

1. Classificação INPE-COM.10/PE C.D.U.: 551.584.3		2. Período	4. Critério de Distribuição: interna <input type="checkbox"/> externa <input checked="" type="checkbox"/>
3. Palavras Chaves (selecionadas pelo autor) <i>Ciclo Anual; Difusividade Térmica; Temperatura do Solo; Análise Harmônica; Microclima do Solo; Profundidade de Amortecimento</i>			
5. Relatório nº INPE-1107-PE/081	6. Data Setembro, 1977	7. Revisado por <i>[assinatura]</i> Luiz Carlos B. Molion	
8. Título e Sub-Título <i>COMPORTAMENTO TÉRMICO DO SOLO DE VIÇOSA-MG CICLO ANUAL-1971</i>		9. Autorizado por <i>[assinatura]</i> Nelson de Jesus Parada Diretor	
10. Setor	Código	11. Nº de cópias 25	
12. Autoria R.L. Vianello T.V. Ramana Rao J.M. Nogueira		14. Nº de páginas 32	
13. Assinatura Responsável <i>[assinatura]</i> T.V. Ramana Rao		15. Preço	
16. Sumário/Notas <i>Usando dados de temperatura observados ao nível do abrigo e solo, a 02, 05, 10, 20 e 30 cm de profundidade, para o ano de 1971, estudou-se o Ciclo Anual, visando um melhor entendimento do Microclima local - Viçosa - MG. Para isto, tomou-se a Equação Geral da Condução de Calor para um meio isotrópico, em estado permanente, sem fontes e sumidouros de energia, e usando apenas a componente vertical, expandiu-se sua solução em série de Fourier. Assim, foi possível estudar o comportamento térmico do solo para os 5 primeiros harmônicos, bem como a Variância e o Desvio Padrão para cada harmônico e acumulados. Calculou-se ainda a Difusividade Térmica por meio da Amplitude e Fase do primeiro harmônico.</i>			
17. Observações Este trabalho foi parcialmente financiado pelo Fundo Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - FNDCT, através do Convênio FINEP-271-CT. <i>Trabalho a ser apresentado no "Seminário Internacional sobre Climatologia do Hemisfério Sul", Campinas, 5 a 9 de setembro de 1977.</i>			

ÍNDICE

	Pág.
RESUMO	<i>iv</i>
LISTA DE FIGURAS	<i>v</i>
LISTA DE TABELAS	<i>vi</i>
1. INTRODUÇÃO	1
2. CONSIDERAÇÕES TEÓRICAS	2
3. RESULTADOS	8
4. CONCLUSÕES	20
AGRADECIMENTOS	25
BIBLIOGRAFIA	27

COMPORTAMENTO TÉRMICO DO SOLO DE VIÇOSA-MG
CICLO ANUAL-1971

R.L. Vianello*, T.V. Ramana Rao, J.M. Nogueira**

Instituto de Pesquisas Espaciais
Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
12 200 - São José dos Campos - SP - Brasil

RESUMO

Usando dados de temperatura observados ao nível do abrigo e solo, a 02, 05, 10, 20 e 30 cm de profundidade, para o ano de 1971, estudou-se o Ciclo Anual, visando um melhor entendimento do Microclima local - Viçosa - MG. Para isto, tomou-se a Equação Geral da Condução de Calor para um meio isotrópico, em estado permanente, sem fontes e sumidouros de energia, e usando apenas a componente vertical, expandiu-se sua solução em série de Fourier. Assim, foi possível estudar o comportamento térmico do solo para os 5 primeiros harmônicos, bem como a Variância e o Desvio Padrão para cada harmônico e acumulados. Calculou-se ainda a Difusividade Térmica por meio da Amplitude e Fase do primeiro harmônico.

* Universidade Federal de Juiz de Fora - UFJF - MG

** Universidade Federal de Viçosa - UFV - MG

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
FIG. 1 - CICLO ANUAL DE TEMPERATURA DO SOLO PARA DIFERENTES PROFUNDIDADES E HORÁRIOS 1200, 1800 E 2400 TMG	9
FIG. 2 - CICLO ANUAL DE TEMPERATURA DO SOLO PARA DIFERENTES PROFUNDIDADES, MÉDIAS PARA OBSERVAÇÕES DIÁRIAS ÀS 1200, 1800 E 2400 TMG	11
FIG. 3a - PERFÍIS DE TEMPERATURAS MÉDIAS MENSAIS, HORÁRIO 1200 TMG ..	12
FIG. 3b - PERFÍIS DE TEMPERATURAS MÉDIAS MENSAIS, HORÁRIO 1800 TMG ..	13
FIG. 3c - PERFÍIS DE TEMPERATURAS MÉDIAS MENSAIS, HORÁRIO 2400 TMG ..	14
FIG. 4 - PERFÍIS DE TEMPERATURAS MÉDIAS MENSAIS A DIFERENTES PROFUNDIDADES, HORÁRIOS 1200, 1800 E 2400 TMG, MESES DE JANEIRO, ABRIL, JULHO E OUTUBRO DE 1971	16
FIG. 5 - PERFÍIS DE TEMPERATURAS MÉDIAS ANUAIS, HORÁRIOS 1200, 1800, 2400 TMG	17
FIG. 6 - DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURAS MÉDIAS PARA PERÍODO DE 10 DIAS, A DIFERENTES PROFUNDIDADES	18

LISTA DE TABELAS

	Pág.
TABELA 1 - AMPLITUDE DA ONDA DE TEMPERATURA ($^{\circ}\text{C}$) DO SOLO PARA DIFERENTES PROFUNDIDADES E AR, HARMÔNICOS DE 1 A 5, HORÁRIOS 1200, 1800 E 2400 TMG	19
TABELA 2 - FASE (GRAUS) DA ONDA DE TEMPERATURA DO SOLO PARA DIFERENTES PROFUNDIDADES E AR, HARMÔNICOS 1 A 5, HORÁRIOS 12, 18 E 24 TMG	21
TABELA 3a - PORCENTAGEM DA VARIÂNCIA TOTAL, PARA HARMÔNICOS DE 1 A 5, DIFERENTES PROFUNDIDADES	22
TABELA 3b - PORCENTAGEM DE VARIÂNCIA ACUMULADA PELA SOMA DOS HARMÔNICOS INDICADOS	22
TABELA 4 - DIFUSIVIDADE TÉRMICA (cm^2/s) PARA DIFERENTES CAMADAS DO SOLO DE VIÇOSA - MG	23
TABELA 5 - VALORES DA DIFUSIVIDADE TÉRMICA PARA SOLOS ARGILOSOS E ARENOSOS EXTRAÍDOS DE RUDOLF GEIGER, "CLIMATE NEAR THE GROUND"	23

1. INTRODUÇÃO

Clima e microclima são conceitos usados na caracterização do meio ambiente (Wijk, W.R. Van).

Quando se deseja verificar o papel desempenhado por um elemento no microclima local - digamos um tipo especial de cultivo que seja introduzido - surge um problema de interação mútua, ou seja, não há dúvida que a introdução de um certo tipo de cultivo causará uma sensível modificação no microclima local e, entretanto, não se pode negar que o êxito ou fracasso de tal atividade dependerá decisivamente das condições microclimáticas que caracterizam o meio ambiente original.

No sistema solo-planta, em especial, estas interações são marcantes, causando mudanças em uma série de fatores tais como, umidade, temperatura, aeração, composição, permeabilidade etc., permitindo mesmo falar-se de um "*Microclima do Solo*", o qual poderia ser definido como "um complexo de certos fatores que determinam o estado de um solo, considerando-o como um meio ambiente para plantas, animais etc." (Geiger, Rudolf).

Particularmente, no que tange à temperatura, vale observar que esta depende primariamente da quantidade de calor que entra ou sai do solo, por unidade de área e unidade de tempo, como também de sua composição, estrutura, teor de umidade e conteúdo de ar em seus interstícios. Por outro lado, sabe-se atualmente que a temperatura é um dos mais importantes elementos na caracterização do microclima do solo, sendo pois seu estudo plenamente justificável para vários propósitos, dentre outros, para fins agro-pastoris, estudo de balanço de radiação, processos de evaporação e condensação, enfim, agindo de forma decisiva como modificador das condições da camada de ar imediatamente em contato com o solo, a qual por seu turno atua diretamente sobre todos os seres da biosfera.

