



Características térmicas do solo em Salvador, BA



Tantravahi V. Ramana Rao¹, Bernardo B. da Silva¹ & Atílio A. Moreira²

¹ UACA/UFCG. Av. Aprígio Veloso 882, Bodocongó. 58.109-970, Campina Grande, PB Fone/Fax: (83) 3310-1202.
E-mail: ramana@dca.ufcg.edu.br; bernardo@dca.ufcg.edu.br

² INMET - IV Distrito. Rua Tenente Pires Ferreira, 183. Barra, 40.130-160, Salvador, BA

Protocolo 159 - 15/10/2003 - Aprovado em 15/10/2005

Resumo: O comportamento térmico do solo (ciclo anual) de Salvador (13° 01' S; 38° 31' O; 51,4 m), foi estudado através dos dados de temperatura obtidos com geotermômetros instalados nas profundidades de 0,02, 0,05, 0,10, 0,20, 0,30, 0,50 e 1,00 m, e o ciclo diário o foi com base em dados de temperatura nas profundidades de 0,05, 0,20 e 0,50 m, a intervalos de 20 min, usando-se de uma estação automática da empresa alemã Lambrecht Klimatologische Messtechnik. Nesta estação experimental, o solo foi classificado como Latossolo Amarelo distrófico. A difusividade térmica para o ciclo anual foi determinada através do método da amplitude. Para o ciclo diário usaram-se os métodos da Amplitude, da Fase, do Arco tangente, Logarítmico e o Numérico, calculando-se, também, a profundidade de amortecimento e a velocidade da propagação para os ciclos diário e anual. Os resultados da difusividade térmica obtida pelos métodos da Amplitude e o Logarítmico, mostraram boa consistência. No caso do ciclo diário a velocidade de propagação da onda de calor foi de $0,89 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$ e a profundidade de amortecimento igual a 0,12 m.

Palavras-chave: difusividade térmica, temperatura do solo, profundidade de amortecimento

Soil thermal characteristics at Salvador, BA

Abstract: The thermal behavior of the soil (annual cycle) at Salvador (13° 01' S; 38° 31' W; 51,4 m), a tropical station in Northeast Brazil, was studied using the soil temperature data collected at the depths of 0.02, 0.05, 0.10, 0.20, 0.30, 0.50 and 1.00 m. The daily cycle was studied using the soil temperature data collected at the depths of 0.05, 0.20 and 0.50 m at 20 min intervals with the help of an automatic meteorological station developed by a German firm Lambrecht Klimatologische Messtechnik. The soil at the experimental station is classified as dystrophic Yellow Latosol. The thermal diffusivity for the annual cycle was determined using the amplitude method. For the daily cycle the thermal diffusivity was determined by employing different methods: Amplitude Method, Phase Method, Arctangent Method, Logarithmic Method and Numerical Method. The values of thermal diffusivity obtained through the Amplitude and Logarithmic methods show more consistency. The velocity of propagation of the heat wave is of $0.89 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$ and the damping depth is 0.12 m for the daily cycle.

Key words: thermal diffusivity, soil temperature, damping depth

INTRODUÇÃO

As propriedades térmicas do solo são resultantes de um conjunto de fatores nos quais se incluem a sua textura e composição química; no entanto, as observações regulares de sua temperatura em diferentes profundidades possibilitam identificar-se o seu comportamento térmico e o conhecimento de importantes propriedades, tais como difusividade e a condutividade térmica.

A energia solar que chega à superfície exerce grande influência no processo de formação do solo e interfere na

composição de suas propriedades físicas, além de ser responsável pela translocação de fluidos no solo, governa reações físicas, químicas e biológicas que ocorrem no seu perfil e também influencia as suas variações de temperatura (Decico & Reichardt, 1976).

A temperatura do solo é um dos parâmetros que controlam a germinação de sementes, a taxa e a duração do crescimento e desenvolvimento das plantas, a absorção de nutrientes e a difusão de água e de gases (van Wijk, 1963).

