

COMPORTAMENTO E PROPRIEDADES TÉRMICAS DO SOLO SANTA MARIA

FLAVIO MIGUEL SCHNEIDER

Orientador: Afonso Decico

Dissertação apresentada à Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Mestre em Agrometeorologia.

PIRACICABA
Estado de São Paulo - Brasil
Dezembro, 1979

D E D I C O

À minha mãe Agatha

Aos meus irmãos Walmor
Nair
Clarice

A G R A D E C I M E N T O S

- Ao Prof. Dr. Afonso Decico, pela orientação e pela amizade;
- Ao Prof. Dr. Jesus Marden dos Santos, Coordenador do Curso de Agrometeorologia, pelas críticas e sugestões apresentadas;
- Aos Professores Doutores Afonso Decico, Jesus Marden dos Santos, Nilson Augusto Villa Nova, Klaus Reichardt, Hermano Vaz de Arruda, Zilmar Ziller Marcos, Paulo Roberto de Carmargo e Castro e José Carlos Ometto, pelo empenho e dedicação em transmitir conhecimentos;
- Aos Professores Ailo Valmir Saccol, Galileo Adeli Buriol, Arno Bernardo Helwein e Paulo Augusto Manfron, do Departamento de Fitotecnia da UFSM, pela amizade, incentivo e apoio;
- Aos Professores Luiz Severo Mujica Mutti, Miguel Angelo Azolin e Dalvan Reinert, da Seção de Física do Solo da U.F.S.M., pelas análises realizadas;
- À Universidade Federal de Santa Maria - UFSM, à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - C.A.P.E.S. e ao Programa de Desenvolvimento do Ensino das Ciências Agrárias - PRODECA, pela oportunidade e apoio financeiro recebidos;
- À Secretária Áurea Benedita Michelotto, pela colaboração durante o curso;

Aos Engenheiros-Agrônomos Álvaro Jaramillo Robledo, Genário José da Mata, José da Silva Lemos, Ítalo Albério de Souza, José Altino Scardua e demais colegas, pela convivência amiga.

Í N D I C E

	Página
1 - RESUMO	1
2 - INTRODUÇÃO	3
3 - REVISÃO DE LITERATURA	5
3.1 - Calor Específico do Solo	5
3.2 - Condutividade Térmica do Solo	8
3.3 - Difusividade Térmica do Solo	13
3.4 - Comportamento Diário e Anual da Temperatura em um Perfil de Solo	16
4 - MATERIAL E MÉTODOS	19
4.1 - Material	19
4.1.1 - Solo	19
4.1.2 - Geotermômetros	21
4.1.3 - Cobertura	22
4.1.4 - Dados de temperatura do solo	22
4.2 - Métodos	22
4.2.1 - Medida da temperatura do solo	22
4.2.2 - Cálculo da temperatura do solo	23
4.2.3 - Estimativa da difusividade térmica.	25
4.2.4 - Estimativa do calor específico por unidade de volume	28
4.2.5 - Estimativa da condutividade térmica.	28

	Página
4.2.6 - Estimativa da temperatura média mensal do perfil de solo nu	29
4.2.7 - Estimativa da amplitude máxima média mensal (T_0) em $Z = 0$	31
4.2.8 - Estimativa da profundidade média mensal de extinção para as ondas diárias de temperatura	31
4.2.9 - Umidade do solo	32
5 - RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
5.1 - Difusividade Térmica	34
5.2 - Calor Específico Médio	49
5.3 - Condutividade Térmica	50
5.4 - Comportamento Mensal da Temperatura Média do Perfil de Solo Nu	51
5.5 - Amplitude Máxima Média Mensal em $Z = 0$ para o Solo Nu	54
5.6 - Profundidade Média Mensal de Extinção da Onda Diária de Temperatura	55
6 - CONCLUSÕES	57
7 - SUMMARY	59
8 - LITERATURA CITADA	61
9 - APÊNDICE	68

1 - RESUMO

O objetivo deste trabalho foi determinar as propriedades térmicas e o comportamento médio mensal da temperatura do solo Santa Maria, do município de Santa Maria, RS.

A difusividade térmica foi obtida através das equações das velocidades e amplitudes das ondas diárias de temperatura. O calor específico médio por unidade de volume foi calculado com a equação proposta por De VRIES (1963). A condutividade térmica foi determinada pela relação de definição da difusividade térmica. A um teor médio de umidade de 22% em peso, os valores obtidos foram: $6,0 \times 10^{-3} \text{cm}^2 \cdot \text{seg.}^{-1}$; $2,94 \times 10^{-3} \text{cal} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1} \cdot \text{seg.}^{-1}$ e $0,49 \text{cal} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{°C}^{-1}$, respectivamente para a difusividade térmica, condutividade térmica e calor específico médio por unidade de volume.

Com os valores médios mensais das temperaturas máximas e mínimas na profundidade de 20 cm, estimou-se a temperatura média do perfil, a amplitude máxima na superfície do solo e a profundidade de extinção da onda diária de temperatura. Os resultados obtidos mostram que a onda diária de temperatura se extingue a uma profundidade de aproximadamente 50 cm e que a temperatura média mensal do perfil de solo varia entre a máxima de 26,2°C e a mínima de 14,7°C.

2 - INTRODUÇÃO

A temperatura do solo é um dos fatores que controlam o crescimento e o desenvolvimento dos vegetais. Os efeitos biológicos da temperatura tornam-se evidentes, quando se considere que toda forma de vida com sede no solo, dela depende. Assim, a germinação das sementes, o crescimento e o desenvolvimento dos vegetais, a absorção de nutrientes, difusão da água e dos gases, e a atividade da flora microbiana dependem, em grande parte, das condições térmicas do solo.

A influência da temperatura do solo é mais acentuada durante as fases de germinação e crescimento inicial da cultura, quando a camada superficial do solo está sujeita a grandes amplitudes térmicas diárias. A medida que a vegetação cobre a superfície do solo, as amplitudes térmicas diárias diminuem, pois, a cobertura vegetativa atua como uma camada isolante, interceptando uma fração considerável da energia ra-

diante incidente e atuando como anteparo à radiação de onda longa emitida pela superfície do solo.

O regime térmico da camada superior do solo é uma função da densidade de fluxo de energia radiante absorvida na superfície e das suas propriedades térmicas. Estas propriedades são a condutividade térmica, o calor específico e a difusividade térmica.

Sabe-se experimentalmente, que as propriedades térmicas do solo são uma função da sua textura, densidade, porosidade e teor de umidade. Por isto, elas variam de solo para solo e, para um mesmo solo, principalmente com o seu teor de umidade.

No presente trabalho, pretende-se determinar estas propriedades e o comportamento térmico médio mensal do solo Santa Maria que ocupa uma área considerável do município de Santa Maria, RS.

3 - REVISÃO DE LITERATURA

O estudo quantitativo do comportamento térmico do solo é precedido da determinação de suas propriedades térmicas; sendo que duas são fundamentais, isto é, o calor específico e a condutividade térmica, e uma terceira, a difusividade térmica, que é definida a partir das duas primeiras.

3.1 - Calor Específico do Solo

O estudo desta propriedade foi iniciado no século passado, sendo Lang (1878), citado em DECICO (1974), seu principal precursor.

Um dos métodos de laboratório mais utilizado na determinação desta propriedade é o calorímetro de mistura. Entre os inúmeros estudiosos que empregaram essa metodologia,

pode-se citar KERSTEN (1949) , REICHARDT e outros (1965) , DEMATTE (1967) e WIERENGA e outros (1969).

DEMATTE (1967) obteve valores de 0,1885 ; 0,1714; 0,1554 e 0,1695 cal . g⁻¹. °C⁻¹ , respectivamente, para o calor específico médio das séries Bairrinho (argiloso), Iracema (argiloso), Quebra-Dente (arenoso) e Formigueiro (franco-arenoso), do município de Piracicaba, SP. REICHARDT e outros (1965), utilizando amostras superficiais de solos de regiões subtropicais, obtiveram, para diversos solos, valores variando de 0,20 ± 0,01 cal . g⁻¹. °C⁻¹ para o calor específico médio, no intervalo de temperatura de 20 a 100°C.

BOWERS e HANKS (1962) utilizando um calorímetro de radiação, baseado na lei do esfriamento de Newton, encontrou os seguintes resultados para o calor específico dos solos de textura: limo-arenosa 0,22 cal . g⁻¹ . °C⁻¹, argilo-siltosa 0,26 cal . g⁻¹ . °C⁻¹ e argilosa 0,27 cal . g⁻¹ . °C⁻¹ .

Van WIJK (1964 , 1967) propôs um método de contato para a estimativa do calor específico e da condutividade térmica da camada superficial do solo, o qual pode ser utilizado tanto em condições de laboratório como a campo. O método consiste na colocação de um bloco sólido de um material adequado sobre a superfície do solo. Se conhecermos a temperatura inicial do bloco e a do solo, o calor específico e a condutividade térmica do bloco, a variação de temperatura no plano de contato e a variação de temperatura com a profundidade

na camada superficial do solo, pode-se, com o auxílio da solução da equação de condução de calor entre dois corpos semi-infinitos, calcular estas duas propriedades do solo.

SCHNEIDER (1969) utilizando o método de contato em condições de campo, encontrou um valor de $0,23 \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{°C}^{-1}$ para o calor específico de um solo arenoso seco. STIGTER (1969, 1970) analisando o método proposto por Van WIJK (1964, 1967) verificou que algumas hipóteses assumidas não ocorrem em condições de campo e concluiu que resultados precisos somente podem ser obtidos com materiais arenosos secos e sólidos homogêneos em condições de laboratório. Complementando a análise iniciada por STIGTER (1969, 1970), HADAS (1973) verificou que a correção devido ao mau contato solo-bloco não é desprezível quando o método de contato é aplicado para solos, com exceção se a camada superficial for constituída de partículas muito finas, ou se o solo é um péssimo condutor em comparação ao bloco usado.

O calor específico do solo também pode ser determinado se for conhecido o calor específico dos diferentes constituintes do solo e as suas respectivas frações volumétricas. De VRIES (1963), após analisar uma série de determinações de calor específico das frações mineral e orgânica do solo, realizadas por Lang (1878), Ulrich (1894), Bracht (1949), Kersten (1949) e De Vries e Witt (1954), citados em DE VRIES (1963), concluiu que a equação

$$C = 0,46 X_m + 0,60 X_o + X_w \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{°C}^{-1}$$

proporciona uma boa estimativa do calor específico médio do solo. Sendo que X_m , X_o , X_w denotam, respectivamente, as frações volumétricas dos minerais, matéria orgânica e água do solo.

COCHRAN e outros (1967) e DECICO (1974) utilizando a equação proposta por De VRIES (1963) obtiveram os seguintes resultados: $0,15 \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{°C}^{-1}$ para um solo pumice (COCHRAN e outros, 1967) e $0,471 \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{°C}^{-1}$ para o solo Terra Roxa Estruturada, com uma umidade de $0,13 \text{ g}$ de água/g de solo (DECICO, 1974).

WIERENGA e outros (1969), comparando os resultados obtidos por um microcalorímetro e os calculados pela equação de De VRIES (1963), verificaram que a equação subestimou o valor do calor específico de um solo de textura limo-barrenta em torno de 13%. O valor médio para este solo, obtido com o microcalorímetro, foi $0,212 \text{ cal} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$. Entretanto, JANSE e BOREL (1965) e STIGTER (1969) consideram que a equação proposta De VRIES (1963) proporciona resultados com precisão suficiente para a maioria dos propósitos práticos.

3.2 - Condutividade Térmica do Solo

A determinação da condutividade térmica, a partir das condutividades dos constituintes do solo, não é tão sim-

ples como no caso do cálculo do calor específico, pois, além das suas frações volumétricas, a condutividade térmica do solo também depende da forma dos constituintes minerais e da estrutura do solo (De VRIES, 1963).

Um modelo originalmente derivado por Maxwell (1904), segundo De Vries (1952,a), citado por DECICO (1974), para o cálculo da condutividade elétrica de materiais foi usado por este autor para o cálculo da condutividade térmica do solo. Este modelo considera a condutividade térmica, o diâmetro e a forma das partículas, assim como o meio em que elas estão imersas.

Testando-se este modelo em laboratório, obteve-se resultados confiáveis para amostras úmidas de solo (De Vries, 1952,a, citado em DECICO, 1974; WOODSIDE e CLIFFE, 1959; COCHRAN e outros, 1967). Entretanto, para amostras secas foi necessário um fator de correção para alguns solos (De Vries, 1952,a, citado em DECICO, 1974). Segundo De VRIES (1963), a condutividade térmica de solos úmidos pode ser por este modelo com um erro, na maioria das situações, menor do que 10%.

Os demais métodos de determinação desta propriedade podem ser distinguidos em dois grupos: no primeiro grupo a condutividade térmica é determinada sob condições de equilíbrio dinâmico. Ao segundo grupo, pertencem todos os métodos que utilizam o regime de fluxo de calor variável.

