



| | | | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. Publicação nº <i>INPE-2865-PRE/400</i> | 2. Versão | 3. Data <i>Set., 1983</i> | 5. Distribuição <input type="checkbox"/> Interna <input checked="" type="checkbox"/> Externa <input type="checkbox"/> Restrita |
| 4. Origem <i>DMC/DDO</i> | Programa <i>ORBAT</i> | | |
| 6. Palavras chaves - selecionadas pelo(s) autor(es) <i>CAMPO GEOMAGNÉTICO</i> <i>FUNÇÕES ASSOCIADAS DE LEGENDRE</i> <i>CÁLCULO RECURSIVO</i> | | | |
| 7. C.D.U.: <i>550.383.7</i> | | | |
| 8. Título <i>CÁLCULO RECURSIVO DO VETOR</i> <i>CAMPO GEOMAGNÉTICO</i> | | <i>INPE-2865-PRE/400</i> | 10. Páginas: <i>39</i> |
| | | | 11. Última página: <i>A.12</i> |
| | | | 12. Revisada por  <i>Wilson C. C. da Silva</i> |
| 9. Autoria <i>Roberto Vieira da Fonseca Lopes</i> <i>Valdemir Carrara</i> <i>Hélio Koiti Kuga</i> <i>Válder Matos de Medeiros</i> | | | 13. Autorizada por  <i>Nelson de Jesus Parada</i> <i>Diretor Geral</i> |
| Assinatura responsável <i>RAU da F.M</i> | | | |
| 14. Resumo/Notas <i>Neste trabalho foi elaborado um programa computacional que calcula as componentes do campo geomagnético no sistema referencial geográfico, utilizando o modelo de Gauss até a ordem e grau 10 e os coeficientes fornecidos pelo International Geomagnetic Reference Field 1980. O algoritmo é recursivo e utiliza fórmulas e constantes normalizadas, visando os requisitos de rapidez e precisão. O cálculo do campo geomagnético é útil para a simulação da dinâmica e de medidas de sensores de atitude em satélites artificiais. Resultados numéricos ilustrativos são apresentados.</i> | | | |
| 15. Observações <i>Este trabalho foi apresentado na 35ª Reunião Anual da SBPC, realizada de 6 a 13 de julho de 1983, em Belém, Pará.</i> | | | |

ABSTRACT

This work presents a computer program to evaluate the geomagnetic field components in geographic reference systems by using the Gauss model of order and degree 10 and with the International Geomagnetic Reference Field Coefficients 1980. The algorithm is recursive and normalized formulas and constants are used for the sake of rapidity and precision. The geomagnetic field evaluation is useful in artificial satellites dynamics and in attitude sensor measurements simulation. Illustrative numerical results are presented.

SUMÁRIO

| | <u>Pág.</u> |
|-----------------------------------------------|-------------|
| LISTA DE FIGURAS | v |
| 1 - <u>INTRODUÇÃO</u> | 1 |
| 2 - <u>MODELO DO CAMPO GEOMAGNÉTICO</u> | 2 |
| 3 - <u>ALGORITMO RECURSIVO</u> | 6 |
| 4 - <u>USO DAS SUB-ROTINAS</u> | 8 |
| 4.1 - Sub-rotina IGRF80 | 8 |
| 4.1.1 - Utilização | 8 |
| 4.1.2 - Propósito | 9 |
| 4.1.3 - Parâmetro | 9 |
| 4.1.4 - Observações | 9 |
| 4.2 - Sub-rotina MAGZON | 9 |
| 4.2.1 - Utilização | 9 |
| 4.2.2 - Propósito | 10 |
| 4.2.3 - Parâmetros | 10 |
| 4.2.4 - Observações | 10 |
| 4.3 - Sub-rotina MAGTES | 11 |
| 4.3.1 - Utilização | 11 |
| 4.3.2 - Propósito | 11 |
| 4.3.3 - Parâmetros | 11 |
| 4.3.4 - Observações | 11 |
| 4.4 - Sub-rotina GEOMAG | 12 |
| 4.4.1 - Utilização | 12 |
| 4.4.2 - Propósito | 12 |
| 4.4.3 - Parâmetros | 12 |
| 4.4.4 - Observações | 12 |
| 5 - <u>RESULTADOS E COMENTÁRIOS</u> | 13 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 19 |
| APÊNDICE A - LISTAGEM DE PROGRAMA | |

LISTA DE FIGURAS

| | <u>Pág.</u> |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| 1 - Sistemas de referência local (r, θ, ϕ) e geocêntrico terrestre (X, Y, Z) | 2 |
| 2 - Componentes do campo geomagnético na latitude 30° : (a) B_r , (b) B_θ , (c) B_ϕ ; (1) 600 km, (2) 700 km, (3) 800 km | 14 |
| 3 - Componentes do campo geomagnético no Equador: (a) B_r , (b) B_θ , (c) B_ϕ ; (1) 600 km, (2) 700 km, (3) 800 km | 15 |
| 4 - Componentes do campo geomagnético na latitude -30° : (a) B_r , (b) B_θ , (c) B_ϕ ; (1) 600 km, (2) 700 km, (3) 800 km | 16 |
| 5 - Magnitude do campo geomagnético nas latitudes: (a) 30° , (b) 0° , (c) -30° e nas altitudes: (1) 600 km, (2) 700 km e (3) 800 km | 17 |

1 - INTRODUÇÃO

O campo magnético terrestre é uma das variáveis que afetam a orientação dos satélites artificiais em relação ao seu centro de massa, ou seja, afetam a atitude de satélites principalmente quando se encontram em baixas altitudes terrestres (até 1000 km). Assim, esse campo interage com os campos magnéticos do satélite, sejam próprios ou induzidos, residuais ou de controle, o que dá origem a torques que influenciam o movimento de atitude. Além disso, o campo geomagnético é utilizado frequentemente como referência para observar a atitude através de sensores magnéticos que indicam a direção do campo no satélite. Portanto, para modelagem e simulações, tanto do movimento dinâmico da atitude quanto das medidas de sensores magnéticos, são necessárias as componentes do campo magnético em função da posição do satélite, calculadas com rapidez e precisão preestabelecidas.

Neste trabalho foi elaborado um programa de computador, em linguagem FORTRAN, que calcula as componentes B_r , B_θ e B_ϕ do campo magnético terrestre utilizando o modelo de Gauss (em série de harmônicos esféricos) e os coeficientes fornecidos pelo International Geomagnetic Reference Field, 1980 (Wertz, 1978; IGRF 1980, 1981). O algoritmo é recursivo e utiliza fórmulas e constantes normalizadas (Kuga et alii, 1983) para atender a requisitos de rapidez e precisão numérica. A ordem e o grau da série harmônica podem ser truncados conforme a precisão desejada e a ordem e o grau máximos admitidos pelo modelo dos coeficientes dos harmônicos esféricos (máximo = 10, no caso do IGRF 1980).

Na Seção 2, descrevem-se o modelo do campo geomagnético e as relações entre as várias normalizações existentes. Na Seção 3, descrevem-se o algoritmo recursivo e as adaptações necessárias para a utilização do algoritmo já desenvolvido para o campo geopotencial usando a forma completamente normalizada. Na Seção 4, tecem-se comentários sobre o uso das rotinas implementadas. Finalmente na Seção 5, apresentam-se os resultados numéricos ilustrativos e os comentários gerais.