Considerando-se que cada tipo de solo apresenta características peculiares, faz-se necessário que sejam

identificadas, para cada situação particular, as suas propriedades térmicas, as quais são resultantes de um conjunto de fatores, incluindo-se sua textura e composição química; no entanto, as observações regulares de sua temperatura em diferentes profundidades possibilitam o conhecimento do seu comportamento térmico e a extração de importantes propriedades, tais como a difusividade e a condutividade térmica.

As trocas energéticas que se processam entre a camada limite planetária e a superfície do solo, são de fundamental importância em diferentes estudos agrometeorológicos e de modelagem atmosférica. O estudo de tais processos contribui para um entendimento melhor dos processos de ocorrência da geada, orvalho e previsão de temperaturas extremas, dentre outros (Ramana Rao & Vianello, 1977).

A partir das medições da temperatura do solo, Carson (1963) empreendeu uma análise de Fourier de tais medidas e pode determinar as amplitudes e fases da onda de temperatura do solo, em diferentes profundidades. Já Ramana Rao (1966) estudou o comportamento térmico de um solo arenoso vermelho com base em medições horárias obtidas em diferentes profundidades e obteve, com a pesquisa, uma difusividade térmica média de $0,58 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ e calor específico igual a $752,48 \text{ J kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$.

Ramana Rao & Vianello (1977) estudaram, ainda, o ciclo diário das temperaturas do solo de Cachoeira Paulista, SP, quando obtiveram uma condutividade térmica média de $0,779 \text{ J }^\circ\text{C}^{-1} \text{ m}^{-1} \text{ s}^{-1}$. Por sua vez, Horton et al. (1983) e Passerat de Silans et al. (1999) analisaram as limitações associadas a diferentes métodos de determinação da difusividade térmica do solo e, com os resultados, identificaram a quantidade e o tipo de medição necessária à determinação da difusividade térmica, associados a cada um dos métodos estudados. Já Abu-Hamdeh (2000) analisou o efeito da cobertura vegetal sobre a condutividade térmica de dois tipos de solo, usando a metodologia da sonda singular e o modelo proposto por de Vries (1963) e Campbell (1985). Mais recentemente, Verhoef (2004) propôs um método remoto de cômputo da inércia térmica (produto da capacidade calorífica pela raiz quadrada da difusividade térmica do solo), baseado em medições de temperatura da superfície e do saldo de radiação.

Com o estudo, objetivou-se a determinação da difusividade térmica do solo da estação climatológica de Salvador, BA, com base em medições dos ciclos diário e anual da temperatura do solo, segundo diferentes metodologias.

MATERIAL E MÉTODOS

Os dados de temperatura do solo para as profundidades de 0,02, 0,05, 0,10, 0,20, 0,30, 0,50 e 1,00 m da estação climatológica de Salvador, BA ($13^\circ 01' \text{ S}$; $38^\circ 31' 0''$; 51,4 m), obtidos para o período de 1976-1985, foram utilizados para determinar o ciclo anual. Para estudo do ciclo diário empregaram-se os dados coletados nas profundidades de 0,05, 0,20 e 0,50 m e a temperatura do ar a nível de 0,05 m em intervalos de 20 em 20 min, no dia 6 de fevereiro de 1993. Esses dados do ciclo diário foram coletados em uma estação meteorológica automática da fábrica alemã Lambrecht Klimatologische Messtechnik.

A difusividade térmica (α) para o ciclo anual foi calculada usando-se o método da Amplitude, qual seja:

$$\alpha = (\omega / 2) [(z_2 - z_1) / \ln(A_1 / A_2)]^2 \quad (1)$$

donde A_1 e A_2 são as amplitudes nas profundidades z_1 e z_2 , respectivamente, e são obtidas a partir das temperaturas de cada uma das profundidades z_1 e z_2 .

A difusividade térmica para o ciclo diário foi também calculada através do método da Amplitude e os seguintes métodos: da Fase, Arco tangente, Logarítmico e Numérico.