A natureza e as características dos solos variam amplamente de lugar para lugar com o tempo (Geiger, Rudolf).

Com base em dados observados durante o ano de 1971, horários 12, 18 e 24 TMG, na Estação Climatológica Principal de Viçosa, Minas Gerais, nº 83642, (latitude: 20°45'S; longitude: 42°51'W), os quais foram extraídos diretamente dos arquivos do Depto. de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, realizou-se o presente trabalho, o qual permitirá maiores conhecimentos do microclima daquela região, através do estudo do comportamento térmico para os níveis de observações disponíveis - superfície (temperatura do abrigo), 02, 05, 10, 20 e 30 cm de profundidade. Além do conhecimento dos 5 primeiros harmônicos com suas respectivas variâncias, estudou-se ainda a difusividade térmica para as camadas 02-05, 05-10, 10-20 e 20-30 cm de profundidade, usando-se amplitudes e fases do primeiro harmônico. Tratando-se a UFV de um dos mais destacados centros de ensino agrícolas do país, fato este também de reconhecimento internacional, o presente trabalho, além dos interesses acima apontados, certamente, servirá para propósitos didáticos, especialmente para a disciplina de Agrometeorologia.

2. CONSIDERAÇÕES TEÓRICAS

Usando o sistema de coordenadas cartesiano (x, y, z), onde z é a componente vertical, e realizando um balanço de energia no tempo dt sobre um elemento do volume, ou seja,

$$\text{INFLUXO DE CALOR} + \text{FONTE DE CALOR} = \text{EFLUXO DE CALOR} + \text{TROCA NA ENERGIA INTERNA}$$

demonstra-se que:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

onde $T = T(x, y, z, t)$ é a temperatura do elemento; k_x , k_y e k_z são valores da condutividade térmica nas direções x, y e z, respectivamente; \dot{q} , é a fonte de energia no tempo dt; c, o calor específico, e ρ a densidade.

Admitindo-se a isotropia, isto é, k constante e o mesmo em todas as direções, segue-se que:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\dot{q}}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

onde $\alpha = \frac{k}{\rho C}$ é a difusividade térmica do elemento em consideração, k sua condutividade térmica e o produto $\rho C = C$, a capacidade térmica.

A equação (2) é conhecida como "EQUAÇÃO GERAL DA CONDUÇÃO DE CALOR" e governa a distribuição de temperatura e fluxo de calor, por condução, em um corpo sólido de propriedades homogêneas.

Quando o sistema não possui fontes de calor, então (2) se torna:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3)$$

Esta é a "EQUAÇÃO DE FOURIER".

Se, agora, considerarmos apenas o estado permanente do sistema, i.e., $\frac{\partial}{\partial t} = 0$, (2) passa a ser

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\dot{q}}{k} = 0 \quad (4)$$

que é a conhecida "EQUAÇÃO DE POISSON".

Finalmente, assumindo estado permanente e ausência de fontes ($\frac{\dot{q}}{k} = 0$), tem-se

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0 \quad (5)$$

ou seja, "EQUAÇÃO DE LAPLACE".

Entretanto, para o estudo de condução de calor e cálculo das propriedades térmicas do solo, é *hábito* considerá-lo como um meio homogêneo, isotrópico, sem fontes de calor, e de condutividade térmica constante, e reduzir a análise apenas à direção vertical e ao tempo. Neste caso, a Equação Geral da Condução se reduz a

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad \text{ou,} \quad \frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (6)$$

Com as aproximações feitas, a densidade e a capacidade calorífica tornam-se constantes com a profundidade, por isso, $\alpha = \frac{k}{C} = \text{constante}$.

Então, assumindo condução de calor em estado permanente e integrando (6), segue-se que:

$$\frac{dT}{dz} = \text{constante} \quad (7)$$

A equação (7) é consistente com a lei de *Fick*, a qual se expressa como:

$$H = - k \nabla T \quad (8)$$

para um sólido isotrópico. Se a análise se reduz apenas à direção vertical, então (8) fica:

$$H = - k \frac{\partial T}{\partial z} \quad (9)$$

onde $H = H(z, t)$ é a densidade de fluxo de calor, aqui expresso em $\text{cal cm}^{-2} \text{seg}^{-1}$; k é constante ($\text{cal cm}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \text{seg}^{-1}$); $T = T(z, t)$ é a temperatura e $\partial T / \partial z$ o gradiente vertical de temperatura ($^\circ\text{C cm}^{-1}$). Aqui, a densidade de fluxo refere-se à quantidade de calor que flui através de uma área unitária perpendicular a z e por unidade de tempo.

Desde que, na realidade, o solo não é um meio homogêneo, a equação (9) só pode ser aplicada a um solo se as variações locais,

causadas pela estrutura granular do solo e outras heterogeneidades, foram desprezadas. Conseqüentemente, H representa um valor médio englobando todas as irregularidades locais; T , a temperatura média de um plano horizontal a uma profundidade z ; e k a condutividade térmica média, incluindo a influência de grânulos, pequenas pedras, fissuras, raízes de plantas etc.

O sinal negativo da expressão (9) corresponde ao fato que o fluxo de calor ocorre na direção do decréscimo da temperatura, isto é, de $\partial T/\partial z$ negativo. No caso do solo, z é positivo para baixo e igual a zero à superfície, por convenção.

A solução da equação (6), que satisfaz as condições propostas para o estudo das características térmicas do solo, é

$$T(z, t) = T_a + T_0 \exp(-z/D) \sin(\omega t + \phi_0 - z/D) \quad (10)$$

onde T_a é a temperatura média, T_0 é a amplitude à superfície, D é uma constante chamada "*PROFUNDIDADE DE AMORTECIMENTO*", ω é a frequência dada por $\omega = 2\pi/P$, onde P é o período.

Em se tratando de estudo de ciclo anual $P = 86400 \times 365,25$ seg; ϕ_0 é a fase e seu valor constante depende da escolha do ponto zero na escala de tempo, t ; entretanto, deve ser escolhido tal que $(\omega t + \phi_0 - z/D) = \pi/2$ quando a temperatura da superfície está em seu máximo.

A profundidade de amortecimento, D , depende de ω , bem como das propriedades térmicas do solo, ou seja,

$$D = (2k/C\omega)^{1/2} = (2\alpha/\omega)^{1/2} \quad (11)$$

Pela equação (10) a amplitude decresce exponencialmente com o aumento da profundidade, z , que também influi no retardo da fase. Ainda mais, por causa da função seno, $T(z, t)$ oscila em torno da temperatura média, T_a , com uma gama total de $2T_0$. Vê-se também que a temperatura máxima ocorre no tempo t , tal que

$$(wt + \phi_0 - z/D) = \pi/2 \quad (12)$$

daí o critério para a escolha do ponto zero na escala de tempo, t.

A profundidade de amortecimento D, pode ser interpretada fisicamente como a profundidade $z = D$, na qual a amplitude decresce pela fração $1/e \approx 1/2$, $718 \approx 0,36$ de seu valor T_0 à superfície.

Se a amplitude da onda de temperatura, à profundidade z , é $T_0 \exp(-z/D)$, então, a razão de amplitudes a duas profundidades z_1 e z_2 fornecerá a Equação da Amplitude, ou seja:

$$\frac{\delta_1}{\delta_2} = \exp\left(\frac{z_2 - z_1}{D}\right) \quad (13)$$

onde δ_1 e δ_2 são as amplitudes referentes às profundidades z_1 e z_2 , respectivamente.

Para obtermos a Equação da Fase em função de t, basta resolver a eq. (12), aplicando-a a dois níveis z_1 e z_2 e subtrair.

Assim, segue:

$$\Delta t_{\max} = \Delta t_{\max(2)} - \Delta t_{\max(1)} = \frac{1}{w} \left(\frac{z_2 - z_1}{D} \right) \quad (14)$$

Usando agora a Equação da Amplitude (13) e substituindo nela a eq. (11), obter-se-á uma expressão para " α ", ou seja, para o cálculo da *DIFUSIVIDADE TÉRMICA*, isto é,

$$\alpha = \frac{w}{2} \left| \frac{z_2 - z_1}{\ln \delta_1 / \delta_2} \right|^2 \quad (15)$$

Aplicando o mesmo tratamento à eq. (14), resulta

$$\alpha = \frac{1}{2w} \left| \frac{z_2 - z_1}{\Delta t_{\max}} \right|^2 \quad (16)$$

Ambas as equações (15) e (16) permitem conhecer a difusividade térmica de uma certa camada do solo.