2 - MODELO DO CAMPO GEOMAGNÉTICO

O campo geomagnético \vec{B} é dado pelo gradiente de uma função potencial escalar V que satisfaz a equação de Laplace:

$$\nabla^2 V = 0 , \quad (1)$$

cuja solução pode ser representada pela seguinte série de harmônicos esféricos:

$$V(r, \theta, \phi) = a \sum_{n=1}^K \left(\frac{a}{r}\right)^{n+1} \sum_{m=0}^n (g_n^m \cos m \phi + h_n^m \sin m \phi) P_n^m(\theta) , \quad (2)$$

onde a é o raio da Terra; g_n^m e h_n^m são os coeficientes de Gauss; r , θ e ϕ são, respectivamente, a distância geocêntrica, a co-latitute e a longitude leste de Greenwich, que definem as coordenadas de qualquer ponto no espaço em relação ao Sistema Geocêntrico Solidário (Figura 1); e P_n^m é uma função associada de Legendre.

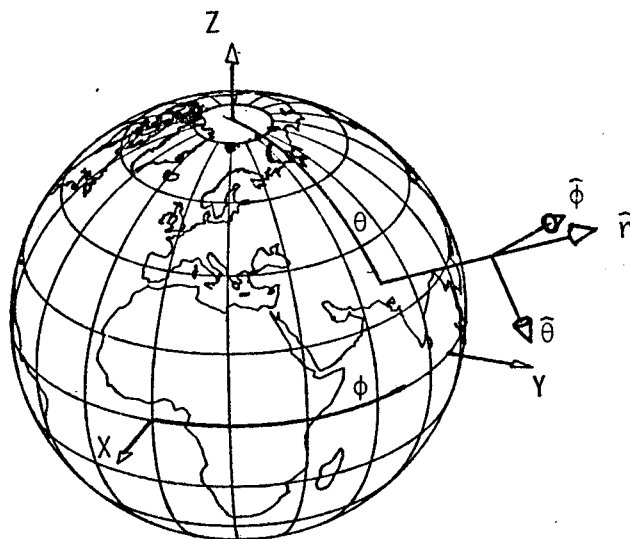


Fig. 1 - Sistemas de referência local (r, θ, ϕ) e geocêntrico terrestre (X, Y, Z).

Estimativas dos coeficientes de Gauss para n e m de 1 a 10, baseadas em medidas do campo geomagnético em diversos locais da Terra, são calculadas periodicamente e publicadas pelo International Geomagnetic Reference Field (IGRF 1980, 1981), juntamente com uma estimativa dos termos seculares \dot{g}_n^m e \dot{h}_n^m . Estes termos seculares servem para ajustar os coeficientes de Gauss à data de interesse, dentro de um período de validade indicado. Tais valores constam da Rotina IGRF80 e são válidos de 1980.0 a 1985.0. Adota-se para o raio terrestre o valor 6371,2 km, de acordo com os coeficientes listados no modelo IGRF 1980. Com estes dados, o grau de truncamento da série de harmônicos esféricos, K , pode ser escolhido entre 1 e 10, conforme o grau de precisão que se desejar para o modelo.

Quanto às funções associadas de Legendre (e aos polinômios de Legendre, que correspondem aos casos em que $m = 0$), várias normalizações são comumente utilizadas de acordo com os interesses em cada tipo de aplicação. As funções associadas de Legendre com normalização de Schmidt (ou quase-normalização de Schmidt), que é a adotada pelo IGRF, são tais que (Wertz, 1978):

$$\int_0^\pi [P_n^m(\theta)]^2 \sin\theta \, d\theta \triangleq \frac{2(2 - \delta_m^0)}{2n + 1}, \quad (3)$$

onde δ é o delta de Kroenecker. Já a normalização de Neumann, dita convencional, faz com que as funções associadas de Legendre, neste caso denotadas por $P_{n,m}$, satisfaçam a seguinte igualdade (Wertz, 1978):

$$\int_{-1}^1 [P_{n,m}(x)]^2 \, dx \triangleq \frac{2}{2n + 1} \frac{(n + m)!}{(n - m)!}, \quad x \triangleq \cos\theta. \quad (4)$$

No caso de normalização de Gauss, tem-se que:

$$\int_0^\pi [P^{n,m}(\theta)]^2 \sin\theta \, d\theta \triangleq \frac{2}{2n + 1} \frac{(n + m)!}{(n - m)!} \left[\frac{(n - m)!}{(2n - 1)!!} \right]^2. \quad (5)$$

Um outro tipo de normalização define as funções associadas de Legendre completamente normalizadas, que satisfazem a seguinte relação (Heiskanen and Moritz, 1967):

$$\frac{1}{4\pi} \int_S [\bar{P}_{n,m}(\theta)]^2 \cdot \begin{Bmatrix} \text{sen}^2 m\phi \\ \text{cos}^2 m\phi \end{Bmatrix} dS \triangleq \begin{Bmatrix} 1 - \delta_m^0 \\ 1 \end{Bmatrix}, \quad (6)$$

$$dS = \text{sen}\theta \cdot d\theta \cdot d\phi,$$

$$\theta \in [0, \pi],$$

$$\phi \in [0, 2\pi].$$

Em princípio, qualquer normalização pode ser utilizada desde que se compatibilizem os coeficientes de Gauss à normalização escolhida; assim:

$$\begin{aligned} (g_n^m \cos m\phi + h_n^m \text{sen} m\phi) P_n^m(\theta) &= (g_{n,m} \cos m\phi + h_{n,m} \text{sen} m\phi) \cdot \\ \cdot P_{n,m}(\theta) &= (g^{n,m} \cos m\phi + h^{n,m} \text{sen} m\phi) P^{n,m}(\theta) = \\ &= (\bar{g}_{n,m} \cos m\phi + \bar{h}_{n,m} \text{sen} m\phi) \bar{P}_{n,m}(\theta). \end{aligned} \quad (7)$$

Das Equações 3, 4, 5, 6 e 7 conclui-se que:

$$P_n^m(\theta) = \frac{P_{n,m}(\theta)}{K_{n,m}} = \frac{P^{n,m}(\theta)}{K^{n,m}} = \frac{\bar{P}_{n,m}(\theta)}{\bar{K}_{n,m}}, \quad (8)$$

$$\begin{Bmatrix} g_n^m \\ h_n^m \end{Bmatrix} = K_{n,m} \begin{Bmatrix} g_{n,m} \\ h_{n,m} \end{Bmatrix} = K^{n,m} \begin{Bmatrix} g^{n,m} \\ h^{n,m} \end{Bmatrix} = \bar{K}_{n,m} \begin{Bmatrix} \bar{g}_{n,m} \\ \bar{h}_{n,m} \end{Bmatrix}, \quad (9)$$

onde:

$$K_{n,m} \triangleq \left[\frac{(n+m)!}{(2-\delta_m^0)(n-m)!} \right]^{1/2}, \quad (10)$$