Método da Fase: Se o intervalo do tempo entre as ocorrências da temperatura máxima do solo nas profundidades z_1 e z_2 é $\delta t = t_2 - t_1$, a difusividade térmica (α) é obtida pela equação da fase, dada por:

$$\alpha = (1 / 2 \omega) [(z_2 - z_1) / \delta t]^2 \quad (2)$$

Observações freqüentes da temperatura do solo são necessárias para assegurar estimativas corretas de t_1 e t_2 . Nos dias nublados pode ocorrer mais de um máximo relativo de temperatura do solo (T), o que dificulta o cálculo de δt .

Método do Arco tangente: A temperatura do solo a nível da superfície pode ser descrita por uma série de senos. Os valores da temperatura medida a uma profundidade específica podem ser ajustados à série de Fourier (Drapper & Smith, 1966), dada por:

$$T(t) = \bar{T} + \sum_{n=1}^M [A_n \cos(n\omega t) + B_n \sin(n\omega t)] \quad (3)$$

sendo \bar{T} o valor médio da temperatura no intervalo de tempo considerado, M o número de harmônicos, A_n e B_n as suas amplitudes, n o número de observações, ω a freqüência angular e t o tempo. Se os dois primeiros harmônicos são suficientes para descrever uma condição de contorno superior a nível de $z = z_1$ ($z_1 = 0$, a nível da superfície), α poderá ser calculado usando-se a equação do arco tangente:

$$\alpha = \frac{\omega(z_2 - z_1)^2}{2 \arctan \frac{(T_1 - T_3)(T_2' - T_4') - (T_2 - T_4)(T_1' - T_3')^3}{(T_1 - T_3)(T_1' - T_3') + (T_2 - T_4)(T_2' - T_4')}} \quad (4)$$

donde T_1 , T_2 , T_3 e T_4 são as temperaturas registradas na profundidade z_1 e T_1' , T_2' , T_3' e T_4' são as temperaturas registradas na profundidade z_2 , em intervalos de 6 em 6 h (Nerpin & Chudnovskii, 1967).

Método Logarítmico: Usando a mesma metodologia do método anterior, Seemann (1979) mostrou que α pode ser calculado por:

$$\alpha = \left[\frac{0,121(z_3 - z_1)}{\ln \left\{ \frac{(T_1 - T_3)^2 + (T_2 - T_4)^2}{(T_1' - T_3')^2 + (T_2' - T_4')^2} \right\}} \right]^2 \quad (5)$$

Os métodos Arco tangente e Logarítmico são análogos aos métodos da Amplitude e da Fase, mas precisam de um número maior de observações para aproximar o comportamento essencialmente não-senoidal.

Método Numérico: Para solos homogêneos com α constante, a equação explícita de diferenças finitas (Richtmeyer & Morton, 1967) pode ser usada para se obter a difusividade térmica:

$$\frac{T_j^{n+1} - T_j^n}{\alpha \Delta t} = \frac{T_{j+1}^n - 2T_j^n + T_{j-1}^n}{(\Delta z)^2} \quad (6)$$

onde j é o intervalo de profundidade e n é o intervalo de tempo. Esta equação pode ser usada para se estimar α usando-se valores de temperatura observados a diferentes profundidades. A estabilidade na solução numérica será garantida se:

$$\frac{\alpha \Delta t}{(\Delta z)^2} < 0,5 \quad (7)$$

A profundidade de amortecimento (D), que corresponde à profundidade na qual a amplitude da onda da temperatura é reduzida a $1/e$ de seu valor à superfície, sendo $e = 2,7183$, é dada pela expressão:

$$D = \sqrt{2\alpha/\omega} \quad (8)$$

A velocidade da propagação da onda da temperatura (V) é obtida pela expressão:

$$V = \sqrt{2\omega\alpha} \quad (9)$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Ciclo anual

Médias mensais de dados de temperatura do solo foram obtidas a partir de dados diários coletados para o período de 10 anos (1976-1985) para diferentes profundidades (0,02, 0,05, 0,10, 0,20, 0,30, 0,50 e 1,00 m) e horários (12, 18 e 24 UTC). A Figura 1 (A – C) mostra a variação mensal (de janeiro a dezembro) da temperatura do solo, respectivamente, para os horários de 12, 18, 24 UTC para as profundidades de 0,02, 0,05, 0,10, 0,20, 0,30, 0,50 e 1,00 m. A Figura 2 mostra a variação intra-anual média dos horários de 12, 18, 24 UTC. No horário de 12 UTC (Figura 1A), a profundidade de 0,10 m foi a mais fria o ano inteiro; a temperatura mínima de 23,3 °C foi atingida na