Dentre os métodos do primeiro grupo, temos o utilizado por SMITH e BYERS (1938) e SMITH (1939, 1942) na estimativa da condutividade térmica de alguns grupos de solos e as interrelações entre esta propriedade e alguns parâmetros físicos do solo como a porosidade, textura, estrutura e o teor de umidade. Esses autores utilizaram amostras retangulares de solo que eram acondicionadas entre um fluxo central e constante de energia e uma placa de cobre mantida a uma temperatura constante por um sistema de arrefecimento. Após atingir-se o equilíbrio dinâmico e sendo conhecido a densidade de fluxo de calor, medidas de temperatura das faces quente e fria do sistema possibilitaram o cálculo da condutividade térmica. Os valores médios desta propriedade para os solos de textura barrenta e barro-arenosa foram, respectivamente, $0,37$ e $0,42 \times 10^{-3} \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1} \cdot \text{seg}^{-1}$ no estado seco e $1,11$ e $0,85 \times 10^{-3} \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1} \cdot \text{seg}^{-1}$ para amostras no teor de umidade equivalente.

KERSTEN (1949) e DECICO (1974) utilizando um instrumento que proporcionava um fluxo de calor, em equilíbrio dinâmico, determinaram a condutividade térmica de solos de diferentes texturas e a dependência funcional entre as coordenadas umidade e densidade do solo e esta propriedade. Os valores obtidos por DECICO (1967) para as séries Iracema, Luiz de Queiroz e Quebra-Dente no estado seco foram, respectivamente, $0,40$; $0,48$ e $0,52 \times 10^{-3} \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1} \cdot \text{seg}^{-1}$.

Utilizando amostras esféricas de solo, PEREIRA (1973) obteve a condutividade térmica, em equilíbrio dinâmico de quatro grandes grupos de solos do município de Jaboticabal, SP. Os valores desta propriedade no estado seco foram: 0,58; 0,62 ; 0,62 e $0,92 \times 10^{-3} \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1} \cdot \text{seg}^{-1}$, respectivamente, para os solos Latossol Roxo, Latossol Vermelho Escuro (fase arenosa), Latossol Vermelho Amarelo (fase arenosa) e Podzolizados de Lins e Marília.

De VRIES (1952,b) propôs a utilização de um método de fluxo de calor em regime variável para a determinação da condutividade térmica. Este método que foi desenvolvido por Van der HELD e Van DRUNEN (1949) e inicialmente usando na determinação da condutividade térmica de líquidos, é baseado no princípio que "a facilidade com que um corpo de prova, no interior do qual existe uma fonte de energia, sofre variações de temperatura é dependente da condutividade térmica do material com o qual está em contato". Para tal, uma sonda, de diâmetro desprezível, com um elemento de aquecimento e um termômetro situado próximo ao elemento de aquecimento é introduzido no solo.

Entre inúmeros pesquisadores que também utilizaram o método da sonda, pode-se citar: AL NAKSHABANDI e HOHNKE (1965) ; COCHRAN e outros (1967) , WIERENGA e outros (1969), MOENCH e EVANS (1970) e SEPASKHAN e BOERSMA (1979). Os valores obtidos por MOENCH e EVANS (1970) para um solo de textura barro-arenosa variaram de $0,60 \times 10^{-3} \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1} \cdot \text{seg}^{-1}$,

para o solo no estado seco $\bar{\alpha} = 5,95 \times 10^{-3} \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1} \cdot \text{seg}^{-1}$ para o solo saturado, enquanto que SEPASKHAN e BOERSMA (1979) encontraram um valor de $2,25 \times 10^{-3} \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1} \cdot \text{seg}^{-1}$ para os solos de textura barrenta e barro-limo-argilosa, ambos com uma umidade $0,40 \text{ cm}^3$ de água / cm^3 de solo.

FRITTON e outros (1974) e JANSE e BOREL (1965) descrevem modelos simples e práticos de sonda para uso em condições de campo.

Como o método da sonda gera pequenas diferenças de temperatura entre o instrumento e o solo circundante e como o tempo de medida é curto, a influência do movimento da água na determinação da condutividade térmica $\bar{\alpha}$ campo é mínima (STIGTER, 1969).

Entretanto, também existe várias dificuldades na medida da condutividade térmica por este método, principalmente em condições de campo. NAGPAL e BOERSMA (1973) e HADAS (1974) verificaram que o mau contato sonda-solo proporciona resultados falhos. JURY e BELLANTUONI (1976) propõem uma metodologia de correção das leituras do termômetro da sonda, para as variações de temperatura originadas por energia não oriunda da sonda. KASUBUCHI (1977) propõe o uso de duas sondas gêmeas, uma colocada em uma substância de condutividade térmica conhecida e a outra no solo, com o objetivo de eliminar o erro devido a dissipação de parte da energia pelo próprio fio de aquecimento da sonda, que não é utilizada no aquecimento do solo.

A condutividade e a difusividade térmica, e o calor específico da camada superficial do solo podem ser determinados se registrarmos a densidade de fluxo de calor na superfície e as temperaturas em diferentes profundidades nesta camada superficial, causadas pela aplicação de uma onda energética de curta duração e que não penetre além de uma camada de espessura diminuta (Van WIJK e BRUIJN, 1964 ; Van WIJK e DERKSEN, 1966). Esses autores, utilizando as transformadas de Laplace para resolver a equação unidimensional de calor em um meio homogêneo, com condições de contorno adequadas, encontraram valores de 1,25 e $0,93 \times 10^{-3} \text{ cal. cm}^{-1} . \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1} . \text{ seg}^{-1}$, respectivamente, para a condutividade térmica dos solos arenoso e turfoso no estado seco.

3.3 - Difusividade Térmica do Solo

Na determinação da difusividade térmica dos solos tanto em condições de laboratório como à campo, normalmente utiliza-se soluções da equação de condução de calor em um meio homogêneo e infinito, sujeitas à condições de contorno e iniciais adequadas (SINGH e SINHA, 1977).

JACKSON e KIRKHAM (1958) propuseram uma solução da equação de condução de calor na qual assumiu-se que uma onda senoidal periódica de calor é aplicada na superfície do solo que está a uma temperatura inicial uniforme. Com o registro

das temperaturas nas profundidades de interesse, pode-se calcular a difusividade térmica tanto pela equação das amplitudes como pela equação de fase da solução proposta. A difusividade térmica de um solo barro-argiloso, obtida com esta solução, foi $3,0 \times 10^{-3} \text{ cm}^2 \cdot \text{seg}^{-1}$ no intervalo de umidade do solo de 35 a 47%.

Van WIJK e BRUIJN (1964) sugeriram o uso das transformadas de Laplace para solucionar a equação de condução de calor e possibilitar a determinação da difusividade térmica a partir do registro da temperatura nas profundidades de interesse, causadas pela aplicação de uma meia onda quadrática de energia. Van WIJK e DERKSEN (1966), utilizando esta solução, encontraram um valor de $7,9 \times 10^{-3} \text{ cm}^2 \cdot \text{seg}^{-1}$ para a difusividade térmica de um solo arenoso.

HADAS (1968), analisando as duas soluções, verificou que a solução de JACKSON e KIRKHAM (1958) proporciona resultados mais confiáveis que a solução de Van WIJK e BRUIJN (1964). Também observou que se for aplicado uma onda quadrática completa de energia em vez de uma meia onda, a solução de Van WIJK e BRUIJN (1964) proporciona resultados da mesma ordem de grandeza que a de JACKSON e KIRKHAM (1958).

WIERENGA e outros (1969), VIANELLO e outros (1971), DECICO (1974) e RAO e VIANELLO (1977) utilizaram as equações das amplitudes e de fase da solução proposta por JACKSON e KIRKHAM (1958) em condições de campo. RAO e VIANELLO (1977) utili

zando a variação anual da temperatura do solo, obtiveram valores médios de $0,7$ e $1,4 \times 10^{-3} \text{ cm}^2 \cdot \text{seg}^{-1}$, respectivamente, com as equações das amplitudes e de fase, para a difusividade térmica de um solo de Cachoeira Paulista, SP. Enquanto que os demais autores empregando a variação diária da temperatura, encontraram os seguintes resultados, respectivamente, com as equações das amplitudes e de fase: $4,2$ e $5,3 \times 10^{-3} \text{ cm}^2 \cdot \text{seg}^{-1}$ para um solo limo-barrento com uma umidade de $0,20 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ (WIERENGA e outros, 1969); $2,2$ e $4,6 \times 10^{-3} \text{ cm}^2 \cdot \text{seg}^{-1}$ para um solo de Viçosa, MG (VIANELLO e outros, 1971); $4,6$ e $5,0 \times 10^{-3} \text{ cm}^2 \cdot \text{seg}^{-1}$ para a Terra Roxa Estruturada (DECICO, 1974).

DECICO (1974) também verificou que a difusividade térmica do solo estudado sofreu uma variação de apenas 3% no intervalo de umidade de 16 a 30%, cujos extremos correspondem, respectivamente, a umidade na capacidade de campo e no ponto de murcha permanente. Resultados similares foram obtidos por MOENCH e EVANS (1970).

Com o auxílio da técnica de acompanhar a penetração da frente de calor através do método variacional de Kantorovich, PEREIRA (1973) obteve os seguintes valores de difusividade térmica em laboratório: Latossol Roxo $D = 3,1 \times 10^{-3} \text{ cm}^2 \cdot \text{seg}^{-1}$; Latossol Vermelho Escuro (fase arenosa) $D = 3,4 \times 10^{-3} \text{ cm}^2 \cdot \text{seg}^{-1}$; Latossol Vermelho Amarelo (fase arenosa) $D = 3,5 \times 10^{-3} \text{ cm}^2 \cdot \text{seg}^{-1}$; Podzolizados de Lins e Marília $D = 4,1 \times 10^{-3} \text{ cm}^2 \cdot \text{seg}^{-1}$.

3.4 - Comportamento Diário e Anual da Temperatura em um Perfil de Solo

Devido a alternância de períodos de aquecimento e esfriamento na superfície do solo, causada pela presença e ausência da radiação solar, conseqüentemente, teremos períodos alternantes de aquecimento e esfriamento em todas as profundidades, mas com um progressivo decréscimo na amplitude térmica e retardamento do momento das temperaturas extrema (SHAW, 1976).

Analisando-se as observações de temperatura do solo (FLUKER, 1958 ; PEARCE e GOLD, 1959 ; PENROD e outros, 1960; LOPEZ DA COSTA e GODOY, 1962 ; HOLZMANN, 1964 ; VIANELLO e outros, 1971 ; RAO e VIANELLO, 1977), verifica-se que a variação diária e a anual da temperatura segue aproximadamente um movimento periódico amortecido, no qual uma temperatura senoidal amortecida oscila em torno de um valor médio e constante. Porém o aparecimento de fontes de energia que não tem existência definida (ventos, nuvens, etc.) causam desvios da periodicidade, os quais são mais acentuados próximo e na superfície do solo e menos à maiores profundidades para a onda diária de temperatura (DECICO, 1974). Entretanto, se o período experimental for longo, como por exemplo a onda anual da temperatura, essas perturbações transitórias tendem a desaparecer.

LOPEZ DA COSTA e GODOY (1962) analisando a onda diária da temperatura de um solo de Ribeirão Preto, SP, verificaram que o momento de ocorrência das temperaturas máxima e

mínima foi, respectivamente, às 13 e 05 horas para a profundidade de 2 cm e 15:30 e 07:30 horas para a profundidade de 10 cm, e que as amplitudes térmicas diárias nestas respectivas profundidades foram 16,6 e 11,4°C.

RAO e VIANELLO (1977) estudando as temperaturas médias mensais nas profundidades de 5 , 10 e 15 cm de um solo de Cachoeira Paulista, SP, observaram que as temperaturas máxima e mínima, nestas profundidades, ocorreram, respectivamente, nos meses de fevereiro de julho. FLUKER (1958) trabalhando dados de temperatura do solo de uma localidade do Texas, EEUU, verificou que o momento de ocorrência da máxima da onda anual para as profundidades de 90 e 180 cm foi, respectivamente, a 05 e 30 de agosto e que as amplitudes térmicas anuais nestas respectivas profundidades foram 15,6 e 10,5°C. Resultados similares foram obtidos por PENROD e outros (1960) para um local situado a 38°N de latitude.

O comportamento diário e anual da temperatura em um perfil de solo é similar nas diversas regiões do Globo, o que difere são os valores das temperaturas e a profundidade de extinção da onda diária e anual da temperatura, que são uma função do regime de radiação solar e das propriedades térmicas do solo.

A onda diária da temperatura é rapidamente amortecida com a profundidade, e a aproximadamente 40 cm praticamente não existe amplitude térmica diária (MUNN, 1966). RAO

(1975) e DECICO e outros (1976) determinaram as profundidades de extinção da onda diária em diferentes solos e locais: 72 cm foi o maior valor encontrado durante o ano (RAO, 1975); um valor invariável de 60 cm ao longo do ano para um solo da Amazônia a 3°S de latitude (DECICO e outros, 1976).

4 - MATERIAL E MÉTODOS

Os dados utilizados no presente trabalho foram coletados na Estação Climatológica do 8º Distrito de Meteorologia do Ministério da Agricultura, situada no Campus Universitário da Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, na posição de:

Latitude: 29º42'S

Longitude: 53º42'W

Altitude: 95 m

4.1 - Material

4.1.1 - Solo

O solo é classificado como Podzólico Vermelho Amarelo Distrófico de textura franca no horizonte A (primeiros 50 cm de profundidade).

As Tabelas 1 e 2 resumem, respectivamente, as principais características físicas e químicas dos horizontes do solo estudado.