$$K^{n,m} \triangleq K_{n,m} \frac{(n-m)!}{(2n-1)!!}, \quad (11)$$

$$\bar{K}_{n,m} \triangleq (2n+1)^{1/2}, \quad (12)$$

e

$$(2n-1)!! \triangleq (2n-1).(2n-3) \dots 5.3.1.$$

Neste trabalho, adota-se a normalização definida pela Equação 6 que permite um cálculo recursivo numericamente preciso e rápido, além de proporcionar uma interpretação mais direta da magnitude relativa dos coeficientes de Gauss, já que o valor médio quadrático de $(\bar{g}_{n,m} \cos m\phi + \bar{h}_{n,m} \sin m\phi) \bar{P}_{n,m}(\theta)$ na esfera é dado por $\bar{g}_{n,m}^2 + \bar{h}_{n,m}^2$. Uma vez definidos os coeficientes de Gauss e a normalização adotada, podem-se calcular as componentes do campo geomagnético \vec{B} , dadas por:

$$B_r = -\frac{\partial V}{\partial r} = \sum_{n=1}^K \left(\frac{a}{r}\right)^{n+2} (n+1) \sum_{m=0}^n [\bar{g}_{n,m} \cos m\phi + \bar{h}_{n,m} \sin m\phi] \bar{P}_{n,m}(\theta), \quad (13)$$

$$B_\theta = -\frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial \theta} = -\sum_{n=1}^K \left(\frac{a}{r}\right)^{n+2} \sum_{m=0}^n [\bar{g}_{n,m} \cos m\phi + \bar{h}_{n,m} \sin m\phi] \frac{\partial \bar{P}_{n,m}(\theta)}{\partial \theta}, \quad (14)$$

$$B_\phi = \frac{-1}{r \sin\theta} \frac{\partial V}{\partial \phi} = \frac{-1}{\sin\theta} \sum_{n=1}^K \left(\frac{a}{r}\right)^{n+2} \sum_{m=1}^n m [-\bar{g}_{n,m} \sin m\phi + \bar{h}_{n,m} \cos m\phi] \bar{P}_{n,m}(\theta). \quad (15)$$

A seguir, apresenta-se o algoritmo recursivo utilizado para o cálculo destas componentes.

3 - ALGORITMO RECURSIVO

Para o cálculo recursivo das componentes de \vec{B} são úteis as seguintes definições:

$$C_m \triangleq \cos m \phi , \quad (16a)$$

$$S_m \triangleq \sin m \phi , \quad (16b)$$

$$\psi \triangleq 90 - \theta ,$$

$$Y_n \triangleq P_{n,0}(\theta) , \quad (17a)$$

$$Y'_n \triangleq \frac{\partial P_{n,0}}{\partial \sin \psi} = \frac{-1}{\sin \theta} \cdot \frac{P_{n,0}(\theta)}{\partial \theta} , \quad (17b)$$

$$\bar{Y}_{n,m} \triangleq \sec \psi \bar{P}_{n,m}(\theta) = \frac{1}{\sin \theta} \bar{P}_{n,m}(\theta) , \quad (18a)$$

$$\bar{Y}'_{n,m} \triangleq \cos \psi \frac{\partial \bar{P}_{n,m}}{\partial \sin \psi} = - \frac{\partial \bar{P}_{n,m}(\theta)}{\partial \theta} . \quad (18b)$$

Para $m = 0$ não há vantagem em utilizar polinômios completamente normalizados nas fórmulas de recursão, pois o próprio $P_{n,m}(\theta)$ não envolve grandes números. Neste caso, a recursão para Y_n e Y'_n , também, para C_m e S_m são dadas pelas seguintes equações usuais:

$$C_m = C_{m-1} C_1 - S_{m-1} S_1 , \quad C_1 = \cos \phi , \quad (19a)$$

$$S_m = C_{m-1} S_1 + S_{m-1} C_1 , \quad S_1 = \sin \phi , \quad (19b)$$

$$Y_n = \frac{2n-1}{n} \sin \psi Y_{n-1} - \frac{n-1}{n} Y_{n-2} , \quad Y_0 = 1 , \quad (20a)$$

$$Y'_n = \text{sen}\psi Y'_{n-1} + n Y_{n-1}, \quad Y'_1 = 1. \quad (20b)$$

Para $m \neq 0$ utilizam-se as fórmulas recursivas desenvolvidas por Kuga et alii (1983), dadas por:

$$\bar{Y}_{n,m} = \left[\frac{2n+1}{2n} \right]^{1/2} \cdot \cos\psi \cdot \bar{Y}_{n-1,n-1}, \quad m = n, \quad \bar{Y}_{1,1} = 3^{1/2} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \bar{Y}_{n,m} = & \left[\frac{2n+1}{n^2 - m^2} \right]^{1/2} \left[(2n-1)^{1/2} \text{sen}\psi Y_{n-1,m} - \right. \\ & \left. - \left(\frac{n^2 - m^2 - 2n + 1}{2n-3} \right)^{1/2} Y_{n-2,m} \right], \quad 0 < m < n, \end{aligned} \quad (22)$$

$$\bar{Y}'_{n,m} = -n \text{sen}\psi Y_{n,m} + \left[\frac{2n+1}{2n-1} (n^2 - m^2) \right]^{1/2} \bar{Y}_{n-1,m}, \quad (23)$$

$$0 < m \leq n,$$

com $\bar{Y}_{n,m}$ nulo para $m > n$ nas Equações 22 e 23. Com estas definições e fórmulas, as componentes de \vec{B} podem ser calculadas pelo seguinte algoritmo:

1) Cálculo das componentes para $m = 0$:

$$B_r = \sum_{n=1}^K \left(\frac{a}{r} \right)^{n+2} (n+1) \bar{g}_{n,0} (2n+1)^{1/2} Y_n,$$

$$B_\theta = \text{sen}\theta \sum_{n=1}^K \left(\frac{a}{r} \right)^{n+2} \bar{g}_{n,0} (2n+1)^{1/2} Y'_n,$$

$$B_\phi = 0,$$

com Y_n e Y'_n calculados pelas Equações 20a e b.

2) Cálculo das componentes para $m \neq 0$:

$$m = 1$$

$$a) B_r \leftarrow B_r + \left(\frac{a}{r}\right)^{m+2} (m+1) [\bar{g}_{m,m} C_m + \bar{h}_{m,m} S_m] \operatorname{sen} \theta \bar{Y}_{m,m},$$

$$B_\theta \leftarrow B_\theta + \left(\frac{a}{r}\right)^{m+2} [\bar{g}_{m,m} C_m + \bar{h}_{m,m} S_m] Y'_{m,m},$$

$$B_\phi \leftarrow B_\phi - \left(\frac{a}{r}\right)^{m+2} m [-\bar{g}_{m,m} S_m + \bar{h}_{m,m} C_m] \bar{Y}_{m,m}.$$

Se $m = K$, fim. Se $m \neq K$, então: $n = m + 1$.

$$b) B_r \leftarrow B_r + \left(\frac{a}{r}\right)^{n+2} (n+1) [\bar{g}_{n,m} C_m + \bar{h}_{n,m} S_m] \operatorname{sen} \theta \bar{Y}_{n,m},$$

$$B_\theta \leftarrow B_\theta + \left(\frac{a}{r}\right)^{n+2} [\bar{g}_{n,m} C_m + \bar{h}_{n,m} S_m] \bar{Y}'_{n,m},$$

$$B_\phi \leftarrow B_\phi - \left(\frac{a}{r}\right)^{n+2} m [-\bar{g}_{n,m} S_m + \bar{h}_{n,m} C_m] \bar{Y}_{n,m}.$$

Se $n = K$, então $m \leftarrow m + 1$ e segue-se ao item a).

Se $n < K$, então $n \leftarrow n + 1$ e retorna-se ao item b).