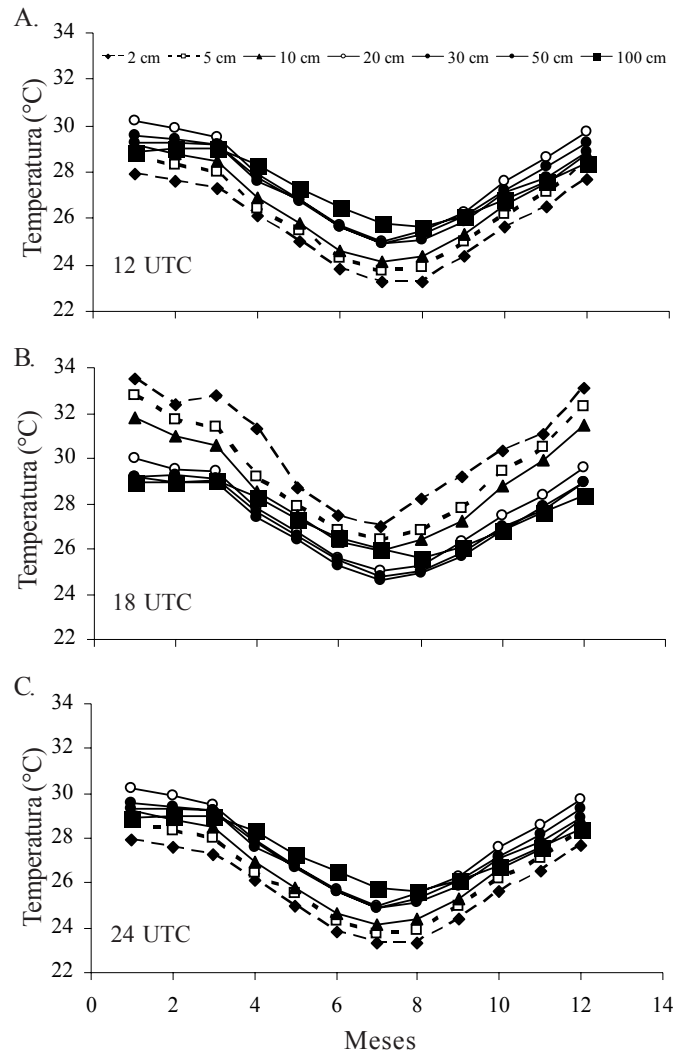


Figura 1. Temperatura do solo, média mensal observada nos horários de 12 (A), 18 (B) e 24 (C) UTC para a localidade de Salvador, BA, em diferentes profundidades

profundidade de 0,10 m no mês de julho, enquanto para os meses de janeiro, fevereiro, outubro, novembro e dezembro, a temperatura da profundidade de 0,02 m foi maior que a de outras profundidades. Nesses cinco meses que representam o verão, as camadas superficiais aquecem mais rápido; já no horário de 12 UTC (09 h local) e para os meses de inverno (abril a setembro) a profundidade de 1,00 m foi mais quente que as camadas superficiais. A variação da temperatura na camada entre 0,02 e 1,00 m foi máxima no mês de julho, atingindo 2,7 °C.

A Figura 1B mostra a variação mensal da temperatura para o horário de 18 UTC. A temperatura da profundidade de 0,02 m foi sempre maior que qualquer outra profundidade estudada. No mês de dezembro a temperatura da profundidade de 0,02 m atingiu o valor máximo de 33 °C. A temperatura da profundidade de 0,30 m atingiu o valor mínimo de 24,7 °C no mês de julho e a camada de 0,02 a 1,00 m mostrou variação máxima da temperatura nos meses de janeiro e dezembro (5 °C).

