

UMA SUBROTINA PARA CÁLCULO DA RADIAÇÃO SOLAR EXTRA ATMOSFERA

Elza Correia Sucharov

ABSTRACT

A computer program in FORTRAN is presented to calculate the extra terrestrial solar radiation and the theoretical duration of sunshine.

INTRODUÇÃO

A determinação da quantidade de radiação solar existente no limite superior da atmosfera terrestre é sempre o primeiro passo em qualquer estudo em que se pretende estimar a radiação solar disponível na superfície da Terra. O uso de tabelas somente se torna prático quando se utiliza dias isolados e não se necessita de maior precisão.

Quando se necessita estimar a radiação solar para períodos maiores surge a necessidade de uma metodologia mais rápida, eficaz e precisa e esta vem a ser o emprego do computador. Com tal propósito, é apresentado nesse trabalho uma subrotina em linguagem Fortran para o cálculo da radiação solar extra terrestre diária e mensal. Esta subrotina também calcula a duração máxima de horas de brilho solar para cada dia, a qual é comumente empregada nos métodos empíricos que estimam a radiação solar.

MATERIAL E MÉTODOS

A RADIAÇÃO SOLAR NO LIMITE SUPERIOR DA ATMOSFERA

A quantidade de radiação solar que está disponível em um plano horizontal situado no limite superior da atmosfera em um certo dia do ano de um lugar de latitude é dada por:

$$Q = \frac{1440}{\pi} C \left(\frac{\bar{R}}{R}\right)^2 (\sin \phi \sin \delta H + \cos \phi \cos \delta \sin H) \quad (1)$$

onde,

C - constante solar

R - distância entre a Terra e o Sol

\bar{R} - distância média entre a Terra e o Sol

δ - declinação solar no dia considerado

ϕ - latitude do lugar considerado

H - ângulo horário no nascer do Sol

A seguir serão apresentados cada componente da equação (1).

CONSTANTE SOLAR

A constante solar é definida como a quantidade de radiação solar recebida por uma superfície exposta normalmente aos raios solares na distância média Terra-Sol (1.496×10^8 km) e na ausência de atmosfera.

As primeiras tentativas para determinar o valor da constante solar surgiram no século passado, porém de forma bastante simplificada tendo em vista que os extremos do ultravioleta e infravermelho eram desprezados.

No começo desse século, o Instituto Smithsonian apresentou o valor de $1,94 \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{min}$ (média de vários anos) calculado levando em conta os extremos do infravermelho e ultravioleta além dos erros de escala dos pireliômetros.

Johnson (1954), investigando a distribuição espectral da radiação solar no ultravioleta com auxílio de foguetes, encontrou o valor de $2 \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{min}$ que passou a ser o valor adotado universalmente para a constante solar.

Em 1971, Thekaekara e Drumond, baseados na média ponderada de dados coletados em altitude por diferentes aeronaves, propuseram como padrão o valor $135,3 \pm 2,0 \text{ mWcm}^{-2}$. Esse valor está apoiado na Escala Pireliométrica Internacional (1956) e deverá ser aceito até que as dificuldades encontradas com essa escala sejam eliminadas. (Paltridge e Platt, 1976).

No presente trabalho utilizou-se o valor $135,3 \text{ mW.cm}^{-2}$ que corresponde a $1,94 \text{ cal.cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$.

DISTÂNCIA TERRA-SOL

O movimento da Terra em torno do Sol descreve uma elipse com o Sol em um dos seus focos. A excentricidade atual da órbita é pequena, porém significativa resultando em uma variação do quadrado da distância Terra-Sol em cerca de 3,3% da média.

O termo $(\bar{R}/R)^2$ pode ser calculado com uma precisão acima de 10^{-4} , empregando-se a expressão proposta por Paltridge e Platt:

$$(\bar{R}/R)^2 = 1.000110 + 0.034221 \cos \theta_0 + 0.001280 \text{ sen } \theta_0 + \\ + 0.000719 \cos 2\theta_0 + 0.000077 \text{ sen } 2\theta_0 \quad (2)$$

onde θ_0 é definido em função do dia do ano e determinado da seguinte forma:

$$\theta_0 = 2 \pi d_a / 365 \quad (3)$$

sendo

- θ_0 - ângulo expresso em radianos
 d_a - dia do ano, variando de 0 (1º de janeiro) a 364 (31 de dezembro)

DECLINAÇÃO SOLAR

A declinação do Sol é o arco do círculo horário do Sol que vai do equador celeste ao Sol, Vaz (1930).