TABELA 1 - Principais características físicas do solo estudado (*)

Horizonte	Profundidade (cm)	Granulometria			Massa específica das partículas g/cm ³	Massa específica do solo g/cm ³	Porosidade Total (%)
		Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)			
A ₁₁	0-9	30	47	23	2,40	1,29	46,2
A ₁₂	9-21	30	45	25	2,45	1,25	49,0
A ₁₃	21-33	28	47	25	2,54	1,18	53,5
A ₃	33-50	22	50	28	2,52	1,13	55,2
B ₁	50-61	27	41	32	2,55	1,28	49,8
B ₂₁	61-83	19	36	45	2,54	1,33	47,6
B ₂₂	83-112	22	26	52	2,53	1,31	48,2
B ₃	112-134	16	36	48	2,63	1,35	48,7
Cg	134-157	11	41	48	2,63	1,36	48,3

(*) Estas análises foram realizadas pelo Laboratório de Física de Solos da UFSM.

TABELA 2 - Principais características químicas do solo estudado (*)

Horizonte	Profundidade (cm)	e. mg / 100 g de solo				Matéria Orgânica (%)	pH água
		Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Al ⁺⁺⁺		
A ₁₁	0- 9	2,70	1,80	0,12	3,48	4,1	4,5
A ₁₂	9-21	1,39	0,21	0,07	4,02	3,2	4,3
A ₁₃	21-33	1,13	0,63	0,04	4,32	2,7	4,6
A ₃	33-50	0,86	0,69	0,03	4,63	1,8	4,6
B ₁	50-61	0,72	0,58	0,03	5,10	1,3	4,7
B ₂₁	61-83	1,23	0,11	0,02	6,43	1,2	4,6
B ₂₂	83-112	0,79	0,25	0,04	6,44	1,0	5,0
B ₃	112-134	1,29	0,75	0,04	6,52	0,7	4,9
Cg	134-157	4,14	3,17	0,08	9,71	0,5	4,7

(*) Estas análises foram realizadas pelo Laboratório de Física de Solos da UFSM.

4.1.2 - Geotermômetros

As temperaturas do solo foram obtidas com geotermômetros de mercúrio em vidro de fabricação "Fuess", com escala graduada em graus Celsius e com divisão de 0,2°C, instalados nas profundidades de 2 , 5 , 10 , 20 e 30 cm.

4.1.3 - Cobertura

Uma bateria de geotermômetros recebeu uma cobertura de matéria seca, espessura aproximada de 4 cm, de material proveniente do corte de grama batataís (*Paspalum notatum* L.).

4.1.4 - Dados de temperatura do solo

Foram utilizados os valores de temperatura na profundidade de 20 cm da parcela desnuda, dos horários 12:00 e 24:00 GMT do período de 01 de janeiro de 1972 a 31 de dezembro de 1978, para o cálculo da temperatura média mensal do perfil do solo.

4.2 - Métodos

4.2.1 - Medida da temperatura do solo

Para a medida das temperaturas, utilizou-se os geotermômetros já instalados na Estação Climatológica. Estas medidas foram realizadas com aproximação visual de 0,1°C, em intervalos de 30 minutos na parcela desnuda e de 60 minutos na parcela com cobertura morta, durante períodos de 24 horas com início às 06 horas da manhã, em dias completamente limpos.

4.2.2 - Cálculo da temperatura do solo

A equação diferencial da temperatura (T) em função da profundidade (z) e do tempo (t) para um solo homogêneo, inerte e isotrópico é a seguinte:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{K}{C} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (4.2.1)$$

onde:

K = condutividade térmica do solo ($\text{cal} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1} \cdot \text{seg}^{-1}$)

C = calor específico por unidade de volume do solo ($\text{cal} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{°C}^{-1}$)

O quociente K/C define uma outra propriedade, denominada de difusividade térmica do solo (D), e a equação 4.2.1 passa a ser reescrita como segue:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = D \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (4.2.2)$$

A equação 4.2.2 é a equação diferencial de $T(z, t)$ a que deve obedecer toda e qualquer possível variação de temperatura causada por um fluxo unidirecional (dizeção z) de calor num meio homogêneo e isotrópico. Ela, matematicamente, estabelece que a temperatura, em qualquer instante $t > 0$ e a qualquer profundidade z no perfil do solo limitado pelos planos horizontais z_i e z_j , fica completamente determinada quando forem dadas as condições de contorno e inicial.

Desde que o movimento terra-sol é periódico, a temperatura na superfície do solo deve obedecer uma função periódica com intervalos intercalados de absorção e emissão de calor. De tal forma que:

$$T(0, t) = \bar{T} + T_0 \text{ sen } Wt \quad (4.2.3)$$

onde:

W = velocidade angular da terra;

\bar{T} = temperatura média da superfície do solo;

T_0 = amplitude máxima da variação de temperatura em $Z = 0$.

A outra condição de contorno é que para $Z = \infty$, $T = \bar{T}$, que se escreve:

$$T(\infty, t) = \bar{T} \quad (4.2.4)$$

Evidentemente a temperatura na superfície do solo deve ser conhecida na origem dos tempos, portanto:

$$T(0, 0) = \bar{T} \quad (4.2.5)$$

A solução clássica da equação diferencial (4.2.2) que satisfaz as condições de contorno (4.2.3) e (4.2.4) e a inicial (4.2.5), é:

$$T(z, t) = \bar{T} + T_0 \exp \left[- \left(\frac{W}{2D} \right)^{1/2} \cdot z \right] \text{ sen } \left[Wt - \left(\frac{W}{2D} \right)^{1/2} \cdot z \right] \quad (4.2.6)$$

Com o objetivo de minimizar os efeitos das perturbações transitórias, ocasionadas pelo aparecimento de fontes de

energia que não tem existência definida (ventos, nuvens, etc), deve-se tomar a temperatura média (\bar{T}), não na superfície, mas a média do perfil ($\bar{T}(z)$). Então, a expressão (4.2.6) passa a ser reescrita como:

$$T(z, t) = \bar{T}(z) + T_0 \exp \left[- \left(\frac{W}{2D} \right)^{1/2} \cdot z \right] \sin \left[\left(Wt - \left(\frac{W}{2D} \right)^{1/2} \cdot z \right) \right] \quad (4.2.7)$$

onde:

$\bar{T}(z)$ = \bar{e} a temperatura média do perfil.

A equação 4.2.7 foi utilizada no presente trabalho, sendo que como T_0 foi considerado a amplitude máxima na profundidade de 2 cm.

4.2.3 - Estimativa da difusividade térmica

Um método bastante simples para se obter informações a respeito das propriedades térmicas de um sistema, é através da velocidade de propagação das ondas de calor ou de temperatura.

A velocidade de uma onda qualquer é definida como:

$$v = \lambda \cdot f \quad (4.2.8)$$

Para o tipo de onda que estamos tratando

$$v = \frac{\lambda W}{2\pi} \quad (4.2.9)$$

onde:

v = velocidade de propagação da onda;

λ = comprimento de onda;

f = frequência do movimento;

W = frequência angular do movimento.

O comprimento de onda λ , definido como a distância entre dois máximos adjacentes, pode ser obtido do argumento do seno da equação (4.2.7)

$$\Delta \left[Wt - \left(\frac{W}{2D} \right)^{1/2} \cdot z \right] = \left[\frac{W}{2D} \right]^{1/2} \Delta z = \left[\frac{W}{2D} \right]^{1/2} \lambda = 2\pi \quad (4.2.10)$$

de maneira que:

$$\lambda = \frac{2\pi}{\left[\frac{W}{2D} \right]^{1/2}} \quad (4.2.11)$$

De (4.2.9) e (4.2.11), obtemos

$$D = \frac{1}{2W} \cdot \left[\frac{\Delta z}{\Delta t} \right]^2 \quad (4.2.12)$$

onde:

Δz = diferença entre duas profundidades z_i e z_j ,

Δt = intervalo de tempo decorrido entre as passagens de máximo da onda considerada pelas duas profundidades, respectivamente.

Um outro método de determinação da difusividade térmica baseia-se na variação da amplitude máxima da onda de temperatura.

Na equação 4.2.7 a variação da amplitude máxima da onda de temperatura com a profundidade, é dada por:

$$T(z, t)_{\max} - \bar{T}(z) = T_0 \exp(-z/\sigma) \quad (4.2.13)$$

onde:

$$\sigma = \left(\frac{2D}{W} \right)^{1/2} \quad \text{é definido como fator de amortecimento da onda e, portanto:}$$

$$D = W/2 \cdot \sigma^2 \quad (4.2.14)$$

O fator de amortecimento (σ) de uma onda, numa camada de solo limitada pelos planos z_i e z_j , pode ser obtido por:

$$T_{\max_i} - \bar{T}(z_i) = T_0 \exp(-z_i/\sigma) \quad (4.2.15)$$

$$T_{\max_j} - \bar{T}(z_j) = T_0 \exp(-z_j/\sigma) \quad (4.2.16)$$

e portanto,

$$\sigma = \frac{z_j - z_i}{\ln \left[\frac{\Delta T_i}{\Delta T_j} \right]} \quad (4.2.17)$$

sendo que

$$\Delta T_i = T_{\max_i} - \bar{T}(z_i)$$

$$\Delta T_j = T_{\max_j} - \bar{T}(z_j)$$

Substituindo (4.2.17) na expressão (4.2.14), temos:

$$D = \frac{W}{2} \left[\frac{z_j - z_i}{\ln \left(\frac{\Delta T_i}{\Delta T_j} \right)} \right]^2 \quad (4.2.18)$$

Essas duas equações foram empregados na estimativa da difusividade térmica.

4.2.4 - Estimativa do calor específico por unidade de volume

Para a estimativa desta propriedade, utilizou-se a equação proposta por De VRIES (1963), a qual é:

$$C = 0,46 X_m + 0,60 X_O + X_W \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{C}^{-1} \quad (4.2.19)$$

onde:

X_m , X_O e X_W denotam, respectivamente, as frações volumétrica dos minerais, matéria orgânica e água.

4.2.5 - Estimativa da condutividade térmica

Uma vez estimada a difusividade térmica (D), a partir das equações (4.2.12) e (4.2.18) e o calor específico por unidade de volume pela equação (4.2.19), a condutividade térmica pode ser obtida a partir da relação de definição da difusividade térmica:

$$K = D \cdot C \quad (4.2.20)$$

Esta relação foi utilizada para estimar a condutividade térmica do solo.

4.2.6 - Estimativa da temperatura média mensal de solo nu

Analisando-se a variação diária da temperatura do solo em dias distintos do ano, verificou-se que as leituras das 12:00 e 24:00 GMT, as quais são realmente realizadas às 8:30 e 20:30 horas, representam, respectivamente, os valores das temperaturas mínima e máxima na profundidade de 20 cm. A variação diária da temperatura na profundidade de 20 cm de dois dias, obtida experimentalmente, é apresentada na Figura 1.

Levando em consideração esta observação, propôs-se a equação

$$\bar{T}(Z_{20}) = \frac{\bar{T}_{\max 20} + \bar{T}_{\min 20}}{2}$$

para a estimativa da temperatura média mensal naquela oportunidade, onde:

$\bar{T}_{\max 20}$ e $\bar{T}_{\min 20}$ representam, respectivamente, as temperaturas médias mensais das máximas e das mínimas na profundidade de 20 cm.

As temperaturas médias mensais das máximas e das mínimas foram obtidas pela média aritmética dos valores.

Como a temperatura média do perfil é aproximadamente constante com a profundidade, conseqüentemente, a média de qualquer profundidade é representativa da média do perfil. Por isto, neste trabalho considerou-se que a temperatura média na profundidade de 20 cm seja a média do perfil de solo.