A variação mensal da temperatura do solo para o horário de 24 UTC está representada na Figura 1C. Nos períodos de janeiro a março e de setembro a dezembro, a temperatura da profundidade de 0,20 m foi maior que aquela de outras

profundidades. A temperatura da profundidade de 1,00 m foi maior nos meses de inverno (abril a agosto). A variação da temperatura da camada de 0,02 a 1,00 m foi maior no mês de julho que a dos outros meses do ano. As camadas superficiais são mais frias o ano inteiro nesse horário de 24 UTC.

A Figura 2 apresenta a variação mensal da temperatura média dos horários de 12, 18 e 24 UTC, para diferentes profundidades. A temperatura da profundidade de 0,02 m atingiu o valor máximo de 30,4 °C nos meses de janeiro e dezembro. A temperatura da profundidade de 0,10 m foi mínima no mês de julho, atingindo o valor de 24,4 °C. Nos meses de inverno (abril a agosto) a temperatura da profundidade de 1,00 m foi mais alta que as das demais profundidades. A temperatura da profundidade de 0,02 m foi maior nos períodos de janeiro a março e de setembro a dezembro.

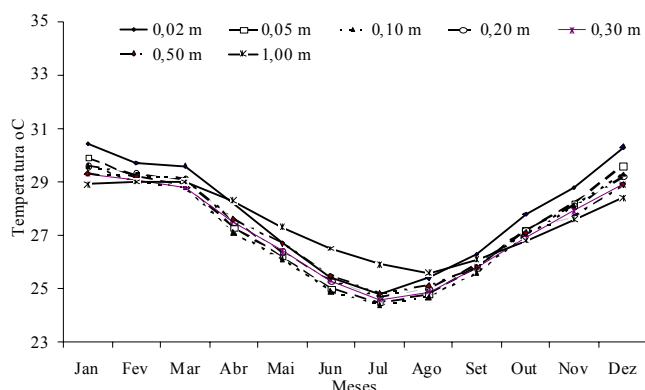


Figura 2. Temperatura do solo média mensal observada nos horários de 12, 18 e 24 UTC para a localidade de Salvador, BA, em diferentes profundidades

Na Tabela 1 encontram-se os valores da difusividade térmica α ($m^2 s^{-1}$) calculados a partir do método da Amplitude usando-se o primeiro harmônico do ciclo anual. O valor médio da difusividade térmica encontrada para Salvador, BA, se situa dentro da faixa de valores obtidos por Geiger (1973), Ramana Rao (1966) e outros pesquisadores.

Tabela 1. Valores de difusividade térmica α ($m^2 s^{-1}$) x 10^6 , para diferentes camadas de solo em Salvador, BA para o ciclo anual

Camada (m)	0,02 - 1,00	0,05 - 1,00	0,10 - 1,00	0,20 - 1,00	0,30 - 1,00	0,50 - 1,00
α ($m^2 s^{-1}$)	0,431	0,447	0,467	0,469	0,552	0,371

Santos (1987) obteve, para Cachoeira Paulista, SP, para a camada de 0,05 e 0,15 m, difusividade térmica média igual a $0,3 \times 10^{-6} m^2 s^{-1}$; já Williams & Gold (1976) obtiveram, para solos argilosos e arenosos seco e úmido, α variando de $0,1 \times 10^{-6}$ e $1,5 \times 10^{-6} m^2 s^{-1}$ para Ottawa, Canadá. Esses pesquisadores também obtiveram, para a mesma localidade, a profundidade de amortecimento para o ciclo anual, que variou de 4,5 a 18,0 m e, para o ciclo diário, que variou de 0,30 a 0,95 m. Para a camada de 0,01 a 0,10 m, Horton et al. (1983) conseguiram para o ciclo diário, difusividade térmica variando de $0,37 \times 10^{-6}$ a $0,92 \times 10^{-6} m^2 s^{-1}$, em Lás Cruces, Novo México, EUA.

A Tabela 2 mostra os valores da profundidade de amortecimento (D) e da velocidade de propagação (V) em Salvador, BA, para o ciclo anual. Para esses cálculos, o nível de referência foi a profundidade de 0,02 m, valores esses situados na mesma faixa de valores obtidos por Fideles (1988) para os solos da Paraíba.