A variação máxima da declinação em 24 horas (nos equinócios) é menor que $1/2^\circ$. Assim, para fins meteorológicos, pode-se considerar como sendo constante a declinação solar para o período de um dia.

Spencer (1971) apresentou a expressão seguinte que permite calcular a declinação com um erro máximo de 6×10^{-4} radianos.

$$\delta = 0,006913 - 0,399912 \cos \theta_0 + 0,070257 \operatorname{sen} \theta_0 + \\ + 0,006758 \cos 2\theta_0 + 0,000907 \operatorname{sen} 2\theta_0 - 0,002697 \cos 3\theta_0 + \\ + 0,001480 \operatorname{sen} 3\theta_0 \quad (4)$$

ÂNGULO HORÁRIO

O ângulo horário é definido como o ângulo entre o meridiano do observador e o meridiano do Sol, centrado no polo celeste e medido na direção oeste do meridiano do observador.

Usando-se o triângulo fundamental de posição da trigonometria esférica tem-se, pela lei dos cossenos que:

$$\cos Z = \operatorname{sen} \phi \operatorname{sen} \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \tau \quad (5)$$

onde

- Z - ângulo zenital
 δ - declinação solar
 ϕ - latitude do lugar
 τ - ângulo horário

Esta relação nos permite calcular o ângulo horário no nascer do Sol. Quanto este está no horizonte, que corresponde ao nascer do Sol, $Z = 90^\circ$ e a equação (5) torne-se:

$$\cos \tau = \frac{\operatorname{sen} \delta \operatorname{sen} \phi}{\cos \delta \cos \phi} \quad (6)$$

onde,

$$\tau = \cos^{-1} (-\operatorname{tg} \delta \operatorname{tg} \phi) \quad (7)$$

A SUBROTINA RDTOPO

PROPÓSITO

Esta subrotina permite computar a radiação solar diária que alcança uma superfície horizontal no topo da atmosfera para um lugar de latitude ϕ em ambos os hemisférios, de acordo com a equação (1).

CARACTERÍSTICAS

Tempo de processamento	3 segundos
Tempo de entrada e saída	7 segundos
Linhas impressas	275
Número de cartões	123
Integral de memória	334 kwd.seg

DESCRIÇÃO DOS PARÂMETROS DA SUBROTINA

PARÂMETRO DE ENTRADA

O único parâmetro de entrada é XLAT, que corresponde a latitude do lugar para o qual se deseja calcular a radiação. Seu valor deve ser dado em graus e décimos de graus.

Exemplo: Lat.: $23^{\circ} 25'S = 23,15^{\circ}$

PARÂMETROS DEFINIDOS DENTRO DA SUBROTINA

T	Ângulo definido pela equação 3
DELTA	Declinação solar conforme equação 4
RDIST	Termo $(\bar{R}/R)^2$ equação 2
CHOR	Coseno do ângulo horário definido pela equação 6
AHOR	Ângulo horário definido pela equação 7
CTE	Constante solar
AHORG	Ângulo horário, em graus
IDI	Dia do mês
RDT	Vetor que contém os 365 valores da radiação solar
DDIA	Vetor que contém os 365 valores de horas teóricas do brilho solar

PARÂMETROS DE SAÍDA

RDTD	Matriz que contém os valores diários de radiação solar. A linha indica o dia e a coluna o mês.
------	--