Por outro lado, desejando-se conhecer o comportamento térmico do mesmo tipo de solo, porém sob o aspecto de diferentes harmônicos, podemos usar, como solução da eq. (6), uma expressão mais geral, na forma de expansão de Fourier, ou seja:

$$T(z, t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \exp(-z/D_n) \cos(n\omega t - z/D_n) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \exp(-z/D_n) \sin(n\omega t - z/D_n) \quad (17)$$

onde a_0 , a_n e b_n são os coeficientes de Fourier do curso da temperatura a $z = 0$ e, são usados para o cálculo da amplitude e fase para cada harmônico ou seja:

$$A_n = \left(a_n^2 + b_n^2 \right)^{1/2} \quad (18)$$

$$\phi_n = \tan^{-1} \left(\frac{b_n}{a_n} \right) \quad (19)$$

onde A_n e ϕ_n são amplitude e fase, respectivamente.

Vale observar que a equação (10) é válida para cada termo da expansão de Fourier.

Como se pode esperar, para períodos com predomínio de dias claros, os coeficientes a_1 e b_1 são consideravelmente maiores que os coeficientes seguintes; conseqüentemente, D deve ser calculado pelo primeiro harmônico.

No presente trabalho serão calculadas amplitude e fase para os cinco primeiros harmônicos, para todos os níveis, a fim de se conhecerem os ciclos anuais da temperatura.

Para calcular o desvio padrão e a variância para os diversos harmônicos em consideração, usaram-se as seguintes expressões:

$$S = \left| \frac{\sum d^2}{N} \right|^{\frac{1}{2}} \quad (20)$$

$$S^2 = \frac{\sum d^2}{N} \quad (21)$$

onde "S" é o desvio padrão, "S²" a variância, "d" a diferença entre a temperatura observada e a amplitude do harmônico de ordem n (n = 1, 2, 3, 4, 5).

Finalmente, a porcentagem da variância acumulada foi calculada pela soma dos harmônicos.

3. RESULTADOS

A Figura 1 refere-se ao *CICLO ANUAL DE TEMP. DO SOLO PARA DIFERENTES PROFUNDIDADES E HORÁRIOS 1200, 1800 e 2400 TMG*. Como, teoricamente, era de se esperar, os perfis observados nos diferentes horários apresentam aproximadamente as mesmas características, ou seja: as temperaturas máximas ocorrem em fevereiro (verão no Hemisfério Sul) e as mínimas em julho (inverno). Particularmente no horário 18 TMG, observa-se uma nítida defasagem para as temperaturas mínimas, entre os níveis

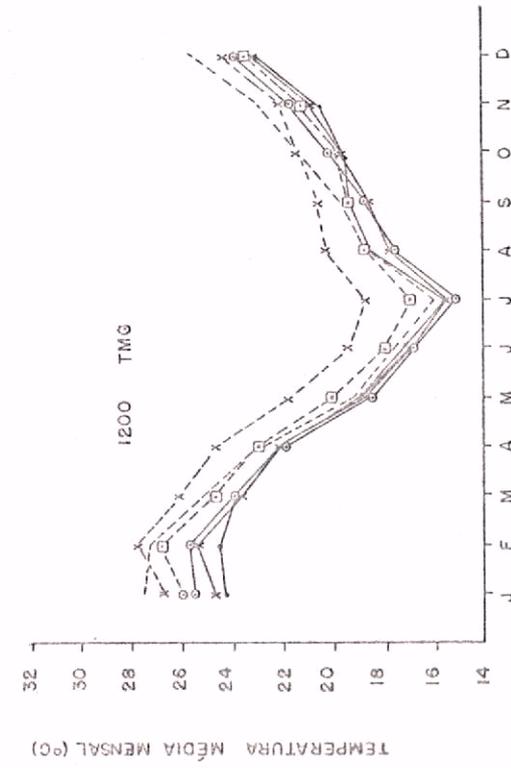
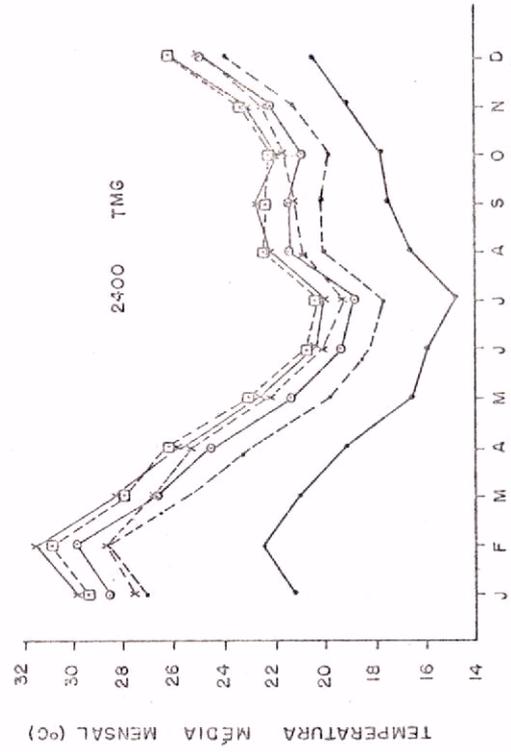
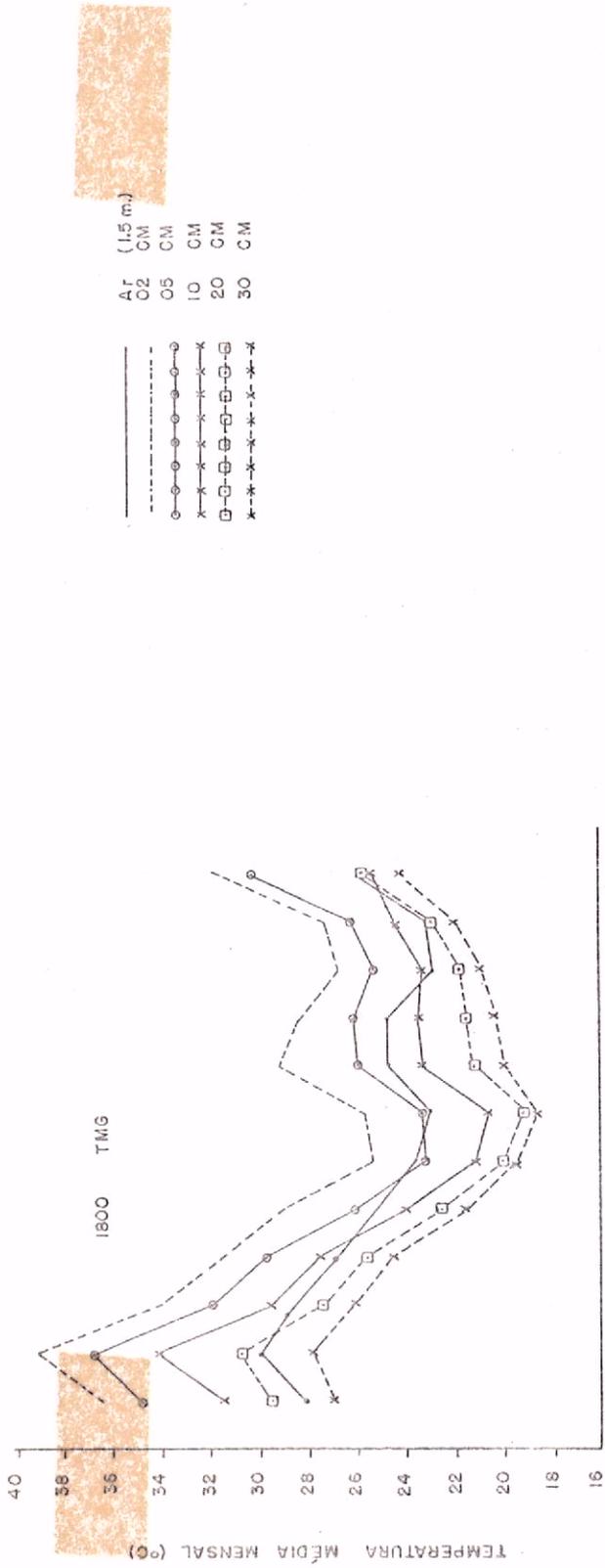


Fig. 1 - Ciclo Anual de Temperatura do Solo para Diferentes Profundidades e Horários 1200, 1800 e 2400 TMG. Viçosa - MG - 1971

de 02 e 05 cm e os níveis de 10, 20 e 30 cm. Para os dois primeiros, a mínima se situa no mês de junho enquanto, para os três últimos, localiza-se em julho. Realmente, tal defasagem verifica-se entre níveis subsequentes, aumentando com a profundidade, como pode ser observado na Tabela 2, primeiro harmônico.