Tabela 2. Valores da profundidade de amortecimento D (m) e velocidade de propagação V ($m s^{-1}$) x 10^{-6} em Salvador, BA, para o ciclo anual

Camada (m)	0,02 - 0,05	0,02 - 0,10	0,02 - 0,20	0,02 - 0,30	0,02 - 0,50	0,02 - 1,00
D (m)	1,34	1,42	1,61	1,61	2,26	2,08
V ($cm h^{-1}$)	0,10	0,10	0,12	0,12	0,16	0,15

Ciclo diário

Tem-se, na Figura 3, a variação da temperatura do ar para o ciclo diário, a nível de 0,05 m acima do solo e nas profundidades de 0,05, 0,20 e 0,50 m, em Salvador, BA, para o dia 6 de fevereiro de 1993 (um dia de pleno verão com céu claro e há dez dias sem precipitação). A temperatura do ar atingiu valor máximo de 44,4 °C, em torno de 12 h 40 min, e mínimo de 24,0 °C, no horário das 4 h 20 min. O solo atingiu a temperatura máxima de 39,8 °C às 15 h 20 min, na profundidade de 0,05 m; 35,1 °C às 19 h 20 min, na profundidade de 0,20 m e 31,8 °C às 23 h 40 min, na profundidade de 0,50 m. Como observado, há um atraso na ocorrência da temperatura máxima com a profundidade; neste dia, a temperatura variou de 30,3 °C a 39,8 °C para a profundidade de 0,05 m e de 31,8 °C a 35,1 °C em caso da profundidade de 0,20 m, mas na profundidade de 0,50 m, a variação diurna da temperatura é praticamente nula.

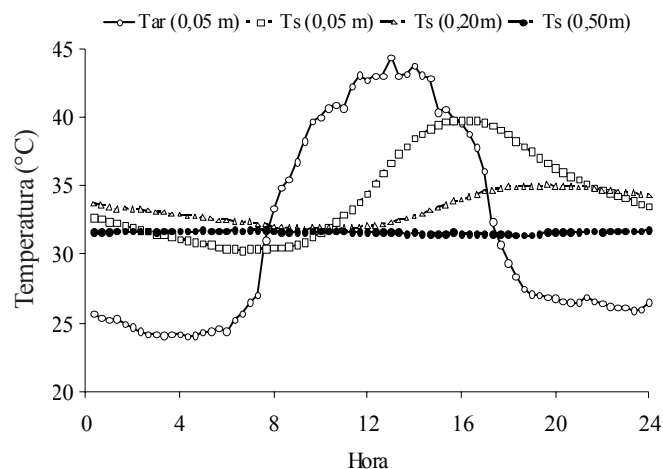


Figura 3. Temperatura do ar a 0,05 m do solo e temperatura do solo nas profundidades de 0,05, 0,20 e 0,50 m, para o dia 6 de fevereiro de 1993, em Salvador, BA

Na Tabela 3 estão representados os valores de amplitude e fase para diferentes harmônicos e para três profundidades do solo (0,05, 0,20 e 0,50 m) em Salvador, BA, para o dia 6 de fevereiro de 1993. A magnitude da amplitude diminui com o aumento da profundidade. A amplitude do 1º harmônico é muito maior que a soma das amplitudes dos demais harmônicos.

Tabela 3. Amplitudes (°C) e fases (°) para diferentes profundidades e harmônicos correspondentes, em Salvador, BA, para o dia 6 de fevereiro de 1993

Profund. (m)	Variáveis	Harmônicos					
		1°	2°	3°	4°	5°	6°
0,05	Amplitude	4,38	1,22	0,35	0,05	0,09	0,03
	Fase	187	25	241	193	216	204
0,20	Amplitude	1,55	0,33	0,04	0,07	0,03	0,04
	Fase	224	242	86	219	190	228
0,50	Amplitude	0,11	0,03	0,03	0,02	0,02	0,01
	Fase	14	233	201	202	267	225

A Tabela 4 mostra a porcentagem da variância (Var) e a porcentagem da variância acumulada (VarAc) para diferentes harmônicos e profundidades em Salvador, BA, para o dia 6 de fevereiro de 1993. Para as camadas superficiais do solo (0,05 a 0,20 m) a amplitude do primeiro harmônico é significativamente alta e sua contribuição para a variância ultrapassa 90%, enquanto a variância acumulada dos primeiros dois harmônicos atinge 99% ou um pouco mais.