- RDTDM Vetor que contém os valores da radiação solar média mensal.
- DDIAM Matriz que contém os totais diários de horas teóricas de brilho solar. A linha indica o dia e a coluna o mês.
- DDM Vetor que contém os totais mensais de horas teóricas de brilho solar

```

C      CALCULO DA RADIACAO SOLAR
C
C      CONSTANTE SOLAR
C      CTE=1.94
C
C       $RD(1)=((1440./3.141592)*RDIST*CTE)*((\sin(\text{DELTA})+2$ 
C      2       $\sin(\text{XLATR})*\text{AHOR})+(\cos(\text{DELTA})*\cos(\text{XLATR})*\sin(\text{AHOR}))$ 
C
C      30 CONTINUE
C
C      POSICIONAMENTO DOS VALORES DIARIOS NOS MESES
C      DO 70 MES=1,12
C      GO TO (65,62,61,63,61,63,61,61,63,61,63,61), MES
C      65 MI(MES)=31
C      ML=MI(MES)
C      GO TO 66
C      61 MI(MES)=31
C      GO TO 64
C      62 MI(MES)=28
C      GO TO 64
C      63 MI(MES)=30
C      64 ML=ML+MI(MES)
C      66 MM=ML-MI(MES)+1
C
C      DO 60 IDIA=MM,ML
C      IDI=IDIA-MM+1
C      PDTD(IDI,MES)=PDT(IDIA)
C      DDIA(IDI,MES)=DDIA(IDIA)
C      SOMA(MES)=SOMA(MES)+PDTD(IDI,MES)
C      SOMAD(MES)=SOMAD(MES)+DDIA(IDI,MES)
C      60 CONTINUE
C      PDTDM(MES)=SOMA(MES)/MI(MES)
C      DDMD(MES)=SOMAD(MES)/MI(MES)
C      70 CONTINUE
C
C      IMPRESSAO DOS RESULTADOS
C
C      WRITE(6,80)
C
C      IG=IFIX(XLAT)
C      R=(XLAT-FLOAT(IG))
C      JM=ABS(R*60)
C      WRITE(6,100) IG,JM
C
C      WRITE(6,110)
C      DO 120 I=1,31
C      WPTTF(6,130) I,(PDTD(I,MES),MES=1,12)
C      120 CONTINUE
C      WPTTF(6,140) (PDTDM(MES),MES=1,12)
C      WPTTF(6,150)
C      WRITE(6,100) IG,JM
C      WRITE(6,110)
C      DO 170 I=1,31
C      WPTTF(6,160) I,(DDIAM(I,MES),MES=1,12)

```

```

170 CONTINUE
    WRITE(6,180)(DOH(MF5),MES=1,12)
    80 FORMAT(//,02X,'RADIACAO NO TOPO DA ATMOSFERA',//)
    100 FORMAT(09X,'LATITUDE',15,2X,'GRAUS',15,2X,'MINUTOS',//)
    110 FORMAT(9X,'JAN',6X,'FEV',5X,'MAR',5X,'ABR',5X,'MAI',5X,
    2   'JUN',5X,'JUL',5X,'AGO',5X,'SET',5X,'OUT',5X,
    3   'NOV',5X,'DEZ',//)
    130 FORMAT(14,2X,12(2X,F6.1),//)
    140 FORMAT(1X,'MEDIA',12(2X,F6.1),//)
    150 FORMAT(11,08X,'DURACAO DO DIA',//)
    160 FORMAT(13,2X,12(2X,F6.1),//)
    180 FORMAT(1X,'MEDIA',F7.1,11(2X,F6.1),//)
    RETURN
    END

```

RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÃO

UTILIZAÇÃO DA SUBROTINA

Para testar a subrotina utilizou-se a latitude de $-22^{\circ}45'$, conforme o programa abaixo:

```

C  PROGRAMA PRINCIPAL
C
C  DIMENSION RDTD (31,12), RDTDM (12), DDIAM (31,12), DDM (12)
C
C  XLAT = -22.75
C
C  CALL RDTOPO (XLAT, RDTD, RDTDM, DDIAM, DDM)
C
C  STOP
C  END

```

A forma de saída dos resultados está apresentada no anexo 1.

AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS

Para avaliação dos resultados da subrotina, foi feita uma comparação com os valores fornecidos pela Smithsonian Meteorological Tables, (1951), conforme Tabela 1.

Observa-se que as diferenças percentuais em relação aos valores da Smithsonian são da ordem de 0,2%.