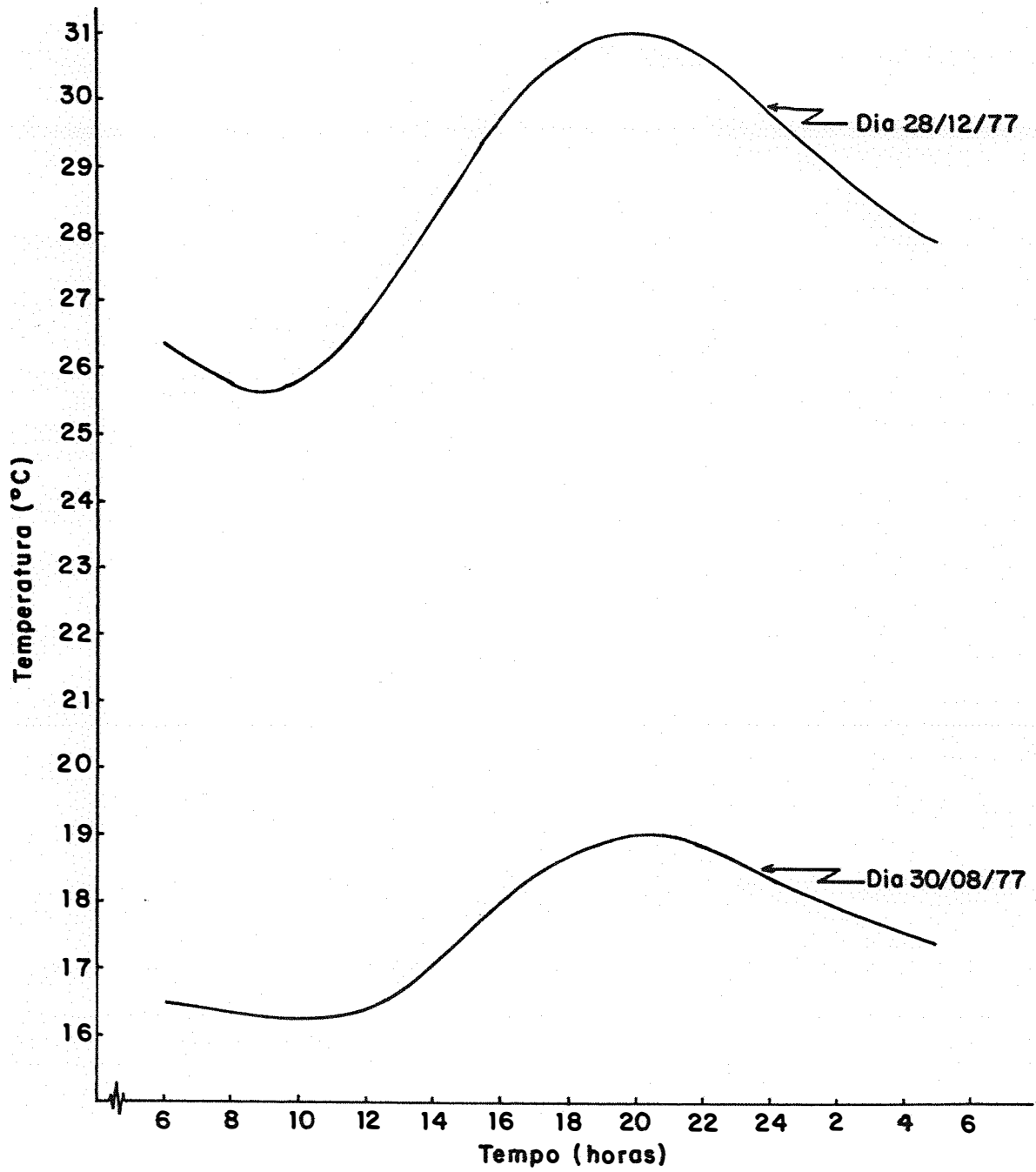


Figura 1 - Variação diária da temperatura na profundidade de 20 cm para o solo nu

4.2.7 - Estimativa da amplitude máxima média mensal (T_0) em $Z = 0$

A estimativa de T_0 em $Z = 0$ foi obtida através da equação das amplitudes, a qual é proveniente da equação 4.2.7 da seguinte forma:

$$T_{0 \ z \neq 0} = T_0 \exp^{-z \left(\frac{W}{2D}\right)^{1/2}} \quad (4.2.21)$$

onde:

$T_{0 \ z \neq 0}$ = amplitude máxima da onda de temperatura em uma profundidade diferente de zero,

e portanto

$$T_0 = T_{0 \ z \neq 0} \cdot \exp^{z \left(\frac{W}{2D}\right)^{1/2}} \quad (4.2.22)$$

No presente trabalho, utilizou-se a amplitude máxima da onda diária de temperatura na profundidade de 20 cm, conseqüentemente, a equação (4.2.22) pode ser reescrita como:

$$T_0 = T_{0 \ z = 20} \cdot \exp^{20 \left(\frac{W}{2D}\right)^{1/2}} \quad (4.2.23)$$

4.2.8 - Estimativa da profundidade média mensal de extinção para as ondas diárias de temperatura

A estimativa da profundidade de extinção da onda diária de temperatura, ou seja, onde a amplitude diária não excede $0,19^\circ\text{C}$ à temperatura média do perfil, foi obtida com a e-

quação (4.2.7) e com os dados de amplitude máxima diária da onda de temperatura na profundidade de 20 cm. Assim, resolvendo-se a equação (4.2.7) em termos de profundidade (z) para um ponto de máxima e corrigindo-se a equação para Z a partir da superfície do solo, tem-se:

$$Z = \left[\left(\frac{W}{2D} \right)^{1/2} \cdot \ln \left(\frac{T_{020}}{T_{\text{máx}} - \bar{T}(z)} \right) \right] + 20 \text{ cm} \quad (4.2.24)$$

onde:

T_{020} = amplitude máxima diária na profundidade de 20 cm;

z = profundidade na qual a amplitude máxima diária não exceda em 0,19°C à temperatura média do perfil

$\bar{T}(z)$ = temperatura média do perfil.

Na estimativa da profundidade de extinção da onda diária, utilizou-se, as temperaturas e as amplitudes máximas médias mensais na profundidade de 20 cm do solo nu.

4.2.9 - Umidade do solo

Os perfis de umidade até 35 cm foram obtidos pela média de dois perfis, um no início e outro no final de cada período de medida. Extraiu-se duas amostras de cada parcela, de 10 em 10 cm de profundidade após os 5 cm iniciais, com um tubo de aço inoxidável de 1 polegada de diâmetro. As amostras

foram secas em estufa a 105°C e pesadas em balança com sensibilidade de 0,01 g. A umidade foi expressa em porcentagem de peso seco de solo.

5 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 - Difusividade Térmica

Os valores medidos de temperatura do solo encontram-se nas Tabelas 1 e 2 - Apêndice.

Os dados de temperatura do solo não foram obtidos de forma contínua. Para estimar os valores mais prováveis dos máximos de temperatura, traçaram-se curvas médias de temperatura do solo versus tempo e pelo supostos pontos de máximo passaram-se tangentes; os prolongamentos dessas linhas ao cortarem o eixo das ordenadas forneceram os valores dos máximos de temperatura; ainda pelos mesmos pontos de tangências, baixaram-se perpendiculares que, ao cortarem o eixo das abcissas, forneceram os tempos de suas ocorrências. Um exemplo do processo é dado na Figura 2 .

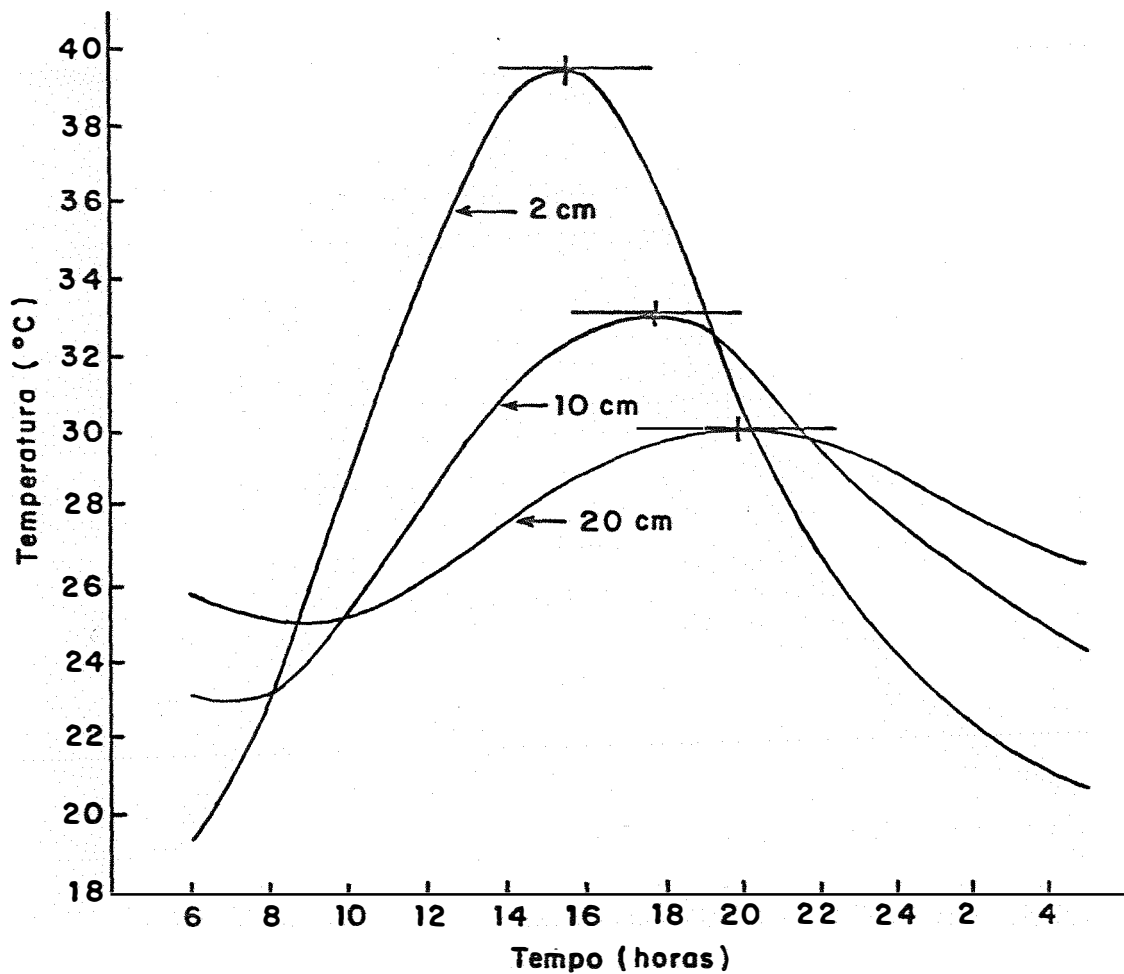


Figura 2 - Estimativa dos valores máximos e os tempos de suas ocorrências

A Figura 2 foi traçada com os valores de temperatura do solo nu, do dia 28/12/1979, tomado ao acaso.

Os dados obtidos nesses processos, que foram utilizados nas estimativas das difusividades térmicas com as equações (4.2.12) e (4.2.18), encontram-se na Tabela 3.

TABELA 3 - Amplitudes máximas $\Delta T(^{\circ}C)$, tempos de ocorrência t (horas e décimos) e profundidades Prof. (cm)

Data	Profundidade	Solo nu		Solo Cobertura morta	
		ΔT	t	ΔT	t
27/12	2	10,90	15,5	3,60	15,8
	5	9,10	16,2	2,35	17,0
	10	5,10	17,8	1,45	18,5
	20	2,50	19,8	0,85	20,5
	30	1,20	23,0	0,35	--
28/12	2	10,90	15,5	3,80	15,5
	5	8,90	16,4	2,30	17,0
	10	5,20	17,8	1,50	18,5
	20	2,50	19,8	0,90	21,2
	30	1,30	323,2	0,40	--

A difusividade térmica foi calculada a partir dos coeficientes angulares das curvas de logarítmos das amplitudes máximas e dos momentos de ocorrência das temperaturas máximas versus suas respectivas profundidades, de acordo com as equações (4.2.12) e (4.2.18). Estas curvas e os valores de difusividade térmica encontram-se nas Figuras de 3 a 10.

Os valores de difusividade térmica obtidos a partir dos coeficientes angulares das curvas das Figuras 3 a 10, encontram-se na Tabela 4.

TABELA 4 - Valores de difusividade térmica estimados com as expressões (4.2.12) e (4.2.18)

Data	Solo nu		Solo cobertura morta	
	Eq.(4.2.18)	Eq.(4.2.12)	Eq. (4.2.18)	Eq. (4.2.12)
27/12	$5,7 \times 10^{-3}$	$7,7 \times 10^{-3}$	$5,8 \times 10^{-3}$	$7,9 \times 10^{-3}$
28/12	$6,0 \times 10^{-3}$	$7,3 \times 10^{-3}$	$6,3 \times 10^{-3}$	$5,5 \times 10^{-3}$

Analisando-se os valores de difusividade térmica da Tabela 4, verifica-se que os valores médios obtidos pelas equações (4.2.18) e (4.2.12) são respectivamente,

$$(6,0 \pm 0,3) \times 10^{-3} \text{ cm}^2 \cdot \text{seg}^{-1} \quad \text{e} \quad (7,1 \pm 1,3) \times 10^{-3} \text{ cm}^2 \cdot \text{seg}^{-1} .$$

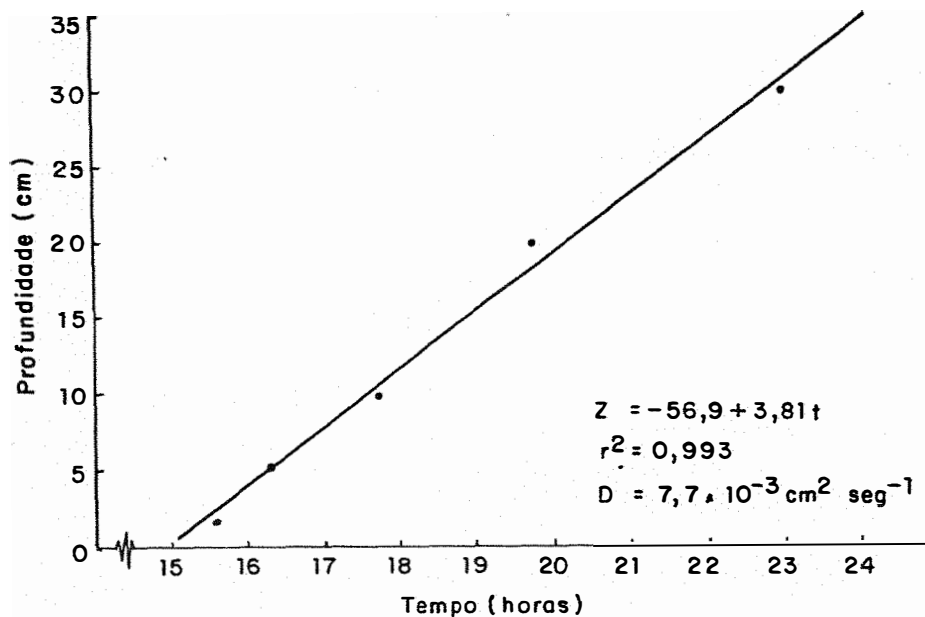


Figura 3 - Gráfico dos tempos de ocorrência das temperaturas máximas versus suas respectivas profundidades, para o solo nu no dia 27/12/1979