Tabela 4. Contribuição à variância (Var) e contribuição à variância acumulada (VarAc) para diferentes harmônicos e profundidades

Profund. (m)	Contribuição à variância %	Harmônicos					
		1°	2°	3°	4°	5°	6°
0,05	Var	92,2	7,2	0,6	0,0	0,0	0,0
	VarAC	99,4	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
0,20	Var	95,2	4,4	0,1	0,2	0,0	0,1
	VarC	99,6	99,7	99,9	99,9	100,0	100,0
0,50	Var	79,4	7,5	7,3	2,2	2,8	0,8
	VarAC	86,9	94,2	96,4	99,2	100,0	100,0

A difusividade térmica foi calculada através de cinco diferentes métodos, cujos valores são apresentados na Tabela 5. Os valores da temperatura do solo, obtidos em intervalos de 20 em 20 min, foram convertidos em médias horárias e, posteriormente, usados nos cálculos da difusividade térmica.

Os resultados da difusividade térmica obtidos através da utilização de diferentes métodos, indicam boa concordância para os diferentes métodos e camadas, exceto para um único

Tabela 5. Difusividade térmica ($m^2 s^{-1}$) x 10^6 obtida através de diferentes métodos, para o dia 06 de fevereiro de 1993 em Salvador, BA

Método	Camadas (m)		
	0,05-0,20	0,20-0,50	0,05-0,50
Amplitude	0,75	0,47	0,54
Fase	0,89	2,54	1,68
Arco tangente	1,03	2,37	2,68
Logarítmico	0,39	0,48	0,55
Numérico	-	-	0,0144

valor da difusividade térmica da camada entre 0,05 a 0,50 m de profundidade, obtida pelo método Arco tangente. Os valores da difusividade térmica segundo os métodos da Amplitude e Logarítmico, são bastante semelhantes. Hinkel (1997) obteve difusividade térmica igual a $1,5 \times 10^{-6}$ e $2,0 \times 10^{-6} m^2 s^{-1}$, em duas localidades do Alaska, segundo o método da Amplitude, enquanto Passerat de Silans et al. (1999) obtiveram em solos do Sahel difusividade térmica entre $0,27$ a $1,40 \times 10^{-6} m^2 s^{-1}$, usando diferentes métodos. Concluíram que o método Harmônico proporciona bons resultados quando a condição de estabilidade da periodicidade é satisfeita e que entre dias com condições de clima muito variáveis, o mesmo deve ser substituído pelo método da Transformada de Laplace corrigida. Já os valores obtidos por Verhoef (2004) situaram-se entre $0,40$ e $0,80 \times 10^{-6} m^2 s^{-1}$, em campanha realizada em Sonning, Reino Unido, com técnica inovadora, baseada em medições de temperatura da superfície e saldo de radiação, proposta para medir remotamente a inércia térmica do solo.

A profundidade de amortecimento e a velocidade de propagação de calor para o ciclo diário, foram de $0,14$ m e $10,56 \times 10^{-6} m s^{-1}$ para a camada de $0,05-0,20$ m e $0,12$ m e $8,89 \times 10^{-6} m s^{-1}$ para a camada de $0,05-0,50$ cm, respectivamente, para o solo classificado como Latossolo Amarelo distrófico, em Salvador, BA, para o dia 6/2/93.