BIBLIOGRAFIA

- JOHNSON, E.S. - The Solar Constant, J. Meteorology, 11: 431-439, 1954.
- LIST, R.J. - Smithsonian Meteorological Tables. Washington, Smithsonian Institution, 1951.
- PALTRIDGE, G.W. - Radioactive Processes in Meteorology and Climatology. Amsterdam, Elsevier Scientific Publishing Company, 1976.
- SPENCER, J.W. - Fourier Series representation of the position of the sun. Search, 2: 172, 1971.
- THEKAEKARA, M.P. & DRUMOND, A.J. - Standard values for the Solar Constant and its spectral components. London, Physics Science, 229: 6-9, 1971.
- VAZ, S. - Noções de sistemas de coordenadas. Rio de Janeiro, Departamento de Astronomia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1980.

2.2.4 - Listaem da Subrotina

```

SUBROUTINE RDTOPN(XLAT, RDTD, RDTDM, DDTAM, DDH)
C
  DIMENSION PDT(365), SOMA(12), RDTD(31,12), RDTDM(12), MI(12),
  2AHORG(365), UDIA(365), DDIAM(31,12), SOMAD(12), DDH(12)
C
C  INICIALIZACAO DAS VARIAVEIS
C
  DO 10 I=1,365
    DDIA(I)=0.
    AHORG(I)=0.
    RDT(I)=0.
10  CONTINUE
  DO 20 I=1,31
    DO 20 J=1,12
      PDT(I,J)=0.
      DDIAM(I,J)=0.
      RDTDM(J)=0.
      MI(J)=0.
      SOMA(J)=0.
      SOMAD(J)=0.
      DDH(J)=0.
20  CONTINUE
C
C  TRANSFORMACAO DA LATITUDE EM GRAUS PARA RADIANO
  XLATR=(XLAT*3.141592)/180.
C
C  INICIO DO CALCULO DA RADIAAO
C
C  CALCULO DA RADIAAO SOLAR
C
  DO 30 I=1,365
    T=(2.*3.141592*(I-1))/365.
    DELTA=0.006918-0.399912*COS(T)+0.070257*SIN(T)-
2     0.006756*COS(2*T)+0.000907*SIN(2*T)-
3     0.002697*COS(3*T)+0.001460*SIN(3*T)
C
C  DISTANCIA TERRA-SOL
C
  RDIST=1.000011+0.034221*COS(T)+0.001298*SIN(T)+
2     0.000719*COS(2*T)+0.000077*SIN(2*T)
C
C  ANGULO HORARIO
C
  CHOR=-((SIN(DELTA)/COS(DELTA))*((SIN(XLATR)/COS(XLATR))))
  AHOR=ARCCOS(CHOR)
C
C  ANGULO HORARIO EM GRAUS
C
  AHORG(I)=(AHOR*180.)/3.141592
C
C  DURACAO DO DIA
C
  DDTA(I)=(AHORG(I)/15.)*2.
C

```

TABELA I

RADIACÃO SOLAR NO TOPO DA ATMOSFERA
CAL/CM².DIA

	13/1	04/2	26/2	21/3	13/4	06/5	29/5	22/6	15/7	08/8	31/8	23/9	16/10	8/11	30/11	29/12	
0°	855	878	896	895	873	837	804	790	800	830	863	885	886	870	851	843	SM
	855	878	896	896	874	838	805	789	799	829	862	883	885	870	851	845	RD
-10°	936	936	921	882	824	760	707	687	704	753	814	871	910	927	931	933	SM
	937	937	922	883	824	759	708	686	702	751	812	868	908	927	932	934	RD
-20°	993	968	918	841	750	660	593	567	590	654	741	831	907	959	988	999	SM
	994	969	920	843	750	660	594	567	588	653	738	828	905	959	988	999	RD
-30°	1025	973	888	775	654	543	465	436	463	538	646	765	877	964	1020	1041	SM
	1026	975	891	777	654	544	466	436	461	537	643	762	874	964	1020	1040	RD