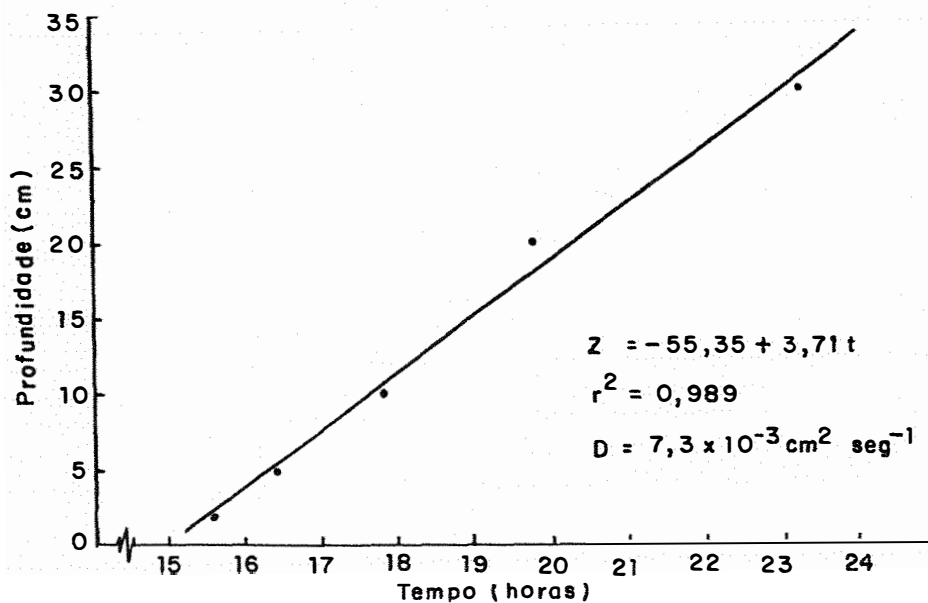


Figura 4 - Gráfico dos tempos de ocorrência das temperaturas máximas versus suas respectivas profundidades, para o solo nu no dia 28/12/1979

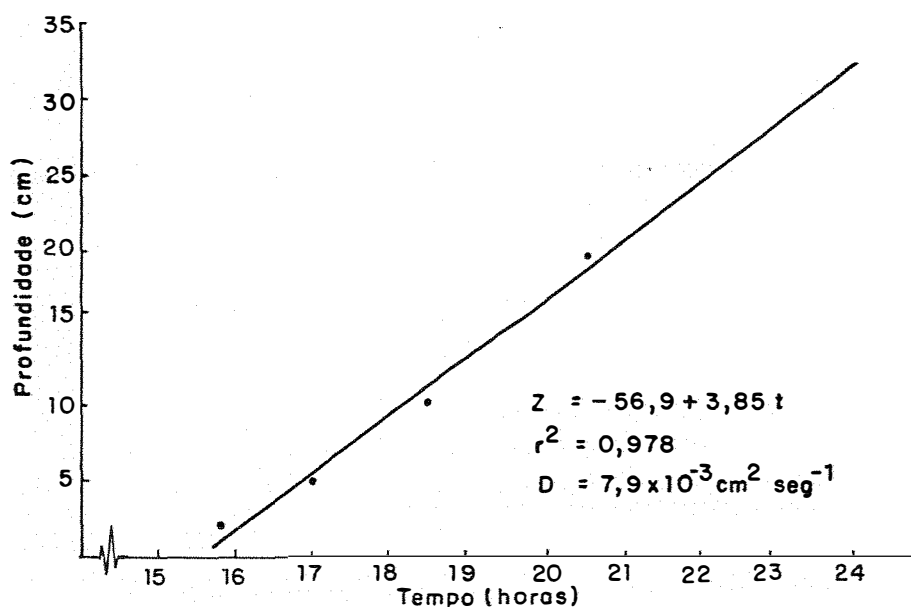


Figura 5 - Gráfico dos tempos de ocorrência das temperaturas máximas versus suas respectivas profundidades, para o solo com cobertura morta no dia 27/12/1979

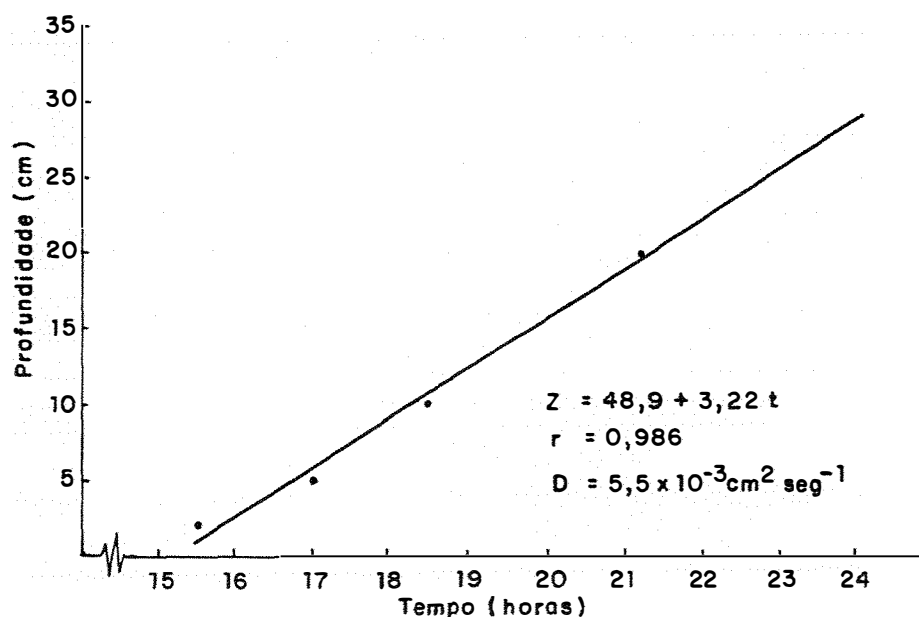


Figura 6 - Gráfico dos tempos de ocorrência das temperaturas máximas versus suas respectivas profundidades, para o solo com cobertura morta no dia 28/12/1979

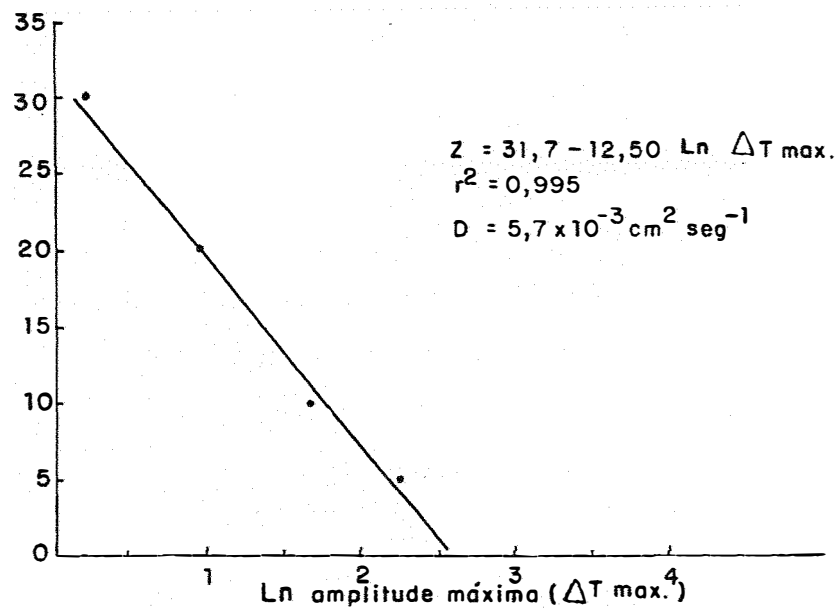


Figura 7 - Gráfico de logarítmos das amplitudes máximas versus suas respectivas profundidades. Solo nu. Dia 27/12/1979

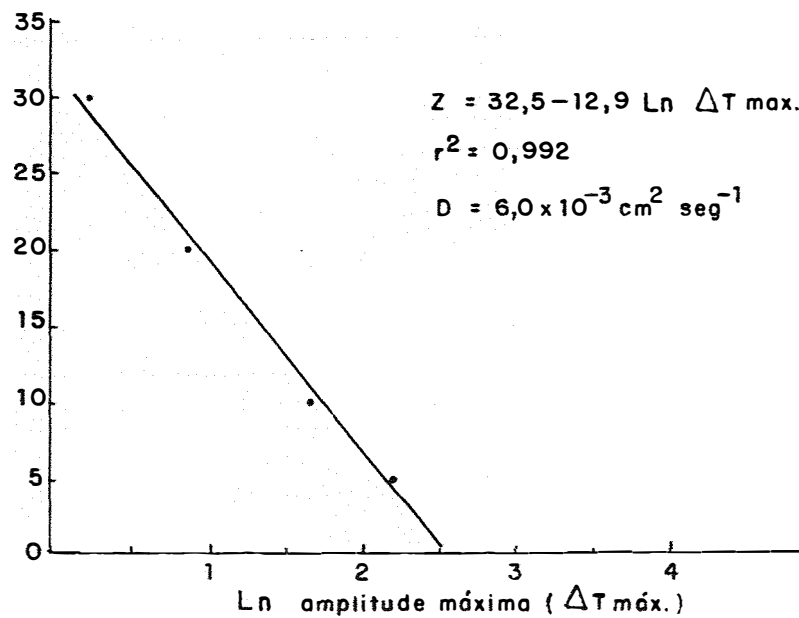


Figura 8 - Gráfico de logarítmos das amplitudes máximas versus suas respectivas profundidades. Solo nu. Dia 28/12/1979

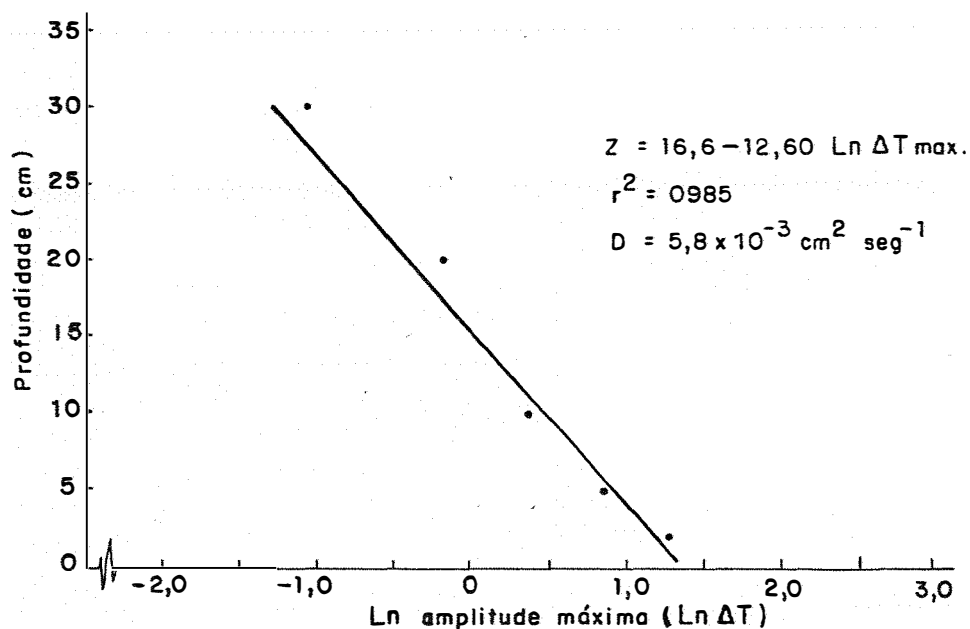


Figura 9 - Gráfico de logaritmos das amplitudes máximas versus suas respectivas profundidades. Solo com cobertura morta. Dia 27/12/1979

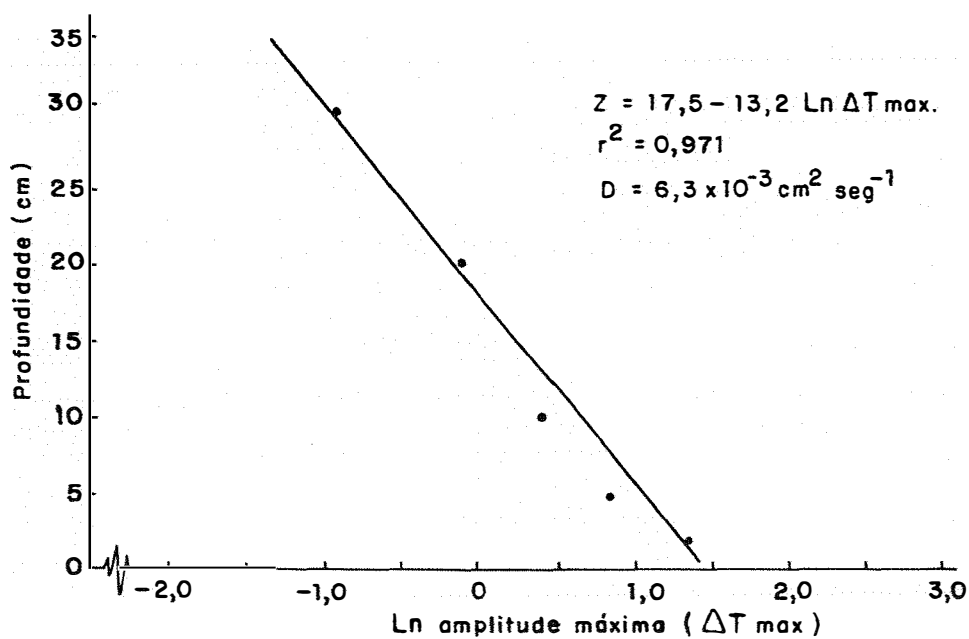


Figura 10 - Gráfico de logaritmos das amplitudes máximas versus suas respectivas profundidades. Solo com cobertura morta. Dia 28/12/1979

Essa tendência da equação (4.2.12) proporcionar valores levemente superiores aos da equação (4.2.18), também foi observada nos resultados obtidos por WIERENGA e outros (1969) , VIANELLO e outros (1971) , RAO e VIANELLO (1977).