4 - USO DAS SUB-ROTINAS

4.1 - SUB-ROTINA IGRF80

4.1.1 - UTILIZAÇÃO

CALL IGRF80 (DJ).

4.1.2 - PROPÓSITO

A sub-rotina IGRF80 define os coeficientes zonais $\bar{g}_{n,0}$ e os coeficientes tesserais $\bar{g}_{n,m}$ e $\bar{h}_{n,m}$, completamente normalizados até a ordem e o grau 10, e os corrige até a data juliana, DJ, de acordo com o modelo IGRF-1980 (IGRF 1980, 1981).

4.1.3 - PARÂMETRO

Entrada

DJ - Data juliana correspondente à data na qual se deseja calcular o campo magnético.

4.1.4 - OBSERVAÇÕES

a) Essa sub-rotina deve ser chamada uma única vez, logo no início do programa que a utiliza. Ela tem a função de inicializar os valores dos coeficientes.

b) Após a chamada, os coeficientes estarão definidos nos "COMMON"s:

```
COMMON/GNO/GO(10)
COMMON/HNM/H(10,10)
COMMON/GNM/G(10,10)
```

que serão utilizados para o cálculo da série harmônica.

4.2 - SUB-ROTINA MAGZON

4.2.1 - UTILIZAÇÃO

CALL MAGZON (N1, BZ).

4.2.2 - PROPÓSITO

A sub-rotina MAGZON calcula as componentes zonais do campo geomagnético no sistema local em nano Tesla.

4.2.3 - PARÂMETROS

Entrada

N1 - Valor de truncamento da série ($N1 = K$, ver Equações 13, 14, 15).

Saída

BZ - Vetor de dimensão 3 que contém as componentes zonais do campo no sistema local.

4.2.4 - OBSERVAÇÕES

- a) Os coeficientes zonais $\bar{g}_{n,0}$ \bar{j}_n devem estar definidos, i.e., a sub-rotina IGRF80 deve ter sido anteriormente chamada.
- b) No caso de não se usar a sub-rotina gerente, GEOMAG, o seguinte COMMON deve ser definido:

COMMON/CTEI80/SL,CL,SF,CF,RG,

onde:

SL = $\text{sen} \lambda$,

CL = $\text{cos} \lambda$,

SF = $\text{sen} \psi$,

CF = $\text{cos} \psi$,

$RG = r$ (módulo do raio vetor)

e tais parâmetros (SL, CL, SF, CF, RG) já devem estar calculados e carregados neste COMMON antes de chamar a rotina.

4.3 - SUB-ROTINA MAGTES

4.3.1 - UTILIZAÇÃO

CALL MAGTES (N2, B).

4.3.2 - PROPÓSITO

A sub-rotina MAGTES calcula as componentes tesserais do campo magnético no sistema local em nano Tesla.

4.3.3 - PARÂMETROS

Entrada

N2 - Valor de truncamento da série ($N2 = K$, ver Equações 13, 14, 15).

Saída

B - Vetor de dimensão 3 que contém as componentes tesserais do campo no sistema local.

4.3.4 - OBSERVAÇÕES

a) Os coeficientes tesserais $\bar{g}_{n,m}$ e $\bar{h}_{n,m}$ já devem estar definidos, i.e., a sub-rotina IGRF80 deve ter sido anteriormente chamada.

b) Vale a observação b da Seção 4.2.4.

4.4 - SUB-ROTINA GEOMAG

4.4.1 - UTILIZAÇÃO

CALL GEOMAG (K, DJ, TSG, XI, IN, B).

4.4.2 - PROPÓSITO

A sub-rotina GEOMAG gerencia a chamada das rotinas anteriores e, como saída, fornece o vetor campo geomagnético local, B, em nano Tesla.

4.4.3 - PARÂMETROS

Entradas

K - Valor de truncamento da série.

DJ - Data juliana em dias.

TSG - Tempo sideral de Greenwich em radianos.

XI - Coordenadas retangulares do ponto onde B é calculado, em metros, no sistema inercial (Kuga et alii, 1981).

IN - Índice que indica o sistema de referência em que B é fornecido:

0 - sistema local (r, θ, ϕ) ,

1 - sistema inercial (X, Y, Z) .

Saídas

B - Vetor campo geomagnético, em nT.

4.4.4 - OBSERVAÇÕES

a) A sub-rotina GEOMAG chama inteiramente a sub-rotina IGRF80.

b) A validade deste modelo do campo magnético estende-se de 1/1/1980 (DJ = 2444239.5) a 31/12/1984 (DJ = 2446065.5), não devendo exceder os limites máximos em 1975 e 1989 (IGRF 1980, 1981).

5 - RESULTADOS E COMENTÁRIOS

Alguns aspectos numéricos são apresentados nas Figuras 2 a 5. Estas figuras mostram a variação de cada componente de \vec{B} e do módulo de \vec{B} com a longitude. Três valores representativos são adotados para a latitude e para a altitude. Isto permite avaliar as variações de cada componente da intensidade do campo com a altitude e também a acentuada queda de intensidade na região da anomalia brasileira, na vizinhança da altitude -30° e longitude -50° .

A sub-rotina GEOMAG desempenha com rapidez e precisão o cálculo do campo geomagnético \vec{B} , e vem sendo utilizada na simulação da dinâmica de atitude e da medida de sensores magnéticos do 1º satélite da MECB. Poderá ainda ser incorporada ao "software" de aplicação para a determinação e propagação de atitude do referido satélite.

Pretende-se dar seqüência a este trabalho acrescentando o cálculo do potencial V , implementando uma rotina de traçado automático de cartas geomagnéticas, e implantando os modelos de períodos anteriores.

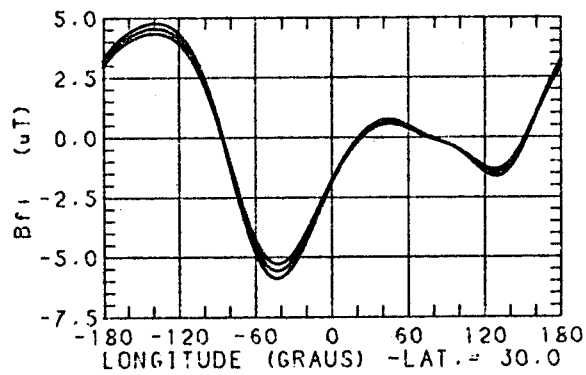
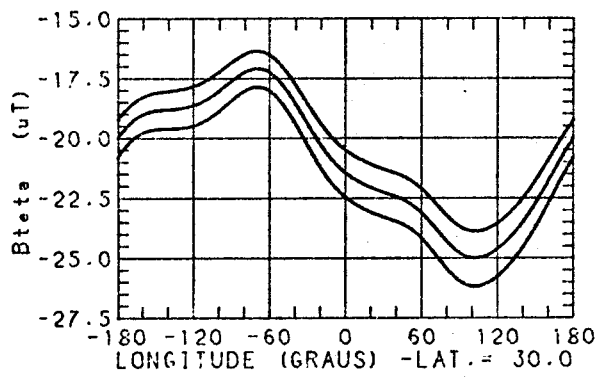
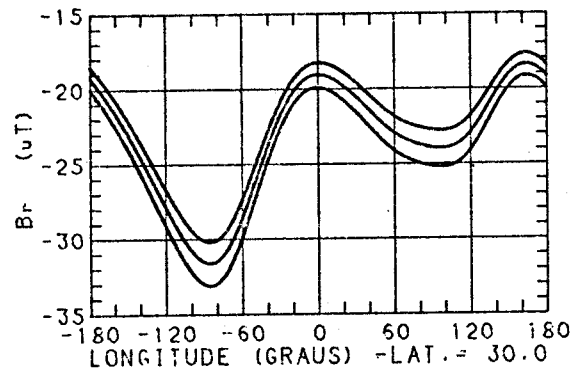


Fig. 2 - Componentes do campo geomagnético na latitude 30° : (a) B_r , (b) B_{θ} , (c) B_{ϕ} ; (1) 600 km, (2) 700 km, (3) 800 km.