OBS.: SM - Smithsonian Meteorological Tables

FD - Subrotina RDTOPQ

ANEXO 1

RADIACAO NO TOPO DA ATMOSFERA

LATITUDE -22 GRAUS 45 MINUTOS

	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
1	1012.3	979.5	934.5	779.3	649.1	553.4	534.9	596.9	710.3	844.2	946.4	1000.9
2	1012.0	977.6	931.0	774.8	645.1	551.5	533.8	602.1	722.6	848.1	948.9	1001.6
3	1011.6	975.6	897.5	770.4	641.2	549.7	536.7	605.4	726.9	851.9	951.4	1002.6
4	1011.2	973.6	894.0	765.9	637.4	547.9	537.7	606.7	731.2	855.8	953.8	1003.9
5	1010.8	971.5	890.3	761.5	633.5	546.2	538.7	612.1	735.5	859.6	956.2	1004.3
6	1010.3	969.4	886.7	757.0	629.8	544.7	539.9	615.5	739.0	863.3	958.6	1005.3
7	1009.7	967.2	883.0	752.5	626.0	543.2	541.2	619.0	744.1	867.1	960.8	1006.1
8	1009.1	966.9	879.2	748.0	622.4	541.8	542.5	622.5	748.4	870.8	963.1	1006.9
9	1008.5	962.6	875.5	743.6	618.7	540.5	544.0	626.1	752.7	874.4	965.3	1007.6
10	1007.8	960.2	871.6	739.1	615.2	539.2	545.5	629.8	757.0	878.0	967.6	1008.3
11	1007.0	957.8	867.8	734.7	611.6	538.1	547.1	633.4	761.2	881.6	969.9	1009.0
12	1006.2	955.3	863.9	730.2	608.2	537.1	548.8	637.2	765.5	885.1	971.5	1009.6
13	1005.4	952.8	859.9	725.8	604.8	536.1	550.6	640.9	769.8	888.6	973.5	1010.1
14	1004.5	950.2	855.9	721.3	601.5	535.3	552.4	644.7	774.1	892.1	975.4	1010.8
15	1003.6	947.5	851.9	716.9	598.2	534.5	554.4	648.6	778.5	895.5	977.3	1011.1
16	1002.6	944.8	847.8	712.5	595.0	533.8	556.4	652.5	782.6	898.9	979.1	1011.9
17	1001.5	942.0	843.7	708.1	591.8	533.2	558.5	656.6	786.8	902.2	980.9	1011.9
18	1000.4	939.2	839.6	703.7	588.0	532.8	560.7	660.5	791.1	905.9	982.6	1012.2
19	999.3	936.3	835.5	699.3	585.8	532.4	563.0	664.3	795.3	908.7	984.3	1012.5
20	998.1	933.4	831.3	695.0	582.8	532.1	565.3	668.3	799.5	911.9	985.9	1012.8
21	996.8	930.4	827.1	690.7	580.0	531.9	567.7	672.4	803.6	915.0	987.5	1013.0
22	995.5	927.3	822.8	686.4	577.2	531.8	570.2	676.5	807.8	918.1	989.0	1013.1
23	994.2	924.2	818.6	682.1	574.4	531.7	572.8	680.6	811.9	921.2	990.5	1013.2
24	992.8	921.1	814.3	677.9	571.8	531.8	575.4	684.7	816.0	924.2	991.9	1013.3
25	991.3	917.8	810.0	673.7	569.2	532.0	579.1	688.8	820.1	927.1	993.3	1013.3
26	989.8	914.6	805.6	669.5	566.7	532.2	580.9	693.0	824.2	930.0	994.6	1013.1
27	988.2	911.5	801.3	665.3	564.3	532.6	583.7	697.2	828.3	932.9	995.9	1013.3
28	986.6	907.9	796.9	661.2	562.0	533.0	586.6	701.4	832.3	935.7	997.1	1013.2
29	984.9	0.0	792.5	657.1	559.7	533.6	589.6	705.6	836.3	938.6	998.3	1013.0
30	983.1	0.0	788.1	653.1	557.5	534.2	592.6	709.8	840.2	941.1	999.5	1012.8
31	981.3	0.0	783.7	0.0	555.4	0.0	595.7	714.1	0.0	943.8	0.0	1012.6
MEDIA	1000.5	947.0	846.5	715.2	597.6	537.6	559.6	653.9	783.8	897.1	976.1	1009.8