Entretanto, considerando que a teoria clássica da condução de calor mostra que os resultados obtidos pelas equações das amplitudes e de fase devem ser idênticos e que os perfis de umidade, de acordo com a Tabela 5 , nas duas parcelas e nos diferentes dias não diferem significativamente entre si, a dispersão observada, principalmente, nos valores obtidos com a equação (4.2.12), provavelmente é devida a erros na determinação gráfica dos tempos de ocorrência das temperaturas máximas. Pois, como a variação da temperatura, em torno do momento de ocorrência das temperaturas extremas, é mínima em profundidades maiores que 10 cm e como os geotermômetros não são sensíveis a essa variação, verificou-se que as leituras das temperaturas eram idênticas durante períodos de até 3 horas, como na profundidade de 30 cm da parcela com cobertura morta. Em consequência, erros de 0,5 ; 0,6 a 1,0 hora na estimativa do tempo de ocorrência das temperaturas máximas podem ter sido cometidos.

Na tentativa de estimar a magnitude destes erros na determinação da difusividade térmica com a equação (4.2.12) , tomou-se um valor arbitrário de $\Delta Z = 34,5$ cm e $\Delta t = 9,1$ horas. Verificou-se que para $\Delta t = 9,1 \pm 0,6$ horas, encontrou

se uma variação de 30% entre os valores de difusividade detidos com $\Delta t = 9,7$ e $\Delta t = 8,5$ horas. Em função disto e tendo em vista que a possibilidade de erro na estimativa do valor da temperatura máxima é bem menor, o que é evidenciado pela Figura 2, infere-se que o uso da equação (4.2.18) na estimativa da difusividade térmica, nestas condições, é mais aconselhável.

TABELA 5 - Valores médios de umidade do solo, expressos em porcentagem de peso de solo seco

Profundidade (cm)	Solo nu		Solo cobertura morta	
	12/12/77	28/12/77	27/12/77	28/12/77
0 - 5	15,0	16,2	18,8	21,4
5 - 15	21,4	22,5	23,2	23,0
15 - 25	24,7	24,0	24,1	23,4
25 - 35	24,5	23,9	23,1	23,0
Valor médio	21,4	21,7	22,3	22,7

A determinação da difusividade térmica só adquire significado do ponto de vista agrícola, quando ela pode ser utilizada para estimar, a partir de um modelo pré-estabelecido, o comportamento da temperatura no perfil do solo em condições de campo. Desta forma, o confronto entre os dados de tempera

tura estimados e os medidos, constitui-se do processo mais adequado para verificar a viabilidade dos valores obtidos.

Utilizando-se a equação (4.2.7) e os dados de $\bar{T}(z)$ e T_0 obtidos no dia 28/12/77 para as duas parcelas, verificou-se que obteve-se uma melhor concordância entre os valores medidos e os estimados, quando se utilizou do valor de $6,0 \times 10^{-3} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{seg}^{-1}$ para a difusividade.

Os valores estimados com a equação (4.2.7) e o obtidos experimentalmente, encontram-se nas Tabelas 1 a 3 - Apêndice.

A Figura 11 representa graficamente o comportamento estimado e observado da temperatura nas diferentes profundidades no perfil do solo nu para o dia 28/12/1979.

Analisando-se a Figura 11, verifica-se que para as profundidades de 2 e 5 cm, há uma excelente concordância entre os valores estimados e os esperados, principalmente no intervalo das 06 as 22 horas ; sendo que as pequenas discrepâncias observadas provavelmente são bem menores que os erros experimentais.

Entretanto, para as profundidades de 10 e 20 cm, observa-se uma diferença praticamente constante, durante a maior parte do período, entre os valores estimados e os medidos. Isto provavelmente se deve ao fato da temperatura média nessas duas profundidades, ser distinta da média do perfil, o que origina uma variação dos valores calculados similar a medida, mas, distanciada de um determinado valor.

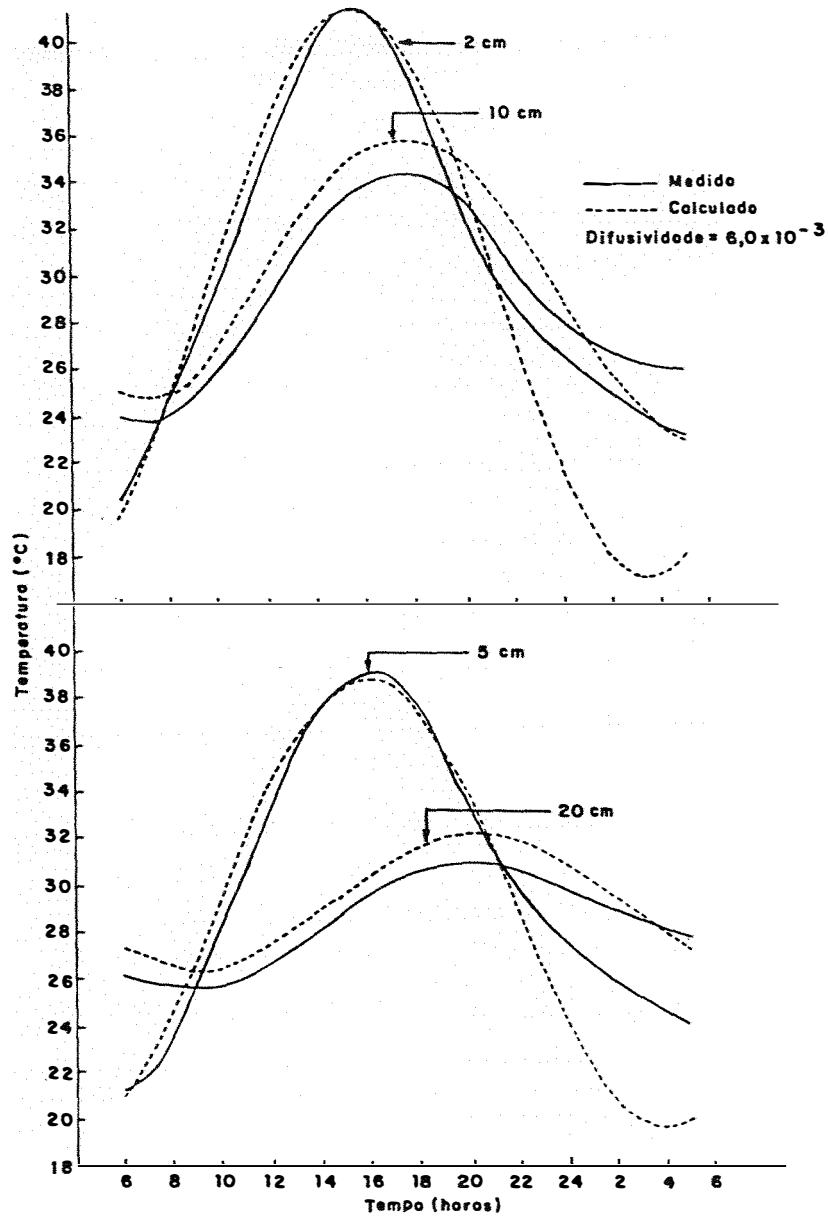


Figura 11 - Variação da temperatura do solo medida e estimada em diferentes profundidades. Solo nu. Dia 28/12/79.

Com o objetivo de verificar se uma parte da discrepância entre os valores calculados e os estimados para as profundidades de 10 e 20 cm é devida a diferença entre a média do perfil e as médias de cada profundidade, calculou-se $T(z, t)$ com a equação (4.2.7), substituindo-se o valor médio do perfil pela média da respectiva profundidade. Os valores obtidos estão na Tabela 4, no Apêndice.

A Figura 12 está representando o comportamento estimado e o observado da temperatura nas diferentes profundidades no perfil do solo nu para o dia 28/12/77.

A tabulação dos valores revelou que há uma excelente concordância entre os dados estimados e os observados em todas as profundidades, indicando que o comportamento térmico no perfil pode ser descrito pela equação (4.2.7) desde que a temperatura média seja aproximadamente constante com a profundidade.

Apesar do valor de $6,0 \times 10^{-3} \text{ cm}^2 \cdot \text{seg}^{-1}$ da difusividade ter se apresentado como melhor, vale a pena investigar melhor a significância deste termo. Para isto utilizaremos a equação das amplitudes, que é oriunda da equação (4.2.7):

$$(T_{\text{max}} - \bar{T}(z)) = \phi = T_0 \exp - \left(\frac{W}{2D} \right)^{1/2} z \quad (5.1)$$

onde

ϕ = amplitude máxima da onda de temperatura numa profundidade z obtida com uma difusividade térmica D .

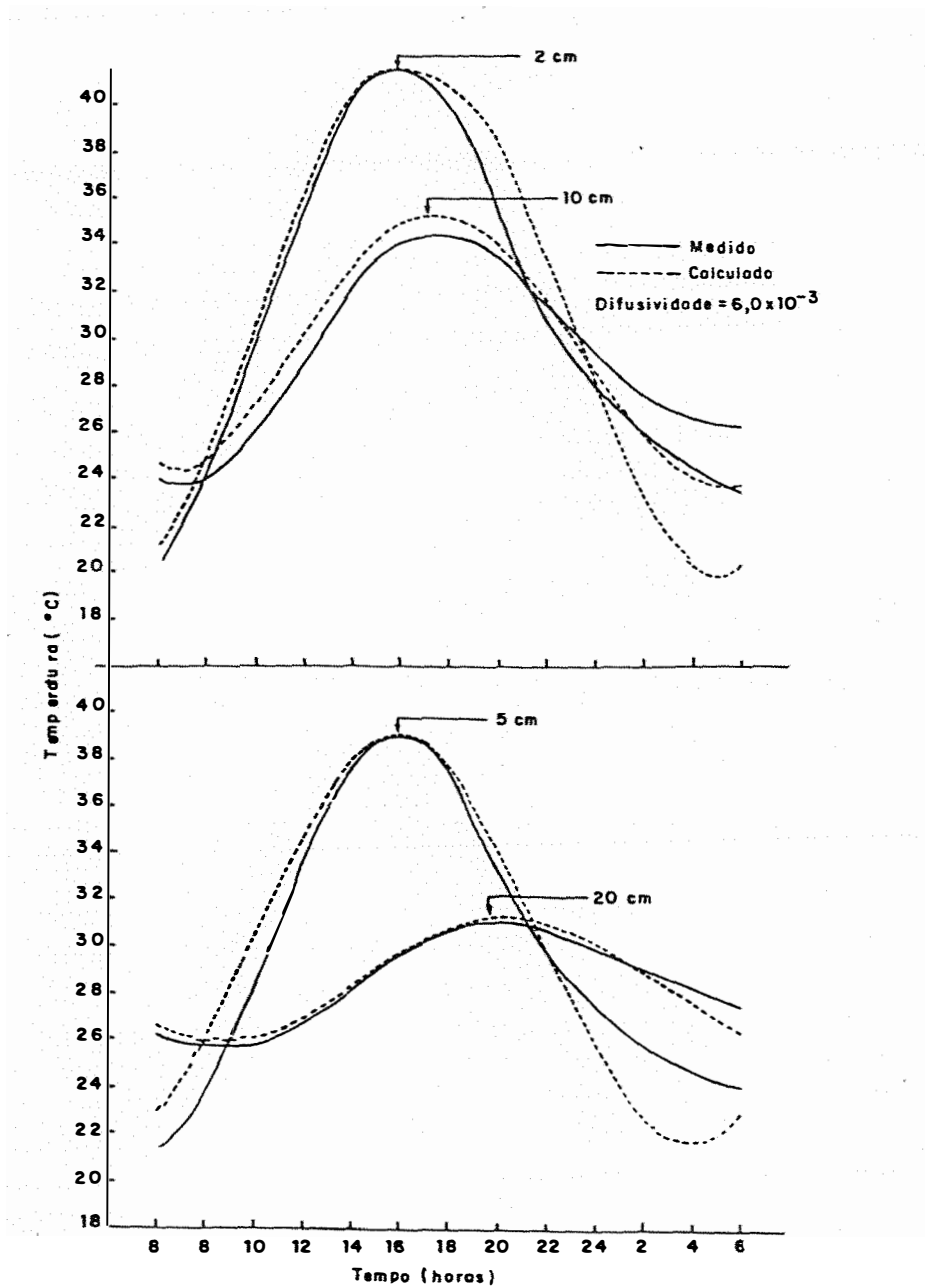


Figura 12 - Variação da temperatura do solo medida e estimada em diferentes profundidades. Solo nu. Dia 28/12/1977.

