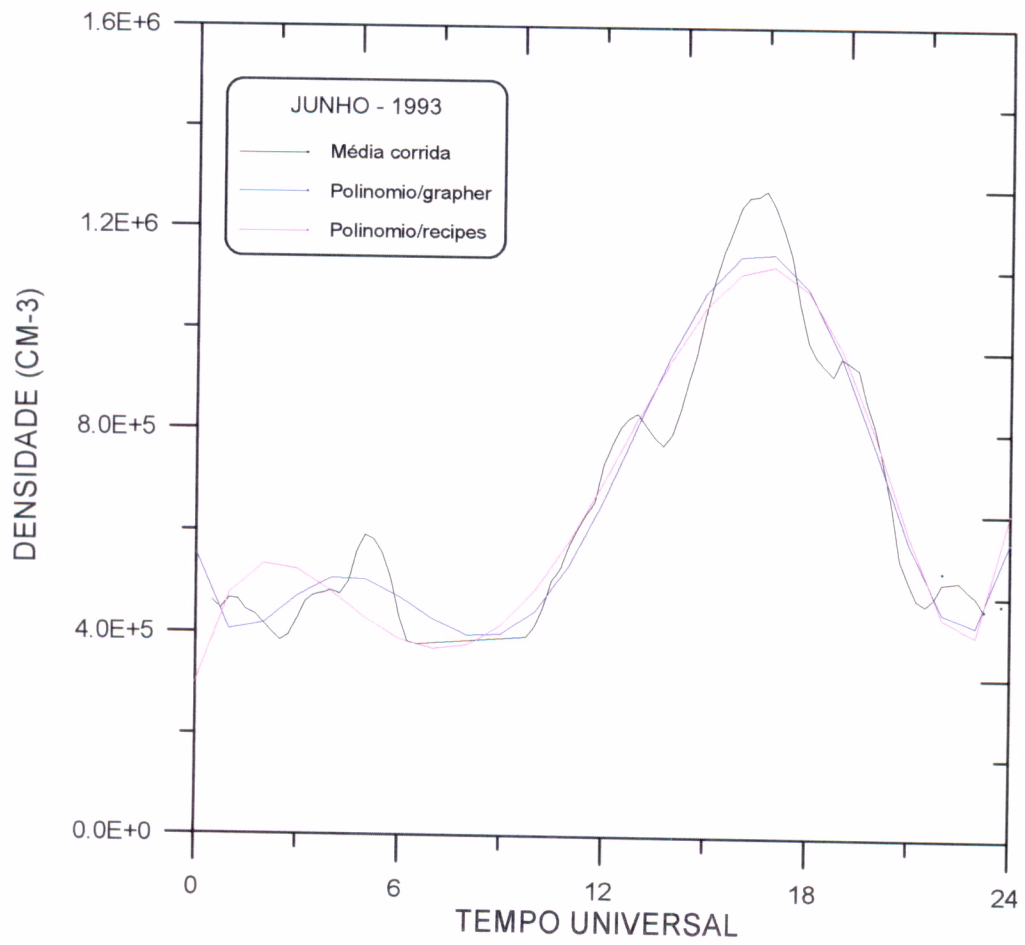


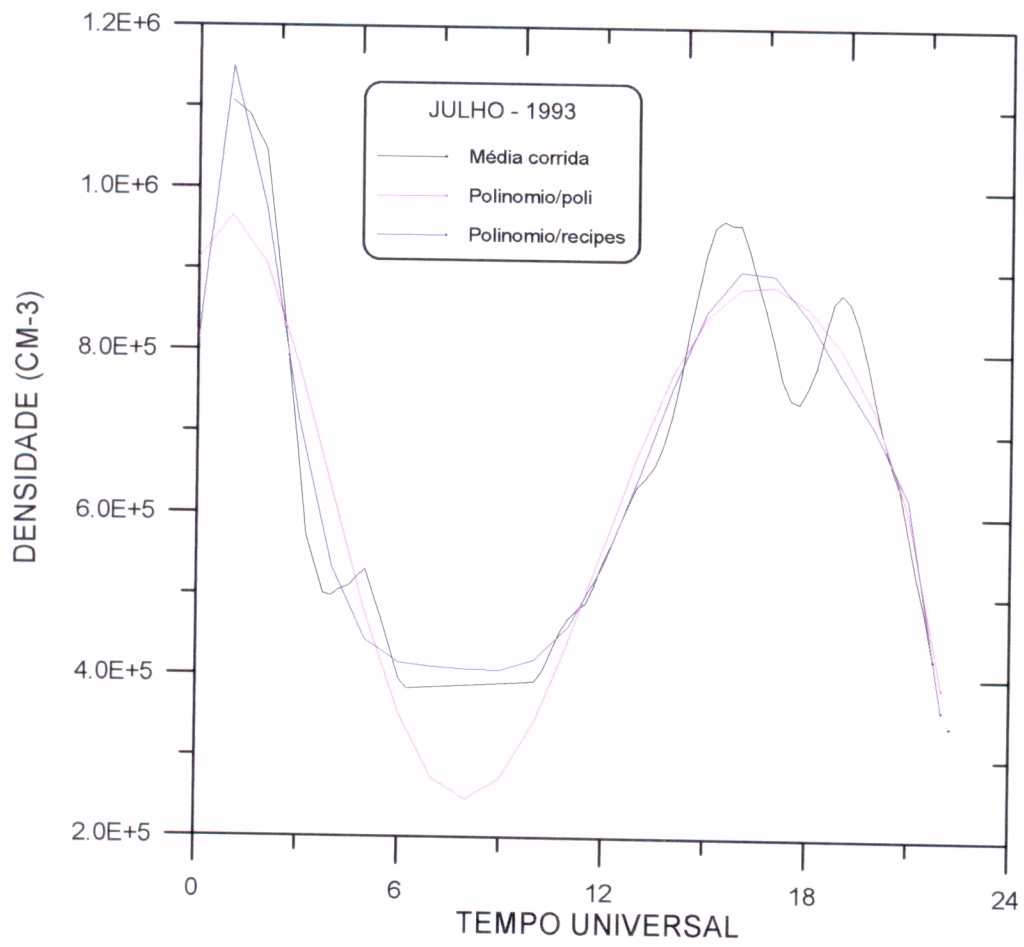


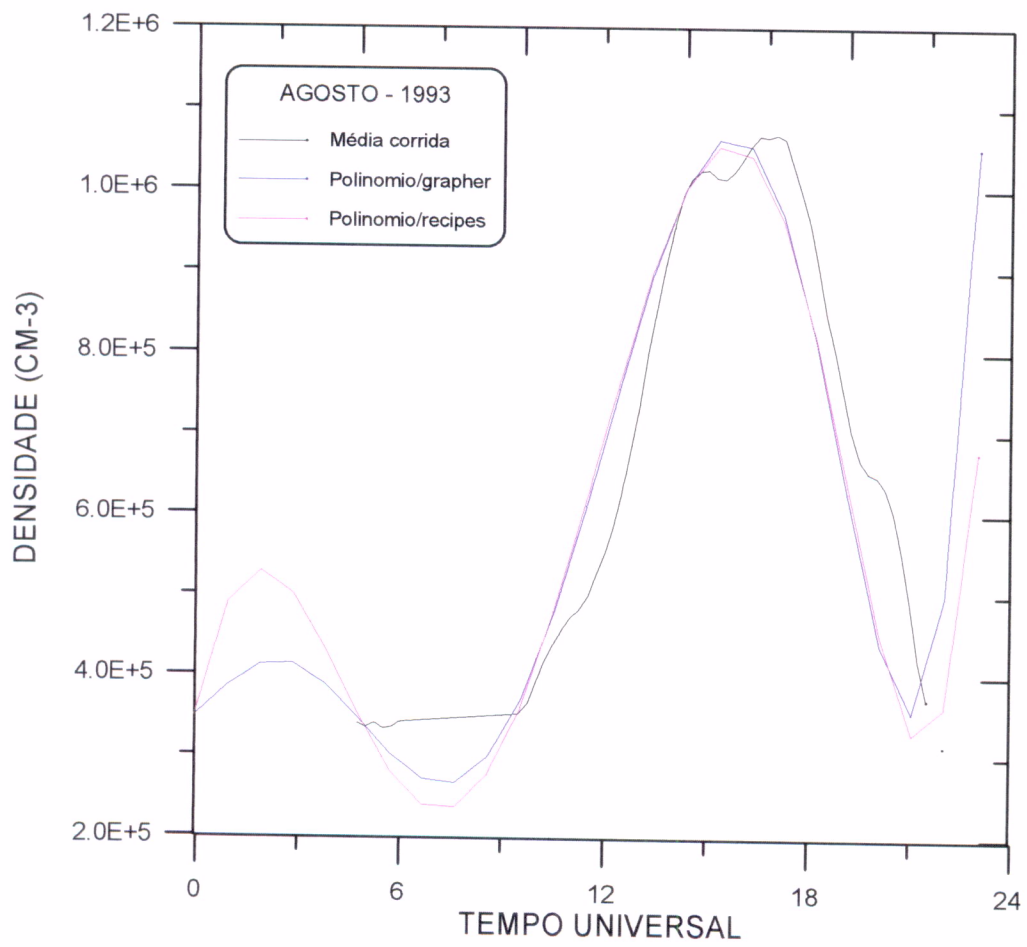


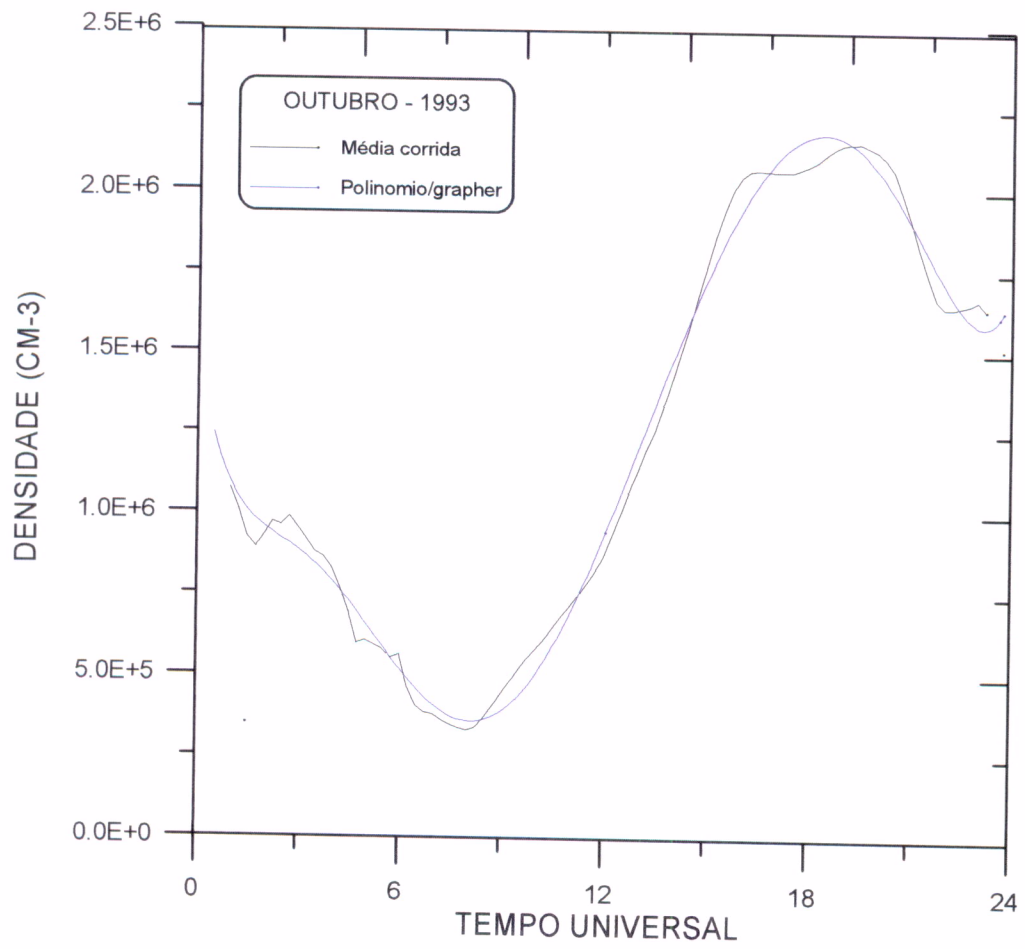


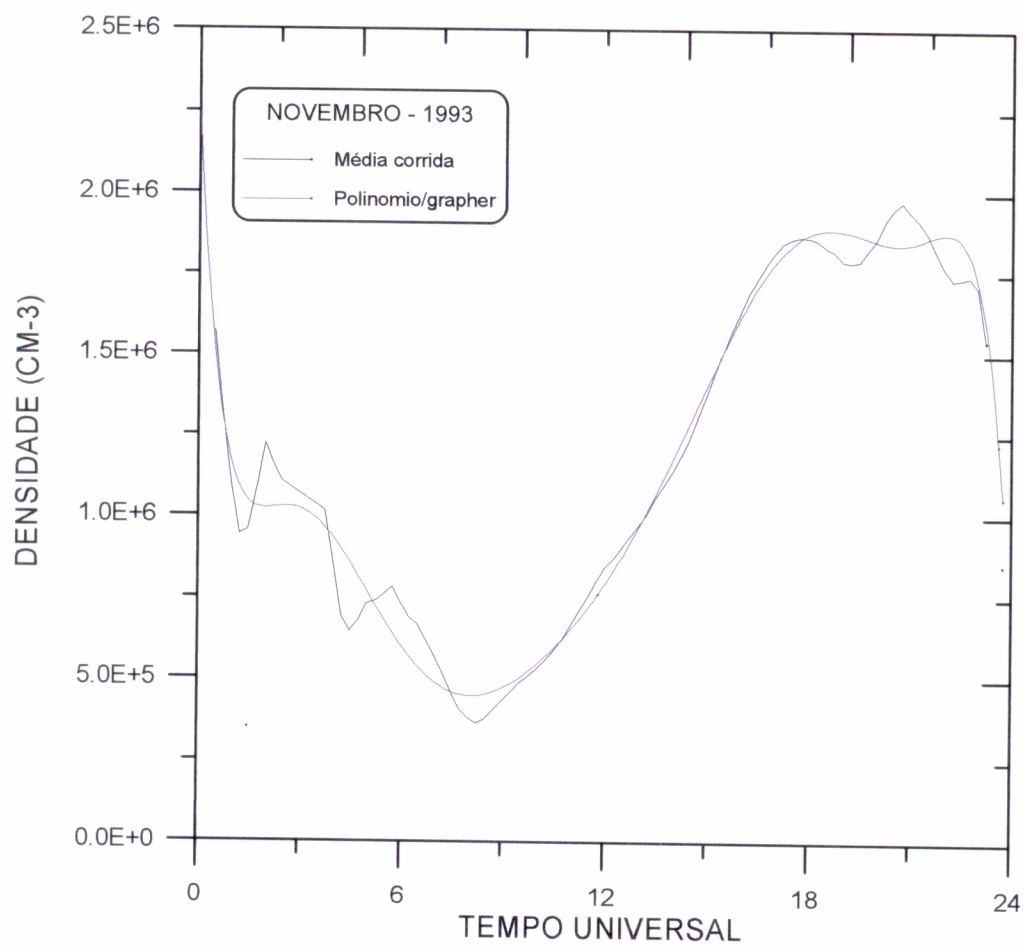


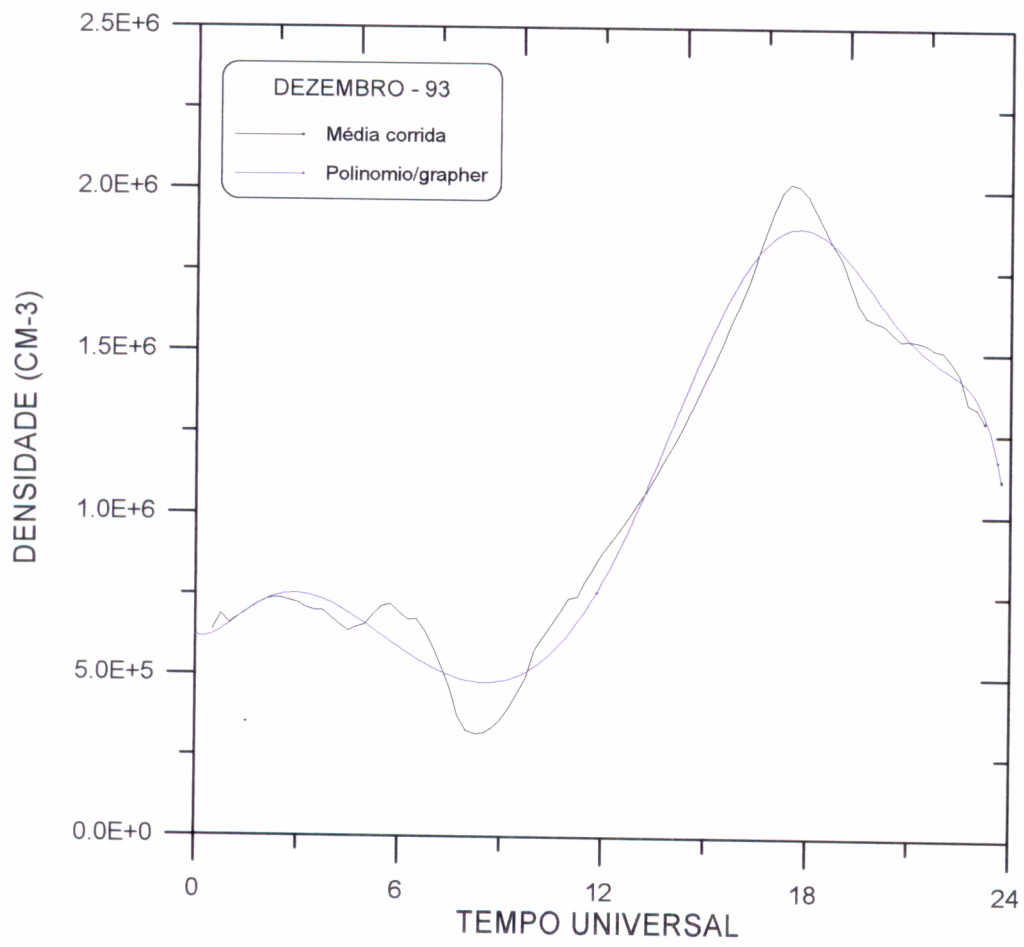


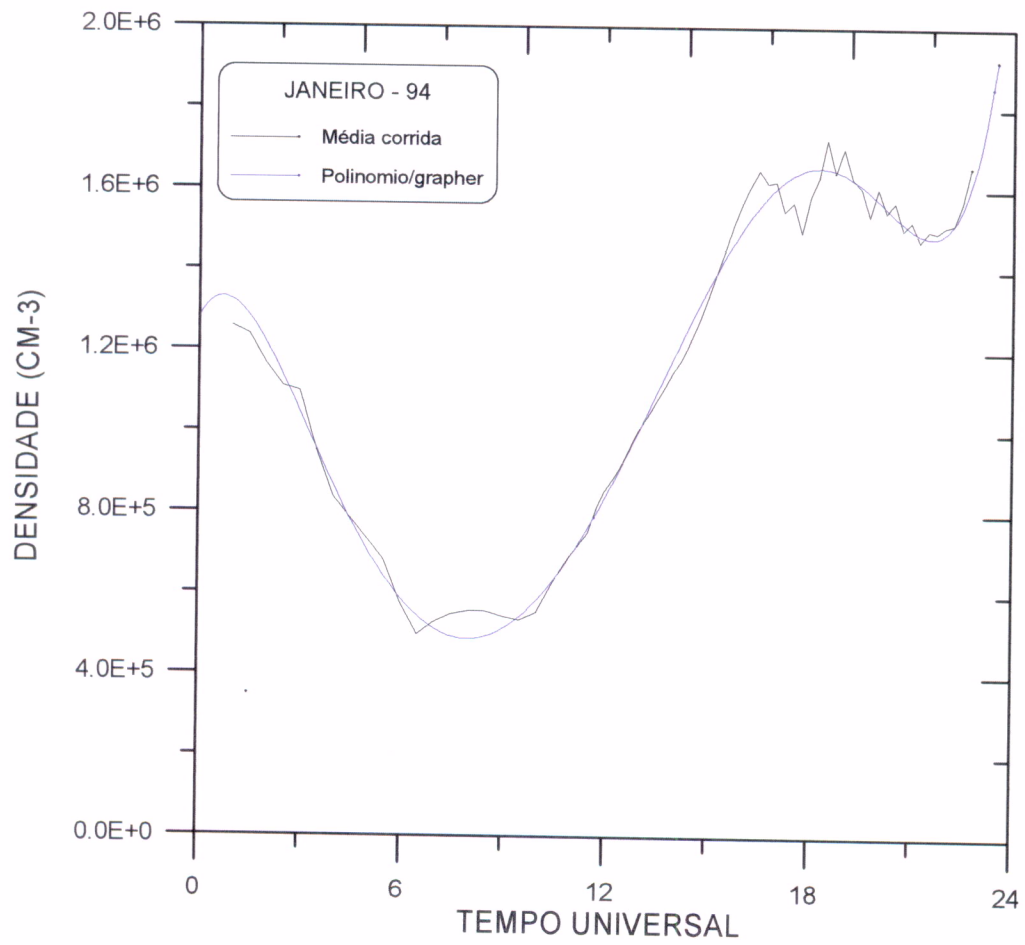












APÊNDICE - D