CONCLUSÕES

- Os ciclos anual e diário da temperatura do solo mostram diminuição da amplitude e aumento da fase, com a profundidade.
- A difusividade média, no caso do ciclo anual, foi de $0,456 \times 10^{-6} m^2 s^{-1}$.
- A profundidade de amortecimento para a camada de $0,02$ a $1,00$ m foi $2,08$ m e a velocidade de propagação foi de $0,42 \times 10^{-6} m s^{-1}$ para o ciclo anual.
- No caso do ciclo diário, a difusividade térmica obtida para a camada de $0,05-0,50$ m, pelos métodos da amplitude e logarítmico, foi $0,55 \times 10^{-6} m^2 s^{-1}$.
- A profundidade de amortecimento e a velocidade de propagação foram de $0,12$ m e $8,89 \times 10^{-6} m s^{-1}$, respectivamente, para o ciclo diário.

LITERATURA CITADA

- Abu-Hamdeh, N.H. Effect of tillage on soil thermal conductivity for some Jordanian clay loam and loam soils. *Soil & Tillage Research*, Amsterdam, v.56, p.145-151, 2000.
- Campbell, G.S. *Soil physics with BASIC-transport models for soil-plant systems*. New York: Elsevier, 1985. 150p.
- Carson, J.E. Analysis of soil and air temperatures by Fourier techniques. *Journal of Geophysical Research*, Washington, v.68, n.8, p.2217-2232, 1963.
- Decico, A.; Reichardt, K. Determinação das propriedades térmicas do solo em condições de campo. *Ciência e Cultura*, Campinas, v.28, n.3, p.359-362, 1976.
- Draper, N.R.; Smith, H. *Applied regression analysis*. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1966. 407p.

- De Vries, D.A. Thermal properties of soils. In: van Wijk, W.R. (ed.), *Physics of plant environment*. Amsterdam: North Holland Publishing Company. 1963. p.210-235.
- Fideles, J.F. *Estrutura térmica de solos do Nordeste do Brasil*. Campina Grande: UFPB, 1988, 85p. Dissertação Mestrado
- Geiger, R. *The climate near the ground*. 4.ed. Cambridge: Harvard University Press. 1973. 611p.
- Hinkel, M.H. Estimating seasonal values of thermal diffusivity in thawed and frozen soils using temperature time series. *Cold Regions Science Technology*, Lebanon, NH, USA. v.26, p.1-15, 1997.
- Horton, R.; Wierenga, P.J.; Nielsen, D.R. Evaluation of methods for determining the apparent thermal diffusivity of soil near the surface. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.47, p.25-32, 1983.
- Nerpin, S.V.; Chudnovskii, F. *Physics of the soil*. Jerusalem: Keter Press. 1967. 466p. Israel program for scientific translations
- Passerat de Silans, A.M.B.; Monteny, B.A.; Lhomme, J.P. Apparent soil thermal diffusivity, a case study: HAPEX – Sahel experiment. *Agricultural and Forest Meteorology*, v.81, p.201-216, 1999.
- Ramana Rao, T.V. *Heat flow into the soil*. Waltair: Andhra University, 1966, 123p. MSc Dissertation
- Ramana Rao, T.V.; Vianello, R.L. *Características térmicas do solo de Cachoeira Paulista, SP*. São José dos Campos: INPE, 1977. 21p.
- Richtmeyer, R.D.; Morton, K.W. *Difference methods for initial-value problems*. 2.ed. New York: Interscience Publishers, 1967. 406p.
- Santos, R.C.A. *Propriedades térmicas do solo: um estudo de casos*. São José dos Campos: INPE, 1987, 112p. Dissertação Mestrado
- Seemann, J. *Measuring technology*. In: Seemann, J.; Chirkov, Y.I.; Lomas, J.; Primault, B. (eds) *Agrometeorology*. Berlin: Springer-Verlag, 1979, p.40-45.
- Van Wijk, W.R. (ed.). *Physics of plant environment*. Amsterdam: North Holland Publishing Company. 1963, 382p.
- Verhoef, A. Remote estimation of thermal inertia and soil heat flux for bare soil. *Agricultural and Forest Meteorology*, Lebanon, NH, USA. v.123, p.221-236, 2004.
- Williams, G.P.; Gold, L.W. *Ground temperatures*. Ottawa: Canadian Building Digest, 1976, 6p. Report number 180