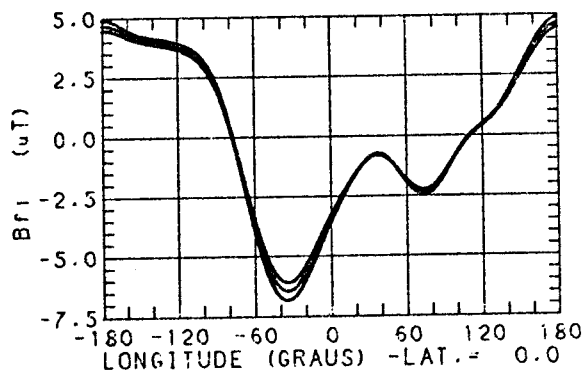
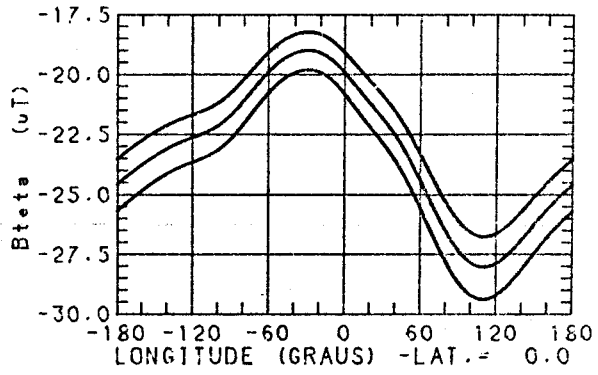
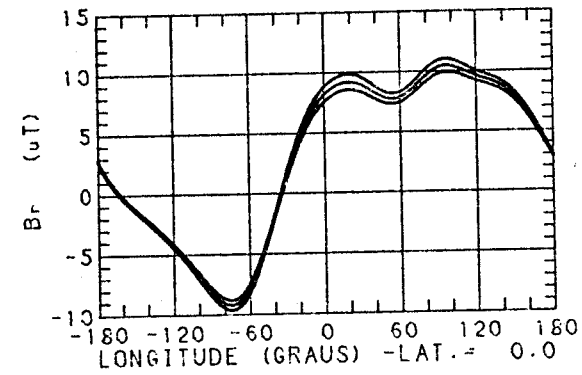


Fig. 3 - Componentes do campo geomagnético no Equador: (a) B_r , (b) B_{θ} , (c) B_{ϕ} ; (1) 600 km, (2) 700 km, (3) 800 km.

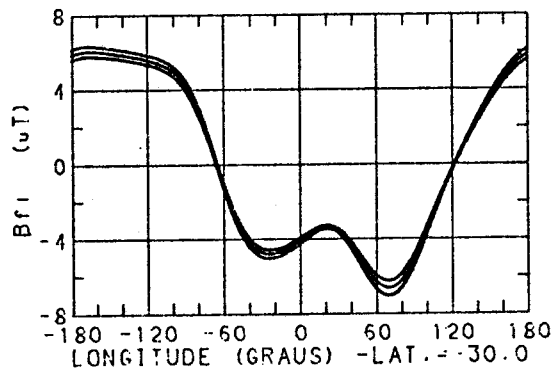
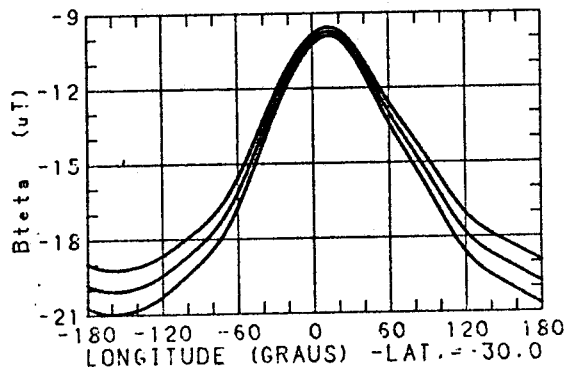
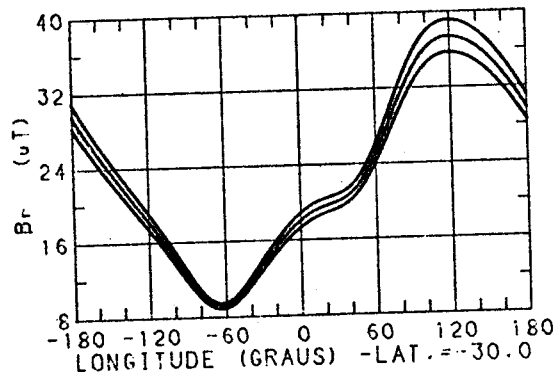


Fig. 4 - Componentes do campo geomagnético na latitude -30° : (a) B_r , (b) B_{θ} , (c) B_{ϕ} ; (1) 600 km, (2) 700 km, (3) 800 km.