No horário 24 TMG observa-se que a temperatura do ar apresenta valores inferiores em relação ao solo, para todos os meses, o que seria obviamente esperado, tendo em vista que a capacidade calorífica do solo é maior que do ar.

A Figura 2 mostra o perfil médio anual para a temperatura do ar e os demais níveis em consideração. Como seria fisicamente esperado, a temperatura ao nível de 02 cm apresenta valores mais elevados durante todo o ano, enquanto a temperatura do ar caracteriza-se por apresentar valores menores. Observa-se ainda que a variação de temperatura entre quaisquer níveis de profundidade é máxima no verão e mínima no inverno.

Os perfis médios mensais para o horário 12 TMG, podem ser vistos na figura 3a, onde se observa, para todos os meses, um aumento de temperatura nos primeiros centímetros de profundidade, seguido de um decréscimo, a partir dos 5 cm, até a profundidade máxima observada (30 cm). Como pode ser ainda observado, a gama de variação, diminui com a profundidade, tendo alcançado $11,5^{\circ}\text{C}$ aos 2 cm e $9,1^{\circ}\text{C}$ aos 30 cm. Vale observar que os perfis apresentam variações acentuadas próximo à superfície e decrescem sensivelmente nos níveis mais profundos.

Para o horário 18 TMG, Figura 3b, nota-se uma queda contínua da temperatura desde 2 cm até 30 cm, em todos os meses. A variação foi máxima aos 2 cm, $13,8^{\circ}\text{C}$, e mínima aos 30 cm, $9,1^{\circ}\text{C}$.

A Figura 3c expressa os perfis médios para o horário 24 TMG. Comparando-a à Figura 3a, observa-se uma configuração oposta àquela encontrada para 12 TMG. Próximo à superfície, 24 TMG, registra-se, para

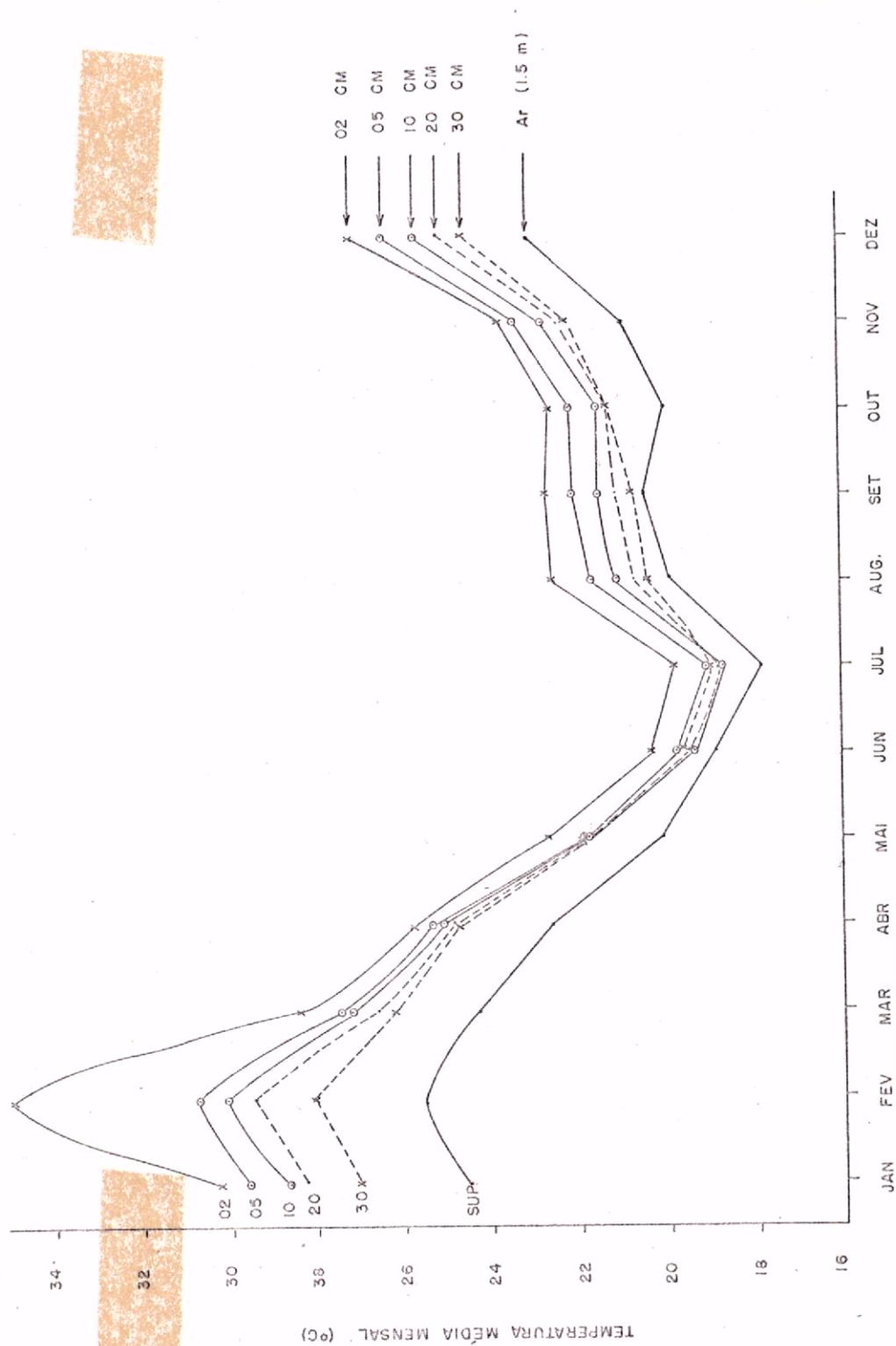


Fig. 2 - Ciclo Anual de Temperatura do Solo para Diferentes Profundidades, Médias para Observações Diárias às 1200, 1800 e 2400 TMG. Viçosa - MG - 1971