Listagem do programa "DIONCP.C"

```
/* DIONCP.C - Programa para geracao de arquivos com densidade para construcao de
'curvas modelo' INPE Leticia T. Cottini - dezembro/1996 */
```

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
```

```
FILE *PE,*PS;
int i=0,f=0,h=0;
float a[24],b[24],den[24],sn=0.0;
char arqsai[100],arqentra[15],x[15],y[15];
```

```
main(){
```

```
    printf("Estacao do ano (Primavera/Verao/Outono/Inverno) => ");
    scanf("%s",arqentra);
    if((PE=fopen(arqentra,"r"))==NULL){
        printf("Nao posso abrir o arquivo de entrada");
        exit(1);
    }
```

```
    printf("Sunspot Number => ");
    scanf("%s",y);
    sn=atof(y);
```

```
    printf("Arquivo de saida => ");
    scanf("%s",arqsai);
    if((PS=fopen(arqsai,"w"))==NULL){
        printf("Nao Posso Criar o arquivo de saida\n");
        exit(1);
    }
```

```
    for(i=0;i<24;i++) {
        den[i]=0.0;
        a[i]=0.0;
        b[i]=0.0;
    }
```

```
    i=0;
    while((fscanf(PE,"%s",x)) !=EOF){
```

```
        if (i>23 && i<=47){
```

```

        a[f]=atof(x);
        f++;
    }

    if (i>=48 && i<72){
        if (i==48) f=0;
        b[f]=atof(x);
        f++;
    }
    i++;
}

fprintf(PS," Local: Cachoeira Paulista\n");
fprintf(PS," Estacao do ano: %s\n",argentra);
fprintf(PS," Sunspot Number: %3.2f\n\n",sn);
fprintf(PS," Hora (UT)   Densidade (x10E5 cm-3)\n");

for(i=0;i<24;i++) {
    h=i;
    den[i]=((a[i]*sn)+b[i]);
    fprintf(PS," %d      %f\n",h,den[i]);
}

fclose(PE);
fclose(PS);
exit(0);
}

```

APÊNDICE - E

Gráficos elaborados utilizando-se arquivos gerados pelo modelo.