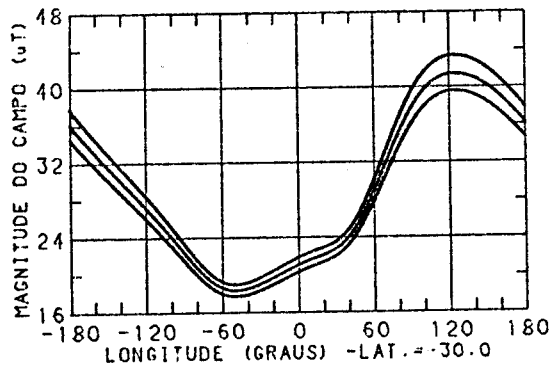
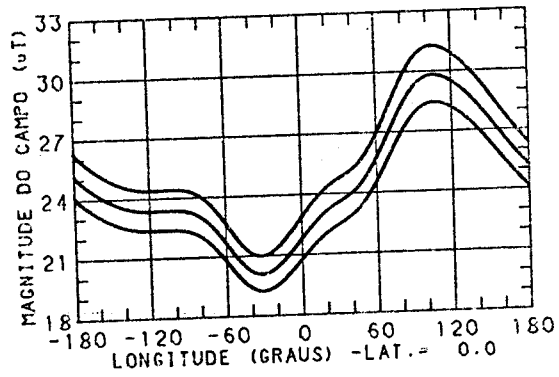
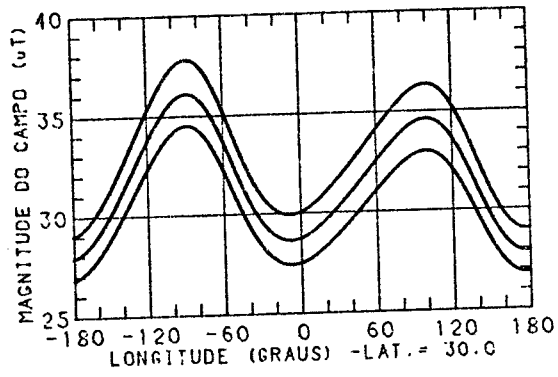
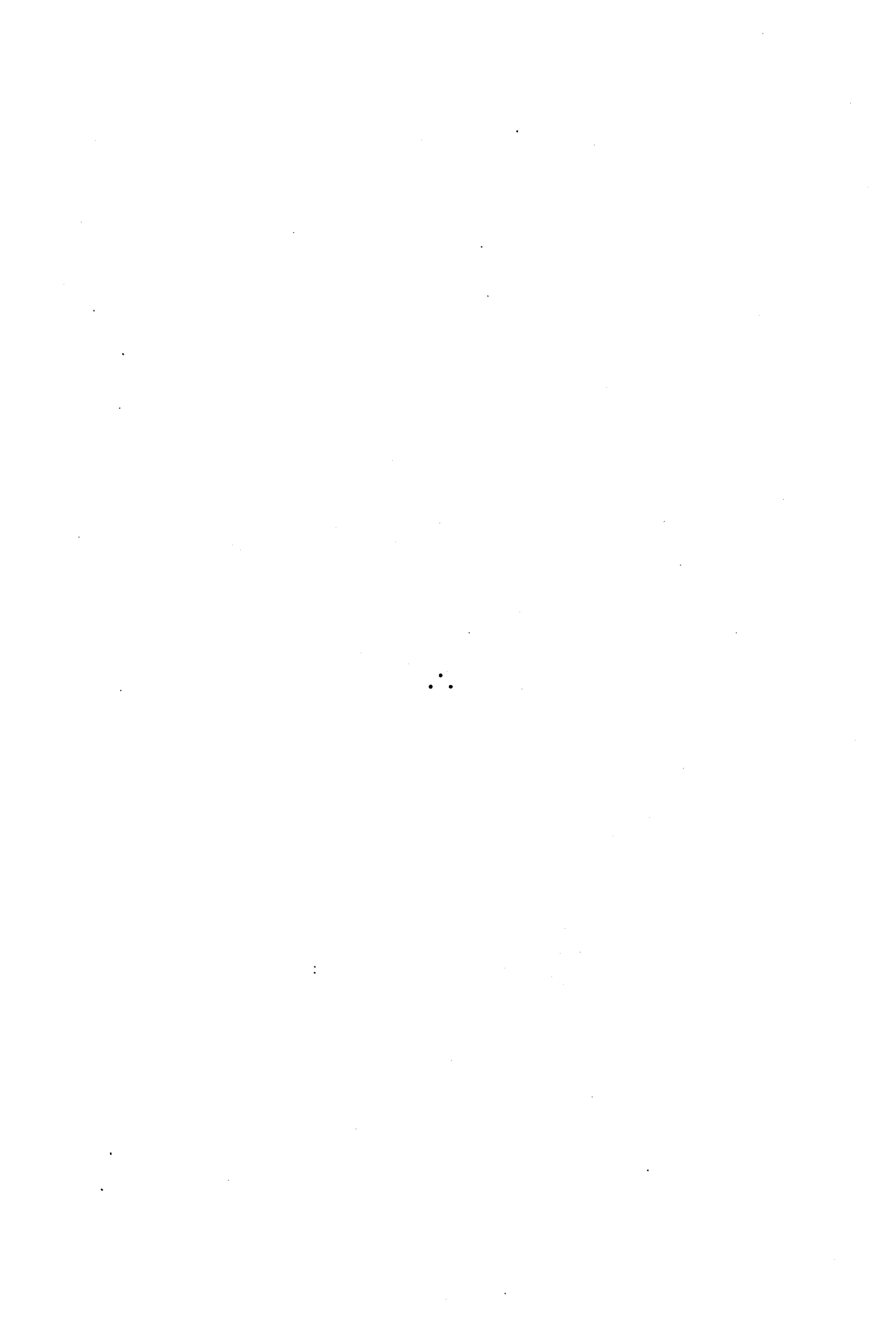


Fig. 5 - Magnitude do campo geomagnético nas latitudes: (a) 30° , (b) 0° , (c) -30° e nas altitudes: (1) 600 km, (2) 700 km e (3) 800 km.



APÊNDICE A

LISTAGEM DE PROGRAMA

SUBROUTINE GEOMAG(N,DJ,TSG,XI,IN,B)

ESTA ROTINA GERENCIA AS CHAMADAS DAS ROTINAS
"MAGZON" E "MAGTES" E PROVE MUDANCAS DE SIS-
TEMAS DE COORDENADAS INERCIAL-TERRESTRE-LO-
CAL E VICE-VERSA.

ENTRADAS

***** N.....ORDEM E GRAU DOS COEFICIEN-
TES DOS HARMONICOS ESFERICOS,
NO MAXIMO 10 .
DJ.....DIA JULIANO ENTRE 2444239.5 E
2446065.5 (1/1/1980 A 31/12/1984)
TSG.....TEMPO SIDERAL DE GREENWICH EM
RADIANS
XI.....VETOR POSICAO DO SATELITE NO
SISTEMA INERCIAL EM METROS,DI-
MENSAO 3
IN.....INDICE QUE INDICA O SISTEMA DE
REFERENCIA DO CAMPO MAGNETICO:
0 ... SISTEMA LOCAL (R,TETA,FI)
1 SISTEMA INERCIAL (X,Y,Z)

SAIDAS

***** B.....VETOR DAS COMPONENTES DO CMT,
EM NANO-TESLA.

ROBERTO/HELIO/VALDER/VALDEMIR ** INPE -DMC/DDO 03-83

DIMENSION XI(3),B(3),BZ(3),BT(3)
DATA RT /6371200./
COMMON/CTEG10/SL,CL,SF,CF,RG
COMMON/MAGINI/INI

CT = COS(TSG)
ST = SIN(TSG)
X = XI(1)
Y = XI(2)
Z = XI(3)
XG = CT*X + ST*Y
YG = -ST*X + CT*Y
ZG = Z
XYO = XG*XG + YG*YG
RGO = XYO + 7G*ZG
RG = SQRT(RGO)
SF = ZG/RG
CF = SQRT(XYO/RGO)
XYO = SQRT(XYO)
SL = YG/XYO
CL = XG/XYO
ACD C = -RT*RT/RGO

IF(INI.EQ.0) CALL IGRF80(DJ)


```
C CALL MAGZON(N,BZ)
C CALL MAGTES(N,BT)
C AC1 = ACDC*( BZ(1) + BT(1) )
  AC2 = ACDC*( BZ(2) + BT(2) )
  AC3 = ACDC*( BZ(3) + BT(3) )
C B(1) = AC1
  B(2) = AC3
  B(3) = AC2
  IF(IN.EQ.0) RETURN
C CCSS = CT*CL - ST*SL
  CSS C = CT*SL + ST*CL
C B(1) = CCSS*CF*AC1 - CSSC*AC2 - CCSS*SF*AC3
  B(2) = CSSC*CF*AC1 + CCSS*AC2 - CSSC*SF*AC3
  B(3) = SF * AC1 + CF * AC3
C RETURN
  END
```

SUBROUTINE TERMAG(N,DJ,XI,IN,B)

ESTA ROTINA GERENCIA AS CHAMADAS DAS ROTINAS
"MAGZON" E "MAGTES" E PROVE MUDANCAS DE SIS-
TEMAS DE COORDENADAS TERRESTRE-LOCAL E VICE-
"VERSA.