AMPLITUDE TÉRMICA ANUAL
8.8 °C

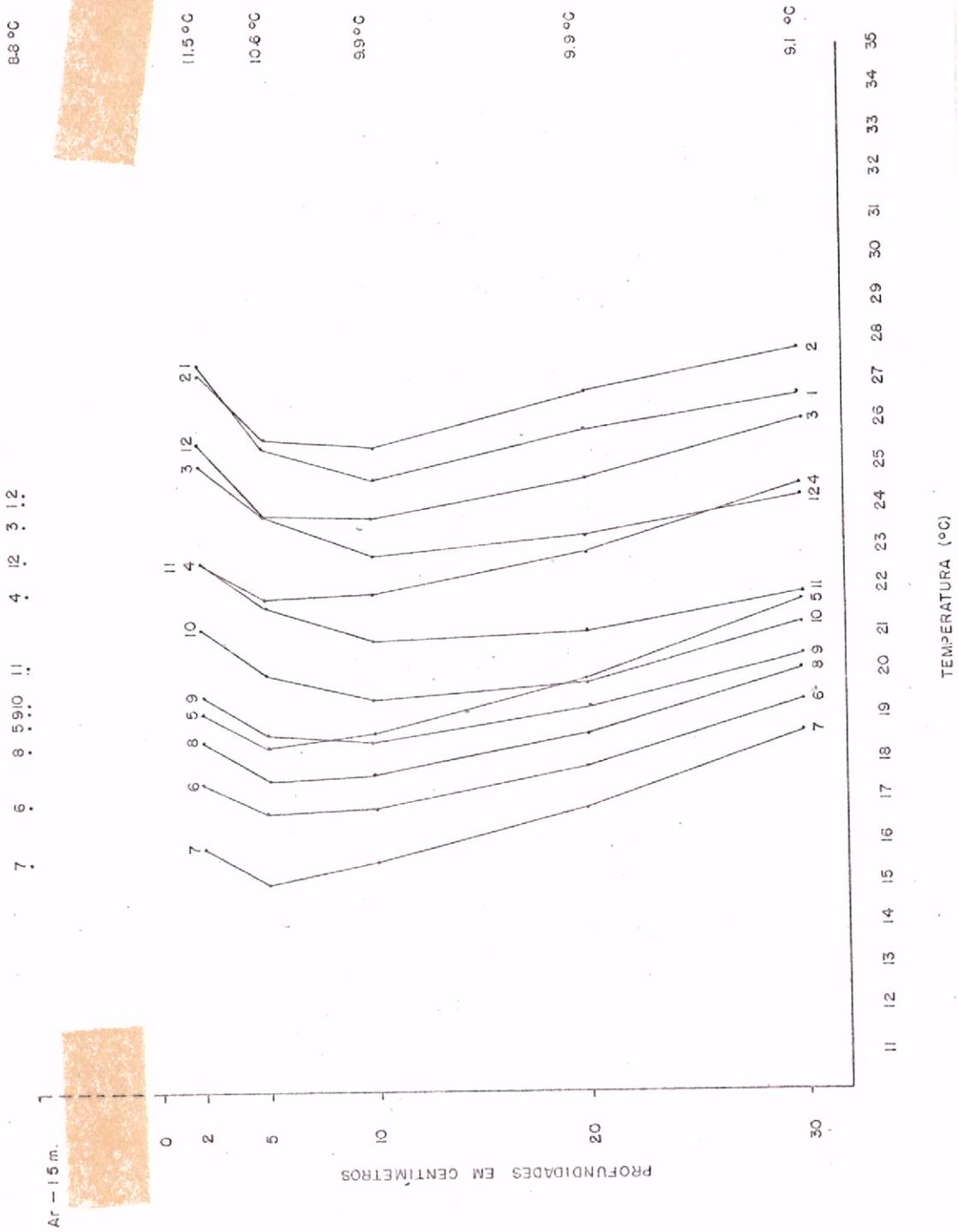


Fig. 3a - Perfis de Temperaturas Médias Mensais, Horário 1200 TMG.
Viçosa - MG - 1971

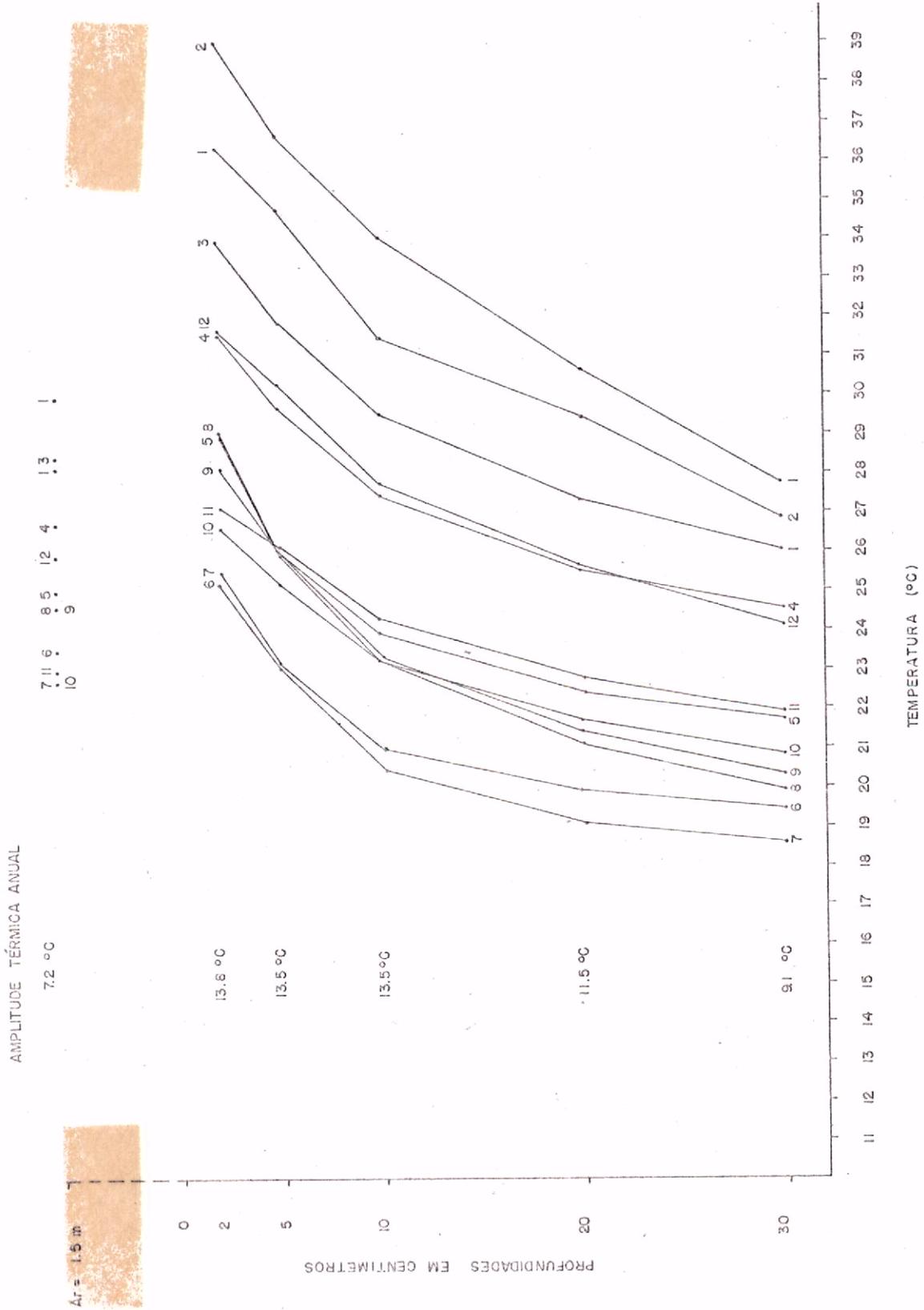


Fig. 3b - Perfis de Temperaturas Médias Mensais, Horário 1800 TMG.
Viçosa - MG - 1971

AMPLITUDE TÉMICA ANUAL

7.6 °C



Ar = 15 m. 7 6 5 10 4 12 3 1 2

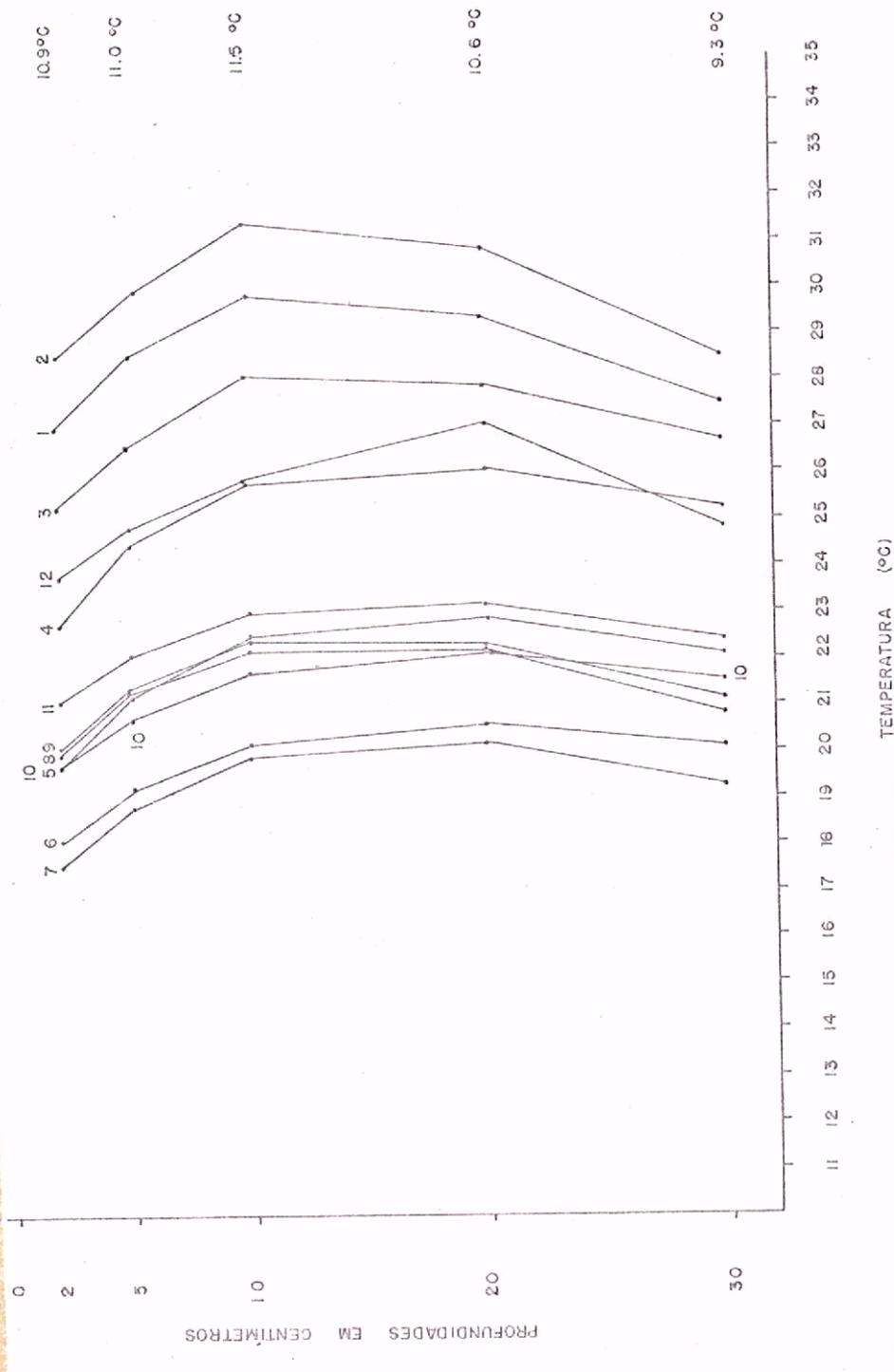
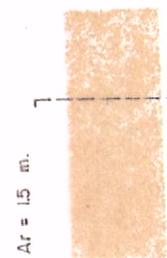