Para um determinado acréscimo da difusividade térmica, mantendo a profundidade z constante, teremos um acréscimo para a amplitude, tal como

$$\Delta\phi = (W/8)^{1/2} \cdot \frac{\Delta D}{D^{3/2}} \cdot z \cdot T_0 \exp^{-\left(\frac{W}{2D}\right)^{1/2} z} \quad (5.2)$$

A variação máxima da amplitude, quando a difusividade térmica recebe um acréscimo, se dá na profundidade z^* igual a:

$$\frac{d(\Delta\phi)}{dz} = (W/8)^{1/2} \cdot \frac{\Delta D}{D^{3/2}} \cdot T_0 \exp^{-\left(\frac{W}{2D}\right)^{1/2} z} \left[1 - \left(\frac{W}{2D}\right)^{1/2} z \right] = 0$$

e, portanto,

$$z^* = \frac{1}{\left(\frac{W}{2D}\right)^{1/2}} = \sigma \quad (5.3)$$

De modo que a equação (5.2) pode ser escrita como:

$$\Delta\phi_{\max} = (W/8)^{1/2} \cdot \frac{\Delta D}{D^{3/2}} \cdot \sigma \cdot \phi \quad (5.4)$$

Lembrando da equação (4.2.7) que para $z = \sigma$, $\phi = 0,34 T_0$, a equação (5.4) torna-se:

$$\Delta\phi_{\max} = 0,34 (W/8)^{1/2} \cdot \frac{\Delta D}{D^{3/2}} \cdot \sigma \cdot T_0 \quad (5.5)$$

Para a nossa situação particular extrema, que

$$\Delta D = (7,9 - 5,5) \times 10^{-3} = 2,4 \times 10^{-3} \text{ cm}^2 \cdot \text{seg}^{-1}$$

$$D = 6,0 \times 10^{-3} \text{ cm}^2 \cdot \text{seg}^{-1}$$

$$\sigma = 12,8 \text{ cm}$$

a estimativa de $\Delta\phi_{\max}$ é:

$$\Delta\phi_{\max} = 6,7\% T_0$$

o que para condições de campo, é uma variação desprezível.

Infere-se, portanto, que se o objetivo da determinação da difusividade é a estimativa da amplitude máxima em qualquer profundidade, tanto a equação (4.2.12) como a (4.2.18) pode ser utilizada.

5.2 - Calor Específico Médio

De acordo com as Tabelas 1 e 2, o solo estudado tem uma porosidade de 51%, 3% de matéria orgânica e uma massa específica das partículas de $2,48 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, no horizonte A. Utilizando-se estes valores, calculou-se, com a equação (4.2.19) o calor específico médio por unidade de volume para diferentes teores de umidade. Os valores obtidos encontram-se na Tabela 6.

TABELA 6 - Calor específico médio do solo em
 $\text{cal} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{QC}^{-1}$

Teor de umidade (porcentagem em peso seco de solo)	Calor específico médio
0,0	0,23
21,6	0,48
22,5	0,50

Além dos teores médios de umidade do solo dos dias de medida, calculou-se o calor específico médio para o solo no estado seco, cujo valor somente depende das frações volumétricas dos minerais e matéria orgânica do solo.

5.3 - Condutividade Térmica

Com os valores de calor específico médio calculados com a equação (4.2.19) e os valores médios de difusividade térmica determinados com o auxílio das equações (4.2.12) e (4.2.18), estimou-se a condutividade térmica através da relação (4.2.20). Os valores obtidos com esta relação, encontram-se na Tabela 7.

TABELA 7 - Valores de condutividade térmica expressos
em $\text{cal} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1} \cdot \text{seg}^{-1}$

Difusividade (\bar{D})	$6,00 \times 10^{-3}$	$7,10 \times 10^{-3}$
Calor específico médio (\bar{C})		
0,48	$2,88 \times 10^{-3}$	$3,41 \times 10^{-3}$
0,50	$3,00 \times 10^{-3}$	$3,55 \times 10^{-3}$

A equação (4.2.19) fornece valores confiáveis de calor específico médio do solo (JANSE e BOREL, 1965 ; STIGTER, 1969). Ao substituir-se os valores de difusividade térmica na equação (4.2.7), obteve-se excelente concordância entre os valores medidos e os calculados, com o valor de difusividade igual a $6,0 \times 10^{-3} \text{ cm}^2 \cdot \text{seg}^{-1}$. Infere-se, portanto, que os valores de condutividade térmica, estimados com a relação (4.2.20) e $D = 6,0 \times 10^{-3} \text{ cm}^2 \cdot \text{seg}^{-1}$, devem ser representativos deste solo.

5.4 - Comportamento Mensal da Temperatura Média do Perfil de Solo Nu

Os valores médios mensais e respectivos intervalos de confiança da temperatura média do perfil de solo, obtidos

com os dados da Tabela 5 - Apêndice -, encontram-se na Tabela 8 . O intervalo de confiança (I.C.), que acompanha cada média foi calculado admitindo para teste t o nível de probabilidade de 95% .

TABELA 8 - Valores médios mensais e respectivos intervalos de confiança da temperatura média do perfil de solo

Meses	$\bar{T}(z)$	\pm I.C.	Meses	$\bar{T}(z)$	\pm I.C.
Jan.	26,2	\pm 0,4	Jul.	14,8	\pm 0,9
Fev.	26,0	\pm 0,6	Ago.	14,7	\pm 0,5
Mar.	24,5	\pm 0,6	Set.	17,2	\pm 0,8
Abr.	20,8	\pm 0,7	Out.	20,1	\pm 0,8
Mai	17,7	\pm 0,7	Nov.	22,4	\pm 0,6
Jun.	14,9	\pm 1,0	Dez.	25,7	\pm 0,6

Com os valores da Tabela 8, construiu-se o gráfico da Figura 13 , que mostra a variação anual da temperatura média do perfil de solo.

Analisando-se a Tabela 8 e a Figura 13, verifica-se que a temperatura média mensal do perfil de solo varia entre a máxima de 26,2°C e a mínima de 14,7°C. Também observa-se que o valor da temperatura é praticamente idêntico nos meses de junho, julho e agosto.

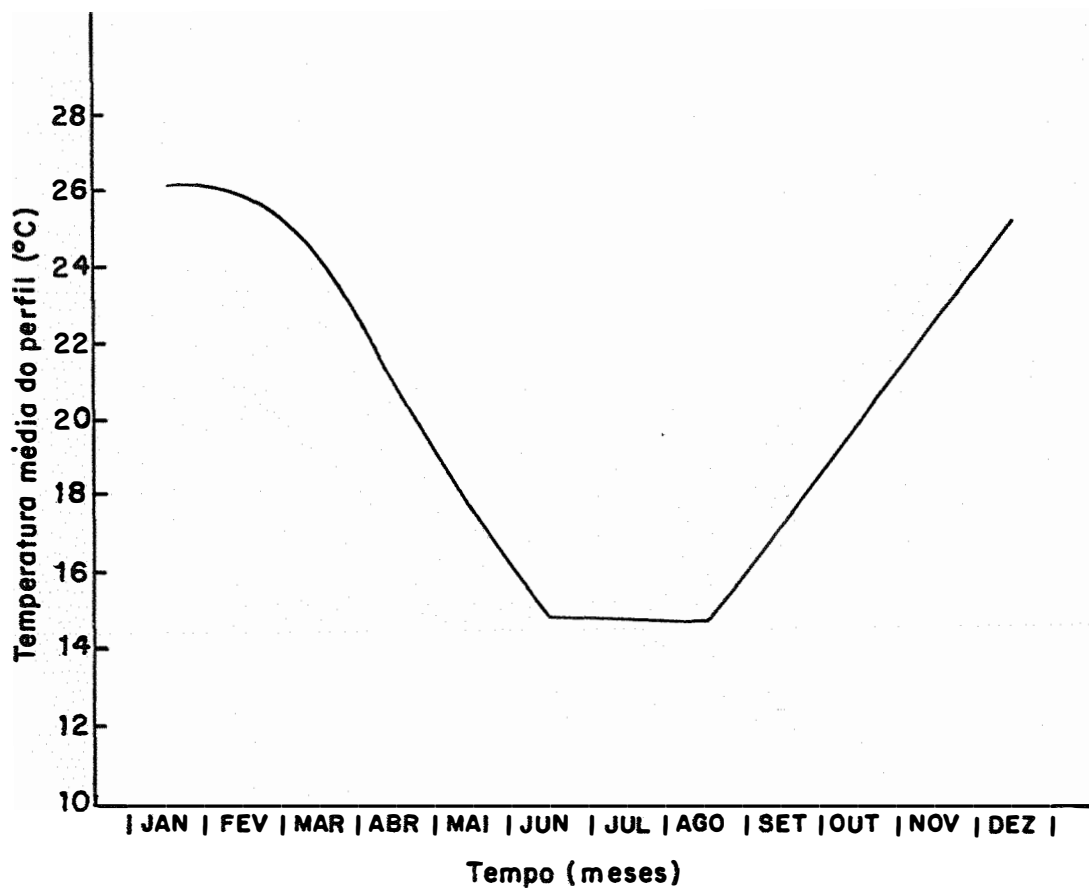


Figura 13 - Variação anual da temperatura média do perfil de solo nu

Espera-se, normalmente, que a variação anual da temperatura do solo seja similar à variação anual da densidade de fluxo de radiação solar, com um atraso proporcional a profundidade. Entretanto, o regime de nebulosidade e o de umidade do solo, podem modificar esta variação típica. Pois, o regime térmico do solo também é uma função do seu calor específico e da sua condutividade térmica, e em consequência do seu teor de umidade, tendo em vista a variação destas propriedades térmicas com o teor de umidade. Portanto, uma análise dos regimes de nebulosidade e de umidade do solo, provavelmente indicará as causas do comportamento térmico quase idêntico nos meses de junho, julho e agosto.

5.5 - Estimativa da Amplitude Máxima Média Mensal em $Z = 0$ para o Solo Nu

Com os valores da Tabela 6 - Apêndice - e difusividade térmica igual a $6,0 \times 10^{-3} \text{ cm}^2 \cdot \text{seg}^{-1}$, estimou-se a amplitude média mensal em $Z = 0$, utilizando-se a equação (4.2.23). Esses valores encontram-se na Tabela 9.

A Tabela 9 mostra que em termos médios, as maiores amplitudes ocorrem em dezembro e as menores em julho. É importante ressaltar que amplitude máxima é a diferença entre qualquer um dos valores extremos e o valor médio.

TABELA 9 - Valores estimados e respectivos intervalos de confiança das amplitudes máxima média mensal em $Z = 0$

Meses	$T_0(z=0)$	\pm I.C.	Meses	$T_0(z=0)$	\pm I.C.
Jan.	5,8	\pm 0,6	Jul.	3,1	\pm 0,6
Fev.	5,6	\pm 0,5	Ago.	3,3	\pm 0,3
Mar.	5,0	\pm 0,7	Set.	4,9	\pm 0,2
Abr.	4,4	\pm 0,1	Out.	5,3	\pm 0,8
Maio	4,0	\pm 0,1	Nov.	6,1	\pm 0,7
Jun.	3,4	\pm 0,6	Dez.	6,7	\pm 0,8

Nota-se que assumiu-se um valor constante para a difusividade térmica, isto é, independente do teor de umidade do solo. Esta hipótese se baseia nos resultados obtidos por DECICO (1974) e MOENCH e EVANS (1970), nos quais verifica-se que a variação da difusividade térmica, no intervalo de umidade da capacidade de campo ao ponto de murcha permanente, é mínima.

5.6 - Profundidade Média Mensal de Extinção da Onda Diária de Temperatura

Com os dados das Tabelas 5 e 6 - Apêndice - e a difusividade térmica igual a $6,0 \times 10^{-3} \text{ cm}^2 \cdot \text{seg}^{-1}$, estimou-se a profundidade média de extinção da onda diária de temperatura,

com o auxílio da equação (4.2.24). Os resultados estão na Tabela 10.

TABELA 10 - Valores, em cm, da profundidade média mensal de extinção da onda diária de temperatura

Meses	Z	Meses	Z
Jan.	52,2	Jul.	44,2
Fev.	51,6	Ago.	44,8
Mar.	50,2	Set.	50,1
Abr.	48,5	Out.	50,9
Maio	47,2	Nov.	52,9
Jun.	45,4	Dez.	54,1

Como admitiu-se que a difusividade térmica é constante para um determinado solo, a profundidade de extinção torna-se uma função apenas da amplitude máxima em $Z = 0$ e da diferença $T_{\max} - \bar{T}(z)$. A diferença $T_{\max} - \bar{T}(z)$ eleita foi $0,10^{\circ}\text{C}$ por ser a precisão do termômetro utilizado.

Analisando-se a Tabela 10, concluiu-se que em profundidades maiores que 54 cm, praticamente não existe variação diária de temperatura, independente da época do ano.