ENTRADAS

- N.....ORDEM E GRAU DOS COEFICIEN-
TES DOS HARMONICOS ESFERICOS,
NO MAXIMO 10 .
- DJ.....DIA JULIANO ENTRE 2444239.5 E
2446065.5 (1/1/1980 A 31/12/1984)
- XI.....VETOR POSICAO DO SATELITE NO
SISTEMA TERRESTRE EM METROS,DI-
MENSAO 3
- IN.....INDICE QUE INDICA O SISTEMA DE
REFERENCIA DO CAMPO MAGNETICO:
0 ... SISTEMA LOCAL (R,TETA,FI)
1 SISTEMA TERRESTRE (X,Y,Z)

SAYDAS

- B.....VETOR DAS COMPONENTES DO CMT,
EM NANO TESLA.

ROBERTO/HELIO/VALDER/VALDEMIR ** INPE -DMC/DDO 03-83

DIMENSION XI(3),B(3),BZ(3),BT(3)
DATA RT /6371200./
COMMON/CTEG10/SL,CL,SF,CF,RG
COMMON/MAGINI/INI

XG = XI(1)
YG = XI(2)
ZG = XI(3)
XYQ = XG*YG + YG*YG
RGQ = XYQ + ZG*ZG
RG = SQRT(RGQ)
SF = ZG/RG
CF = SQRT(XYQ/RGQ)
XYQ = SQRT(XYQ)
SL = YG/XYQ
CL = XG/XYQ
ACD C = -RT*RT/RGQ

IF(INI.EQ.0) CALL IGRF80(DJ)

CALL MAGZON(N,BZ)

CALL MAGTES(N,BT)

AC1 = ACD C*(BZ(1) + BT(1))
AC2 = ACD C*(BZ(2) + BT(2))
AC3 = ACD C*(BZ(3) + BT(3))

C
B(1) = AC1
B(2) = -AC3
B(3) = AC2
IF(IN.EQ.0) RETURN
C
CCSS = CT*CL - ST*SL
CSS C = CT*SL + ST*CL
C
B(1) = CCSS*CF*AC1 - CSSC*AC2 - CCSS*SF*AC3
B(2) = CSSC*CF*AC1 + CCSS*AC2 - CSSC*SF*AC3
B(3) = SF * AC1 + CF * AC3
C
RETURN
END

SUBROUTINE MAGZON(N1,BZ)

ESTA ROTINA CALCULA AS COMPONENTES ZONAIS
DO CAMPO MAGNETICO TERRESTRE NO SISTEMA
LOCAL EM NANO TESLA.

ENTRADA
***** N1...ORDEM DO COEFICIENTE ZO-
NAL, MAXIMO 10

VIA COMMON :
/GNO/ GO(10) ..COEFICIENTES ZONAIS
EM NANO TESLA

/CTEG10/ SL,CL,SF,CF,RG ...ESPECIFICA-
DOS NO RELATORIO

SAIDA
***** BZ... COMPONENTES DO CAMPO DEVIDO
AOS HARMONICOS ZONAIS.

ROBERTO/HELIO/VALDER/VALDEMIR INPE=DMC/DDO 03-83

DIMENSION BZ(3)
COMMON/GNO/GO(10)
DATA RT /6371200./
COMMON/CTEG10/SL,CL,SF,CF,RG

APSR = RT/RG
SLAT = SF
CLAT = CF

APAC = 1.
PNM2 = 0.
PNM1 = 1.
PLNM1 = 0.

DO 10 I=1,N1
DEN = I
PN = ((2*I-1)*SLAT*PNM1 - (I-1)*PNM2)/DEN
PLN = SLAT*PLNM1 + I*PNM1
DEN = SQRT(2*DEN + 1.)
APAC = APAC * APSR
CJ = -GO(I)*APAC
AX = AX + CJ*(I+1)*PN*DEN
AZ = AZ - CJ*CLAT*PLN*DEN
PNM2 = PNM1
PNM1 = PN
PLNM1 = PLN

10 CONTINUE

BZ(1) = AX
BZ(2) = 0.

- A.7 -

BZ(3) = AZ

C

RETURN
END

SUBROUTINE MAGTES(N2,B)

ESTA ROTINA CALCULA AS COMPONENTES DO CAMPO
MAGNETICO USANDO OS HARMONICOS TESSERAIS

ENTRADA

***** N2...ORDEM E GRAU DOS COEFICIENTES
TESSERAIS,MAXIMO 10

VIA COMMON

/GNM/GCOEFICIENTES G(10,10)

/HNM/HCOEFICIENTES S(10,10)

/CTEG10/ SL,CL,SF,CF,RG ...ESPECIFICADOS NO
RELATORIO

SAIDA

***** B... CAMPO MAGNETICO TESSERAL
EM NANO TESLA

ROBERTO/HELIO/VALDER/VALDEMIR INPE=DMC/DDO 03-83

DIMENSION B(3)
DIMENSION G(10,10),H(10,10)
DATA RT /6371200./
COMMON/GNM/G
COMMON/HNM/H
COMMON/CTEG10/SL,CL,SF,CF,RG

COFI = CF
SIFI = SF
COLA = CL
SILA = SL
APER = RT/RG
COML = 1.
SIML = 0.
SPNN = SQRT(3.)