DURACAO DO DIA

LATITUDE -22 GRAUS 45 MINUTOS

	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
1	13.4	13.0	12.4	11.8	11.2	10.7	10.6	10.9	11.5	12.2	12.8	13.3
2	13.4	13.0	12.4	11.7	11.1	10.7	10.6	11.0	11.5	12.2	12.8	13.3
3	13.4	13.0	12.4	11.7	11.1	10.7	10.6	11.0	11.6	12.2	12.8	13.3
4	13.4	12.9	12.4	11.7	11.1	10.7	10.6	11.0	11.6	12.2	12.9	13.3
5	13.3	12.9	12.4	11.7	11.1	10.7	10.6	11.0	11.6	12.2	12.9	13.3
6	13.3	12.9	12.3	11.7	11.1	10.7	10.6	11.0	11.6	12.3	12.9	13.3
7	13.3	12.9	12.3	11.6	11.0	10.7	10.7	11.0	11.6	12.3	12.9	13.3
8	13.3	12.9	12.3	11.6	11.0	10.6	10.7	11.1	11.7	12.3	12.9	13.3
9	13.3	12.9	12.3	11.6	11.0	10.6	10.7	11.1	11.7	12.3	13.0	13.3
10	13.3	12.8	12.2	11.6	11.0	10.6	10.7	11.1	11.7	12.4	13.0	13.4
11	13.3	12.8	12.2	11.5	11.0	10.6	10.7	11.1	11.7	12.4	13.0	13.4
12	13.3	12.8	12.2	11.5	11.0	10.6	10.7	11.1	11.7	12.4	13.0	13.4
13	13.3	12.8	12.2	11.5	10.9	10.6	10.7	11.1	11.8	12.4	13.0	13.4
14	13.3	12.8	12.2	11.5	10.9	10.6	10.7	11.2	11.8	12.4	13.0	13.4
15	13.3	12.7	12.1	11.5	10.9	10.6	10.7	11.2	11.8	12.5	13.1	13.4
16	13.2	12.7	12.1	11.6	10.9	10.6	10.7	11.2	11.8	12.5	13.1	13.4
17	13.2	12.7	12.1	11.6	10.9	10.6	10.7	11.2	11.9	12.5	13.1	13.4
18	13.2	12.7	12.1	11.4	10.9	10.6	10.8	11.2	11.9	12.5	13.1	13.4
19	13.2	12.7	12.0	11.4	10.9	10.6	10.8	11.3	11.9	12.5	13.1	13.4
20	13.2	12.6	12.0	11.4	10.8	10.6	10.8	11.3	11.9	12.6	13.1	13.4
21	13.2	12.6	12.0	11.3	10.9	10.6	10.8	11.3	11.9	12.6	13.2	13.4
22	13.2	12.6	12.0	11.3	10.8	10.6	10.8	11.3	12.0	12.6	13.2	13.4
23	13.1	12.6	12.0	11.3	10.8	10.6	10.8	11.3	12.0	12.6	13.2	13.4
24	13.1	12.6	11.9	11.3	10.8	10.6	10.8	11.4	12.0	12.7	13.2	13.4
25	13.1	12.5	11.9	11.3	10.8	10.6	10.8	11.4	12.0	12.7	13.2	13.4
26	13.1	12.5	11.9	11.2	10.8	10.6	10.9	11.4	12.1	12.7	13.2	13.4
27	13.1	12.5	11.9	11.2	10.8	10.6	10.9	11.4	12.1	12.7	13.2	13.4
28	13.1	12.5	11.8	11.2	10.7	10.6	10.9	11.4	12.1	12.7	13.2	13.4
29	13.1	0.0	11.8	11.2	10.7	10.6	10.9	11.5	12.1	12.8	13.3	13.6
30	13.0	0.0	11.8	11.2	10.7	10.6	10.9	11.5	12.1	12.8	13.3	13.6
31	13.0	0.0	11.8	0.0	10.7	0.0	10.9	11.5	0.0	12.5	0.0	13.4
MEDIA	13.2	12.7	12.1	11.5	10.9	10.6	10.7	11.2	11.8	12.5	13.1	13.4