Fig. 3c - Perfis de Temperaturas Médias Mensais, Horário 2400 TMG. Viçosa - MG - 1971

todos os meses, um aumento da temperatura com a profundidade até aproximadamente 10 cm. Desta até 20 cm, os perfis apresentam tendências diferentes conforme as várias estações do ano: no verão apresentam ligeiro decréscimo, ao passo que nos meses de inverno inverte-se a tendência, enquanto no outono e primavera conservam-se aproximadamente constantes. Dos 20 cm aos 30 cm, para todo ano, verifica-se um decréscimo contínuo. A variação máxima para este horário ocorre aos 10 cm de profundidade, chegando a $11,5^{\circ}\text{C}$, enquanto aos 30 cm encontra-se em $9,3^{\circ}\text{C}$.

É interessante observar que, ao nível de 30 cm, a gama anual apresentou-se máxima, no horário 24 TMG. Claramente tal fato justifica-se pela defasagem observada no registro da temperatura máxima para as diferentes profundidades, como teoricamente se espera, equação (14).

Para facilitar a visualização dos perfis médios para os três horários observados, nas diferentes estações do ano, a Figura 4 foi elaborada. Identicamente, a Figura 5 mostra os referidos perfis médios anuais.

Na Figura 6 acham-se plotados os valores de temperatura médios para períodos de 10 dias. Pode ser observado que, durante o mês de fevereiro, as temperaturas alcançaram valores máximos, chegando a 32°C aos 2 cm e 28°C aos 30 cm de profundidade. Vê-se, também, que os valores mais baixos ocorrem durante o mês de junho, próximo à superfície, e em julho para os níveis mais profundos. Evidentemente, a restrição das observações ao nível de 30 cm e a concentração dos dados em períodos médios de 10 dias, impediram que se verificasse, nesta figura, a defasagem anteriormente citada.

Os resultados da análise de Fourier, para o estudo do Ciclo Anual, são mostrados na Tabela 1. O domínio do primeiro harmônico é notável, para todas as profundidades, inclusive para a temperatura do ar. Especialmente a partir da profundidade de 10 cm, onde o solo é mais homogêneo, verifica-se um decréscimo na amplitude, como seria teoricamente esperado (James E. Carson, 1963).

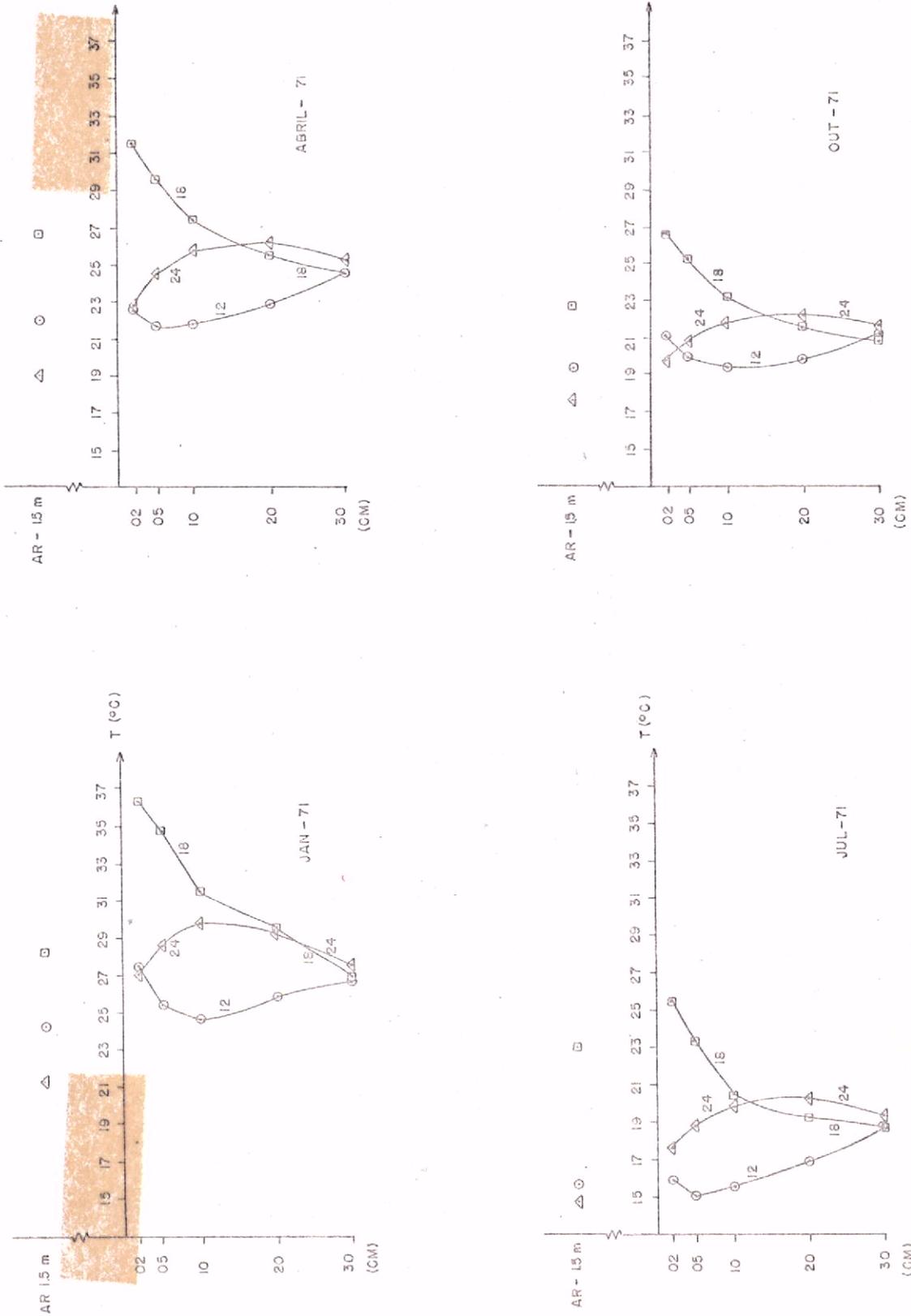


Fig. 4 - Perfis de Temperaturas Médias Mensais a Diferentes Profundidades, Horários 1200, 1800 e 2400 TMG, Meses de Janeiro, Abril, Julho e Outubro de 1971. Viçosa - MG - 1971