DO 200 M = 1,N2
APEN = APER**M
COMA = COML
COML = COML*COLA - SIML*SILA
SIML = SIML*COLA + COMA*SILA
PLMN = -M*SIFI*SPNN
CCSS = G(M,M)*COML + H(M,M)*SIML
RLPX = RLPX + (M+1)*SPNN*CCSS*COFI*APEN
RLPY = RLPY + M*SPNN*(-G(M,M)*SIML + H(M,M)*COML)*APEN
RLPZ = RLPZ + PLMN*CCSS*APEN
PMN1 = SPNN
PMN2 = 0.
SPNN = SQRT((2.*M+3.)/(2.*M+2.))*COFI*SPNN

```
      N      = M + 1
C
100 CONTINUE
   IF(N.GT.V2) GOTO 150
   E2      = 2.*N
   E2M1    = E2 + 1
   E2D1    = E2 - 1.
   E2M2    = N*N - M*M
   SQN1    = SQRT(E2M1)
   SQN2    = SQRT(E2D1)
   SQN3    = SQRT(E2M2)
   FAT2    = SQN1/SQN3
   FAT3    = SQRT((E2M2-E2D1)/(E2D1-2.))
   FAT4    = SQN1*SQN3/SQN2
   APEN    = A*ER**N
   SPMN    = FAT2*(SQN2*SIFI*PMN1 - FAT3*PMN2)
   PLMN    = -V*SIFI*SPMN + FAT4*PMN1
   CCSS    = G(N,M)*COML + H(N,M)*SIML
   RLPX    = RLPX - (N+1)*SPMN*COFI*CCSS*APEN
   RLPY    = RLPY + M*SPMN*(-G(N,M)*SIML + H(N,M)*COML)*APEN
   RLPZ    = RLPZ + PLMN*CCSS*APEN
   PMN2    = PMN1
   PMN1    = SPMN
   N      = N + 1
   GOTO 100
C
150 CONTINUE
200 CONTINUE
C
      B(1) = RLPX
      B(2) = RLPY
      B(3) = RLPZ
C
      RETURN
      END
```

```
SUBROUTINE IGRF80(DJ)
COMMON/GN0/GO(10)
COMMON/GNM/G(10,10)
COMMON/HNM/H(10,10)
COMMON/MAGINI/INI
DIMENSION DGO(10),DG(10,10),DH(10,10)
INI = 1
GO(1) = -29988. ; DGO(1) = 22.4
GO(2) = -1997. ; DGO(2) = -18.3
GO(3) = 1279. ; DGO(3) = .0
GO(4) = 938. ; DGO(4) = -1.4
GO(5) = -219. ; DGO(5) = 1.5
GO(6) = 49. ; DGO(6) = 0.4
GO(7) = 70. ; DGO(7) = -1.0
GO(8) = 20. ; DGO(8) = 0.8
GO(9) = 6. ; DGO(9) = .0
GO(10) = -3. ; DGO(10) = .0
G(1,1) = -1957. ; DG(1,1) = 11.3
G(2,1) = 3028. ; DG(2,1) = 3.2
G(2,2) = 1662. ; DG(2,2) = 7.0
G(3,1) = -2181. ; DG(3,1) = -6.5
G(3,2) = 1251. ; DG(3,2) = -0.7
G(3,3) = 833. ; DG(3,3) = 1.0
G(4,1) = 783. ; DG(4,1) = -1.4
G(4,2) = 398. ; DG(4,2) = -8.2
G(4,3) = -419. ; DG(4,3) = -1.8
G(4,4) = 199. ; DG(4,4) = -5.0
G(5,1) = 357. ; DG(5,1) = 0.4
G(5,2) = 261. ; DG(5,2) = -0.8
G(5,3) = -74. ; DG(5,3) = -3.3
G(5,4) = -162. ; DG(5,4) = 0.2
G(5,5) = -48. ; DG(5,5) = 1.4
G(6,1) = 65. ; DG(6,1) = 0.0
G(6,2) = 42. ; DG(6,2) = 3.4
G(6,3) = -192. ; DG(6,3) = 0.8
G(6,4) = 4. ; DG(6,4) = 0.8
G(6,5) = 14. ; DG(6,5) = 0.3
G(6,6) = -108. ; DG(6,6) = -0.1
G(7,1) = -59. ; DG(7,1) = -0.8
G(7,2) = 2. ; DG(7,2) = 0.4
G(7,3) = 20. ; DG(7,3) = 0.5
G(7,4) = -13. ; DG(7,4) = 1.6
G(7,5) = 1. ; DG(7,5) = 0.1
G(7,6) = 11. ; DG(7,6) = 0.1
G(7,7) = -2. ; DG(7,7) = .0
G(8,1) = 7. ; DG(8,1) = -0.2
G(8,2) = 1. ; DG(8,2) = -0.3
G(8,3) = -11. ; DG(8,3) = 0.3
G(8,4) = -7. ; DG(8,4) = -0.8
G(8,5) = 4. ; DG(8,5) = -0.2
G(8,6) = 3. ; DG(8,6) = 0.7
G(8,7) = 7. ; DG(8,7) = -0.3
G(8,8) = -1. ; DG(8,8) = 1.2
```


| | | | | |
|------------|------|---|-------------|----|
| G(9,1) = | 11. | ; | DG(9,1) = | .0 |
| G(9,2) = | 2. | ; | DG(9,2) = | .0 |
| G(9,3) = | -12. | ; | DG(9,3) = | .0 |
| G(9,4) = | 9. | ; | DG(9,4) = | .0 |
| G(9,5) = | -3. | ; | DG(9,5) = | .0 |
| G(9,6) = | -1. | ; | DG(9,6) = | .0 |
| G(9,7) = | 7. | ; | DG(9,7) = | .0 |
| G(9,8) = | 1. | ; | DG(9,8) = | .0 |
| G(9,9) = | -5. | ; | DG(9,9) = | .0 |
| G(10,1) = | -4. | ; | DG(10,1) = | .0 |
| G(10,2) = | 2. | ; | DG(10,2) = | .0 |
| G(10,3) = | -5. | ; | DG(10,3) = | .0 |
| G(10,4) = | -2. | ; | DG(10,4) = | .0 |
| G(10,5) = | 5. | ; | DG(10,5) = | .0 |
| G(10,6) = | 3. | ; | DG(10,6) = | .0 |
| G(10,7) = | 1. | ; | DG(10,7) = | .0 |
| G(10,8) = | 2. | ; | DG(10,8) = | .0 |
| G(10,9) = | 3. | ; | DG(10,9) = | .0 |
| G(10,10) = | 0. | ; | DG(10,10) = | .0 |

C

| | | | | |
|----------|--------|---|-----------|-------|
| H(1,1) = | 5606. | ; | DH(1,1) = | -15.9 |
| H(2,1) = | -2129. | ; | DH(2,1) = | -12.7 |
| H(2,2) = | -199. | ; | DH(2,2) = | -25.2 |
| H(3,1) = | -335. | ; | DH(3,1) = | 0.2 |
| H(3,2) = | 271. | ; | DH(3,2) = | 2.7 |
| H(3,3) = | -252. | ; | DH(3,3) = | -7.9 |
| H(4,1) = | 212. | ; | DH(4,1) = | 4.6 |
| H(4,2) = | -257. | ; | DH(4,2) = | 1.6 |
| H(4,3) = | 53. | ; | DH(4,3) = | 2.9 |
| H(4,4) = | -298. | ; | DH(4,4) = | 0.4 |
| H(5,1) = | 46. | ; | DH(5,1) = | 1.8 |
| H(5,2) = | 149. | ; | DH(5,2) = | -0.4 |
| H(5,3) = | -150. | ; | DH(5,3) = | 0.0 |
| H(5,4) = | -78. | ; | DH(5,4) = | 1.3 |
| H(5,5) = | 92. | ; | DH(5,5) = | 2.1 |
| H(6,1) = | -15. | ; | DH(6,1) = | -0.5 |
| H(6,2) = | 93. | ; | DH(6,2) = | -1.4 |
| H(6,3) = | 71. | ; | DH(6,3) = | 0.0 |
| H(6,4) = | -43. | ; | DH(6,4) = | -1.6 |
| H(6,5) = | -2. | ; | DH(6,5) = | 0.5 |
| H(6,6) = | 17. | ; | DH(6,6) = | 0.0 |
| H(7,1) = | -83. | ; | DH(7,1) = | -0.4 |
| H(7,2) = | -28. | ; | DH(7,2) = | 0.4 |
| H(7,3) = | -5. | ; | DH(7,3) = | 0.2 |
| H(7,4) = | 16. | ; | DH(7,4) = | 1.4 |
| H(7,5) = | 18. | ; | DH(7,5) = | -0.5 |
| H(7,6) = | -23. | ; | DH(7,6) = | -0.1 |
| H(7,7) = | -10. | ; | DH(7,7) = | 1.1 |
| H(8,1) = | 7. | ; | DH(8,1) = | -0.1 |
| H(8,2) = | -18. | ; | DH(8,2) = | -0.7 |
| H(8,3) = | 4. | ; | DH(8,3) = | 0.0 |
| H(8,4) = | -22. | ; | DH(8,4) = | -0.8 |
| H(8,5) = | 9. | ; | DH(8,5) = | 0.2 |