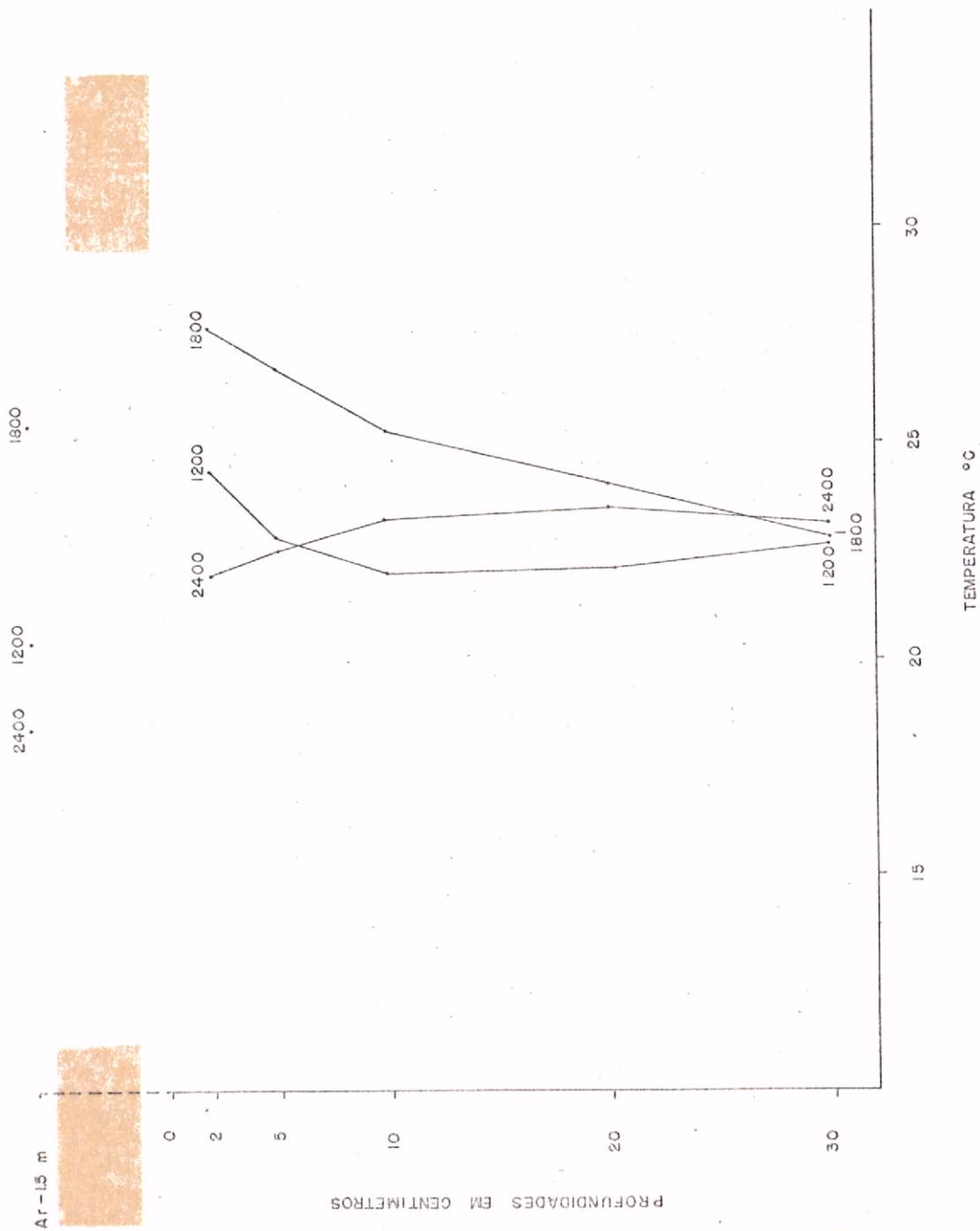


Fig. 5 - Perfis de Temperaturas Médias Anuais, Horários, 1200, 1800 e 2400 TMG. Viçosa - MG - 1971

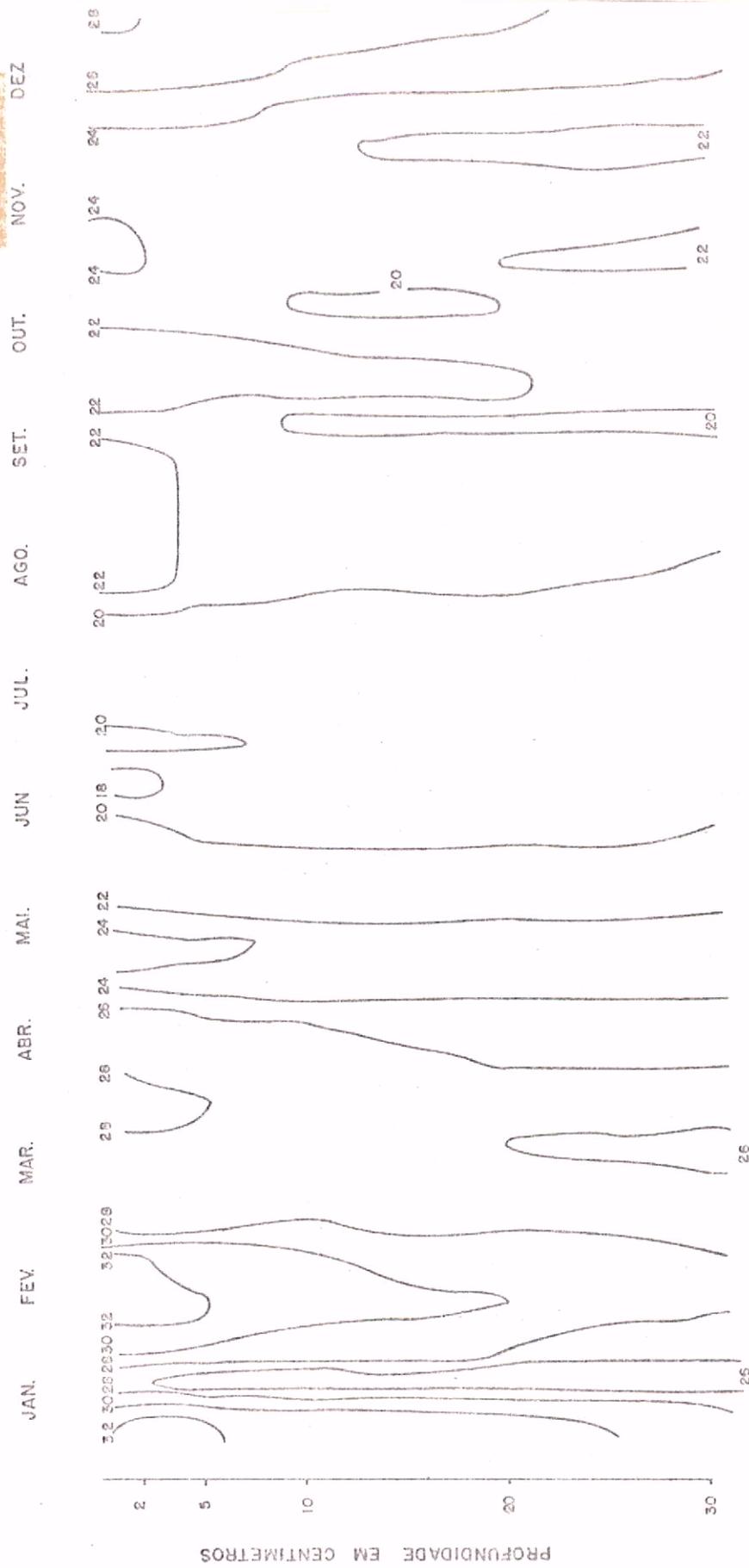


Fig. 6 - Distribuição de Temperaturas Médias para Período de 10 Dias, a Diferentes Profundidades. Viçosa - MG - 1971

TABELA 1

AMPLITUDE DA ONDA DE TEMPERATURA ($^{\circ}\text{C}$) DO SOLO PARA
DIFERENTES PROFUNDIDADES E AR, HARMÔNICOS DE 1 A 5,
HORÁRIOS 1200, 1800, E 2400 TMG
VIÇOSA - MG, 1971

HORA DA OBSERVAÇÃO	PROFUNDIDADES (CM)	HARMÔNICOS				
		1º	2º	3º	4º	5º
1200 TMG	AR	3,75	0,98	0,59	0,22	0,21
	02	5,15	0,79	0,43	0,05	0,24
	05	4,68	0,75	0,34	0,13	0,27
	10	4,27	0,87	0,30	0,15	0,18
	20	4,23	1,03	0,42	0,19	0,14
	30	3,94	1,03	0,38	0,22	0,01
	1800 TMG	AR	2,75	1,54	0,60	0,34
02		5,02	2,75	1,15	0,79	0,23
05		5,31	2,38	0,94	0,51	0,27
10		5,23	1,98	0,73	0,60	0,28
20		4,77	1,48	0,67	0,39	0,16
30		4,02	0,99	0,40	0,20	0,10
2400 TMG		AR	3,11	0,80	0,05	0,31
	02	4,36	1,76	0,47	0,35	0,21
	05	4,42	1,82	0,61	0,36	0,25
	10	4,65	1,93	0,62	0,38	0,23
	20	4,37	1,59	0,55	0,33	0,17
	30	4,01	1,12	0,42	0,16	0,13

Quanto à fase, a Tabela 2 mostra os valores obtidos pela análise de Fourier. Também aqui o primeiro harmônico mostra, especialmente a partir de 10 cm, os resultados teoricamente esperados, ou seja: a fase aumenta com a profundidade, mostrando assim um atraso, em graus (aproximadamente em dias), na chegada da máxima temperatura aos níveis mais profundos (op. cit., 1963)

Nas Tabelas 3a e 3b podem ser vistos os resultados do cálculo da *VARIÂNCIA* e do *DESVIO PADRÃO* de todos os harmônicos, para as diversas profundidades. Nota-se que os cinco primeiros harmônicos são suficientes para descrever o comportamento térmico do solo, pois a variância acumulada ultrapassa 99% da variância total no quinto harmônico.

A difusividade térmica calculada (cm^2/seg) pode ser visualizada na Tabela 4. Para as diferentes camadas 02-05 cm, 05-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm, foram obtidos valores através da amplitude e fase (equações 15 e 16). Os valores da Tabela 4 são resultantes da média aritmética dos valores calculados para os diferentes horários observados. Como pode ser visto pela comparação da Tabela 4 com a Tabela 5, os valores localizam-se na ordem de grandeza esperada para solos de constituição silico-argilosos.

4. CONCLUSÕES

Apesar das possíveis restrições nos dados coletados, os resultados alcançados podem ser considerados bons, permitindo ainda concluir que o ano em estudo, 1971, apresentou-se como um ano normal.

Quanto aos perfis de temperatura, os resultados indicaram boa concordância com aqueles observados para outras regiões, especialmente no que se refere à configuração, para os diferentes horários. Tal observação se faz necessária, visto que, para solos tropicais, poucos trabalhos desta natureza foram desenvolvidos até o momento.

A difusividade térmica encontrada apresentou valores compatíveis com o tipo de solo da região em estudo, o que sugere concluir que

TABELA 2

FASE (GRAUS) DA ONDA DE TEMPERATURA DO SOLO PARA DIFERENTES
PROFUNDIDADES E AR, HARMÔNICOS 1 A 5, HORÁRIOS 12, 18 E 24 TMG
VIÇOSA - MG, 1971

HORA DA OBSERVAÇÃO	PROFUNDIDADES (CM)	HARMÔNICOS				
		1º	2º	3º	4º	5º
1200 TMG	AR	14,0	103,8	319,6	212,2	3,0
	02	6,7	82,7	339,4	179,9	12,2
	05	8,1	99,6	337,2	173,4	23,8
	10	13,6	96,6	333,4	143,4	39,3
	20	18,7	83,0	348,7	102,5	55,1
	30	23,2	88,6	344,6	79,1	340,6
	AR	39,4	70,8	342,1	177,6	143,1
1800 TMG	02	26,2	64,5	349,2	108,2	175,2
	05	20,5	64,9	351,9	92,8	127,4
	10	20,9	71,4	358,7	104,6	127,4
	20	21,5	70,7	0,0	86,3	73,0
	30	24,5	83,2	345,4	80,6	56,3
	AR	8,3	93,0	341,6	188,0	68,4
	02	17,3	66,6	353,9	124,7	71,6
2400 TMG	05	19,6	69,1	347,5	106,1	69,3
	10	21,8	69,5	350,8	106,7	85,9
	20	22,9	72,0	346,0	97,2	94,2
	30	24,0	81,9	343,7	81,1	50,1

TABELA 3a

PORCENTAGEM DA VARIÂNCIA TOTAL, PARA HARMÔNICOS
DE 1 A 5, DIFERENTES PROFUNDIDADES

PROFUNDIDADES (CM)	HARMÔNICOS				
	1º	2º	3º	4º	5º
AR	87,2	10,0	1,6	0,7	0,2
02	70,6	12,0	4,9	5,1	3,8
05	87,7	10,0	1,5	0,4	0,2
10	88,4	9,5	1,3	0,4	0,1
20	89,4	8,5	1,4	0,4	0,1
30	92,3	6,3	0,9	0,2	0,0

TABELA 3b

PORCENTAGEM DE VARIÂNCIA ACUMULADA PELA
SOMA DOS HARMÔNICOS INDICADOS

PROFUNDIDADES (CM)	HARMÔNICOS					VARIÂNCIA	DESVIO PADRÃO
	1º	2º	3º	4º	5º		
AR	87,2	97,2	98,8	99,5	99,7	5,59	2,36
02	70,6	82,6	87,5	92,7	96,4	17,13	4,14
05	87,7	97,7	99,2	99,6	99,8	13,02	3,61
10	88,4	97,9	99,2	99,6	99,7	12,34	3,51
20	89,4	97,9	99,3	99,7	99,8	11,18	3,34
30	92,3	98,6	99,5	99,7	99,7	8,64	2,94

TABELA 4

DIFUSIVIDADE TÉRMICA (CM²/S) PARA DIFERENTES
CAMADAS DO SOLO DE VIÇOSA - MG

CAMADA ENTRE PROFUNDIDADES	DIFUSIVIDADE TÉRMICA 10 ⁻³ CM ² SEG ⁻¹		DIFUSIVIDADE TÉRMICA (VALOR MÉDIO) 10 ⁻³ CM ² SEG ⁻¹
	CALCULADO USANDO INFORMAÇÕES DE AMPLITUDES	CALCULADO USANDO INFORMAÇÕES DE FASES	
02 - 05	1,7	0,7	1,2
05 - 10	4,0	1,0	2,5
10 - 20	1,9	14,1	8,0
20 - 30	1,2	2,6	1,9

TABELA 5

VALORES DA DIFUSIVIDADE TÉRMICA PARA SOLOS ARGILOSOS
E ARENOSOS EXTRAÍDOS DE RUDOLF GEIGER,
"CLIMATE NEAR THE GROUND"

TIPO DO SOLO	DIFUSIVIDADE TÉRMICA 10 ⁻³ CM ² SEG ⁻¹
ARGILA ÚMIDA	6,0 - 16,0
ARGILA SECA	0,5 - 2,0
AREIA SECA	2,0 - 5,0

a presente formulação é também válida para estudo do comportamento térmico dos solos tropicais. Entretanto, futuros trabalhos deverão ser desenvolvidos, para maiores períodos de observações, para confirmação dos resultados aqui encontrados.

Seria ainda interessante o estudo do Ciclo Diário para a mesma região, quando a condutividade térmica poderia ser conhecida.

AGRADECIMENTOS

Desejamos externar nossos agradecimentos aos Drs. V.B. Rao e Luiz Carlos B. Molion, do INPE, pelo estímulo e orientação; às autoridades da Universidade Federal de Viçosa, especialmente ao Depto. de Engenharia Agrícola, pelo fornecimento dos dados.

BIBLIOGRAFIA

- CARSON, J.E. Analysis of Soil and Air Temperatures by Fourier Techniques. *Journal of Geophysical Research*, 68(8): 2217-2223, Apr., 1963.
- GEIGER, R. *The Climate Near The Ground*. Cambridge, Harvard University, 1971.
- KREITH, F. *Princípios da Transmissão de Calor*. São Paulo, Edgard Blücher/USP, 1969.
- RAMANA RAO, T.V. *Heat Flow Into The Soil*. Tese de Mestrado. Waltair, India, Andhra University, 1966.
- WIJK, W.R. van *Soil Microclimate, its Creation, Observation and Modification*. s.l., s.p., 1955. Cap. 3.