6 - CONCLUSÕES

Face às hipóteses assumidas e com base nos resultados obtidos, concluiu-se que:

- a - O calor específico médio do solo no estado seco (0% de umidade) é $0,23 \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{°C}^{-1}$.
- b - Os valores médios da divusividade térmica, condutividade térmica e calor específico do solo, com um teor médio de umidade de 22% em peso, são, respectivamente: $6,0 \times 10^{-3} \text{ cm}^2 \cdot \text{seg}^{-1}$, $2,94 \times 10^{-3} \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1} \cdot \text{seg}^{-1}$ e $0,49 \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{°C}^{-1}$.
- c - A temperatura média mensal do perfil assume os seguintes valores, respectivamente, de janeiro a dezembro: 26,2 , 26,0 , 24,5 , 20,8 , 17,7 , 14,9 , 14,8 , 14,7 , 17,2 , 20,1 , 22,4 e 25,7 .

- d - Os valores estimados para as amplitudes máximas médias mensais na superfície do solo, de janeiro a dezembro, são: 5,8 , 5,6 , 5,0 , 4,4 , 4,0 , 3,4 , 3,1 , 3,3 , 4,9 , 5,3 , 6,1 e 6,7 , respectivamente.
- e - A profundidade média mensal de extinção da onda diária de temperatura varia entre 44 cm, em julho, a 54 cm , em dezembro.

7 - SUMMARY

Thermal properties determinations and the monthly mean temperature variation of the Santa Maria soil in the Santa Maria county, RS, were the main objectives of this research.

The soil thermal diffusivity was obtained through equations using the velocity and daily temperature waves amplitude. Mean specific heat per volume was calculated with the equation, proposed by De VRIES (1963). Thermal conductivity was determined through the relation of thermal diffusivity definition. With a mean moisture content of 22% weight, the values obtained were: $6,0 \times 10^{-3} \text{ cm}^2 \cdot \text{seg.}^{-1}$; $2,94 \times 10^{-3} \text{ cal cm}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1} \cdot \text{seg.}^{-1}$ and $0,49 \text{ cal cm}^{-3} \cdot \text{°C}^{-1}$, for thermal diffusivity, thermal conductivity and mean specific heat per volume unity, respectively.

Mean soil temperature, maximum temperature amplitude in the soil surface and depth of extinction of the daily temperature waves were estimated from the monthly mean of maximum and minimum temperature values at 20 cm depth. The daily temperature wave disappears at 60 cm depth approximately. Monthly mean soil temperature changed between the maximum of 26,2°C and the minimum of 14,7°C .

8 - LITERATURA CITADA

- AL-NAKSHABANDI, G. e H. KOHNKE, 1965. Thermal conductivity and diffusivity of soils as related to moisture tension and other physical properties. Agricultural Meteorological, Amsterdan, 2: 259-70.
- BOWERS, S. A. e R. J. HANKS, 1962. Specific heat capacity of soils and minerals as determined with a radiation calorimeter. Soil Science, Baltimore, 94: 392-6.
- COCHRAN, P. H. ; L. BOERSMA e C. T. YOUNGBERG, 1967. Thermal properties of a pumice soil. Proceedings of the Soil Science Society of America, Madison, 31: 454-9.
- DECICO, A., 1967. Condutividade térmica dos solos. Equações para o cálculo da condutividade térmica de alguns solos em função da densidade e umidade. Piracicaba, ESALQ/USP, 26 p. (Tese de Doutorado).

- DECICO, A., 1974. A determinação das propriedades térmicas do solo em condições de campo. Piracicaba, ESALQ/USP. 78 p. (Tese de Livre-Docência).
- DECICO, A. ; H. M. SANTOS ; M. N. G. RIBEIRO e E. SALATI, 1976. Estudos climatológicos da Reserva Florestal Ducke, Manaus, Am. 1 - Geotemperaturas. Acta Amazônica, Manaus INPA, 7: 485-94.
- DEMATTE, J. L. I., 1967. Calor específico e de umedecimento de solos. Piracicaba, ESALQ/USP. 49 p. (Tese de Mestrado).
- FLUKER, B. J., 1958. Soil temperatures. Soil Science, Baltimore, 86: 35-46.
- FRITTON, D. D. ; W. J. BUSSCHER e J. E. ALPERT, 1974. An inexpensive but durable thermal conductivity probe for field use. Proceedings of the Soil Science Society of America, Madison, 38: 854-5.
- HADAS, A., 1968. A comparison between two methods of determining the thermal diffusivity of a moist soil. Proceedings of the Soil Science Society of America, Madison, 32: 28-32.
- HADAS, A., 1973. Evaluation of the block method for determining the thermal properties of the top soil. Agricultural Meteorological, Amsterdam, 11: 269-76.
- HADAS, A., 1974. Problems involved in measuring the soil thermal conductivity and diffusivity in a moist soil. Agricultural Meteorological, Amsterdam, 13: 105-13.

- HELD, E. F. M. van der e F. G. H. van DRUNEN, 1949. A method of measuring the thermal conductivity of liquids. Phy-sica, Haya, 15: 865-81
- HOLZMANN, M., 1964. Contribuição ao estudo da temperatura do solo paranaense. Curitiba, Escola de Agronomia e Ve-terinária / UFP , 31 p. (Tese de Livre-Docência).
- JACKSON, R. D. e D. KIRKHAM, 1958. Method of measurement of the real thermal diffusivity of moist soil . Proceedings of the Soil Science Society of America, Madison, 22: 479-82.
- JANSE, A. R. P. e G. BOREL, 1965. Measurement of thermal con-ductivity in situ in mixed materiais, e.g. soils. Netherlands Journal of Agricultural Science, Wageningen, 13: 57-62.
- JURY, W. A. e B. BELLANTUONI, 1976. A background temperatu-re correction for thermal conductivity probes. Soil Sci-ence Society America of Journal, Madison, 40: 608-10.
- KASUBUCHI, T., 1977. Twin transient - State cylindrical - pro-be method for the determination of the thermal conducti-
vity of soil. Soil Science, Baltimore, 124: 255-8.
- KERSTEN, M. S., 1949. Thermal properties of soils. Bulle-
tin of the University of Minnesota, Institute of Techno-logy, Minnesota, nº 28, 225 p.
- LOPEZ DA COSTA, A. O. e H. GODOY, 1962. Contribuição para o conhecimento do clima do solo de Ribeirão Preto, SP. Bragantia, Campinas, IAC, 21: 689-742.

- MOENCH, A. F. e D. D. EVANS, 1970. Thermal conductivity and diffusivity of soil using a cylindrical heat source. Proceedings of the Soil Science Society of America, Madison, 34: 377-81.
- MUNN, R. E., 1966. Soil temperature and moisture. In: Descriptive Micrometeorology. Academic Press, New York, p. 22-32.
- NAGPAL, N. K. e L. BOERSMA, 1973. Air entrapment as a possible source of error in the use of a cylindrical heat probe. Proceedings of the Soil Science Society of America, Madison, 37: 828-32.
- PEARCE, D. C. e L. W. GOLD, 1959. Observations of ground temperature and heat flow at Ottawa, Canadá. Journal of Geophysical Research, Baltimore, 64: 1293-8.
- PENROD, E. B. ; J. M. ELLIOTT e W. R. BROWN, 1960. Soil temperature variation (1952/1956) at Lexington, Kentucky. Soil Science, Baltimore, 90: 275-83.
- PEREIRA, V. P., 1973. Contribuição para a determinação das constantes térmicas dos solos. Jaboticabal, FCAV / UNESP 86 p. (Tese de Doutorado).
- RAO, E. V. M., 1975. Influence of thermal characteristics of a moist clay loam soil on the temperature regime at the surface. Journal of Agricultural Meteorological, Tokyo, 31: 153-5.

- RAO, T. V. R. e R. L. VIANELLO, 1977. Características térmicas do solo de Cachoeira Paulista, SP. São José dos Campos, INPE, 23p. (Relatório INPE nº 1106 - PE/080).
- REICHARDT, K. ; E. SALATI ; O. FREIRE e D. CRUCIANI, 1965. Propriedades térmicas de alguns solos do Estado de São Paulo. Anais do 2º Congresso Latino-Americano e 10º Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, Piracicaba, São Paulo.
- SCHNEIDER, T., 1969. The block-method for measuring heat flux density at the surface of soils and other bodies. Agricultura Meteorological, Amsterdam, 6: 423-34.
- SEPASKHAN, A. R. e L. BOERSMA, 1979. Thermal conductivity of Soils as a function of temperature and water content. Soil Science Society America of Journal, Madison, 43: 439-44.
- SHAW, R. P., 1976. Anotações do Curso de Meteorologia Agrícola da Universidade de Purdue, Purdue, Estados Unidos. 250 pp.
- SINGH, S. R. e B. K. SINHA, 1977. Soil thermal diffusivity determination from overspecification of boundary data. Soil Science Society America of Journal, Madison, 44: 831-34.
- SMITH, W. O. e H. G. BYERS, 1938. The thermal conductivity of dry soils of certain of the great soil groups. Proceedings of the Soil Science Society of America, Madison, 3: 13-19.

- SMITH, W. O., 1939. Thermal conductivities in moist soils. Proceedings of the Soil Science Society of America, Madison, 4: 32-40.
- SMITH, W. O., 1942. The thermal conductivity of dry soils. Soil Science, Baltimore, 53: 453-9.
- STIGTER, C. J., 1969. On measuring properties of soils by thermal method with special referente to the contact method. Netherlands Journal of Agricultural Science, Wageningen, 17: 41-9.
- STIGTER, C. J., 1970. The block-method for measuring heat flux density at the surface of soils and other solids (A comment). Agricultural Meteorological, Amsterdan, 7: 339-41.
- VIANELLO, R. L. ; T. V. R. RAO e J. M. NOGUEIRA, 1971. Comportamento térmico do solo de Viçosa, MG. Ciclo anual. Juiz de Fora, UFJF, 22 p.
- VRIES, D. A. de, 1952,b. A nonstationary method for determining thermal conductivity of soil in situ. Soil Science, Baltimore, 73: 83-9.
- VRIES, D. A. de, 1963. Thermal properties of soils. In: Van WIJK, W. R., editor. Physicas of Plant Environment. North-Holland Publishing Company, Amsterdan, p. 210-35.
- WIERENGA, P. J. ; D. R. NIELSEN e R. M. HAGAN, 1969. Thermal properties of a soil based upon field and laboratory measurements. Proceedings of the Soil Science Society of America, Madison, 33: 354-60.

WIJK, W. J. van, 1964. Two methods for the determination of the thermal properties of the soil near the surface. Physica, Haya, 30: 387-8.

WIJK, W. R. van, 1967. New method for measuring heat flux density at the surface of soils or of other bodies. Nature, London, 213: 214.

WIJK, W. R. van e P. J. BRUIJN, 1964. Determination of thermal conductivity and volumetric heat capacity of soils near the surface. Proceedings of the Soil Science Society of America, Madison, 28: 461-6.

WIJK, W. J. van e W. J. DERKSEN, 1966. Thermal properties of a soil near the surface. Agricultural Meteorological, Amsterdam, 4: 333-42.

WOODSIDE, W. e J. B. CLIFFE, 1959. Heat and moisture transfer in closed systems of two granular materials. Soil Science, Baltimore, 87: 75-82.

9 - APÊNDICE

TABELA 1 - Valores medidos de temperatura do solo em $^{\circ}\text{C}$.
Solo nu

Horas	Dia 27/12/79					Dia 28/12/79				
	2 cm	5 cm	10cm	20cm	30cm	2 cm	5 cm	10cm	20cm	30cm
06:00	19,4	20,4	23,2	25,8	28,6	20,4	21,4	24,0	26,3	27,2
06:30	19,6	20,3	23,1	25,6	28,8	20,8	21,5	23,8	26,2	27,2
07:00	20,0	20,7	22,9	25,5	26,7	21,5	21,8	23,7	26,0	27,1
07:30	21,2	21,4	22,9	25,4	26,7	22,4	22,6	23,7	25,9	27,0
08:00	22,8	22,5	23,1	25,3	26,6	24,4	23,8	23,9	25,8	26,9
08:30	24,2	23,8	23,4	25,2	26,5	25,6	24,9	24,4	25,7	26,8
09:00	25,4	24,8	23,9	25,1	26,4	26,7	26,0	24,8	25,7	26,7
09:30	26,8	25,9	24,5	25,2	26,3	28,4	27,2	25,5	25,7	26,6
10:00	28,6	27,3	25,2	25,3	26,3	29,9	28,5	26,2	25,8	26,6
10:30	30,1	28,5	25,9	25,4	26,2	31,2	29,6	26,8	26,0	26,5
11:00	31,4	29,8	26,5	25,6	26,2	32,7	30,9	27,4	26,2	26,5
11:30	32,7	31,1	27,2	25,8	26,2	34,1	32,5	28,3	26,5	26,6
12:00	33,8	32,2	28,1	26,2	26,2	35,4	33,5	29,2	26,8	26,6
12:30	35,0	33,5	28,9	26,5	26,3	36,6	34,8	29,8	27,1	26,7
13:00	36,2	34,4	29,6	26,8	26,3	37,8	35,9	30,6	27,4	26,8
13:30	37,3	35,2	30,4	27,2	26,4	38,8	36,8	31,5	27,8	26,9
14:00	38,4	35,9	31,0	27,5	26,5	39,8	37,5	32,1	28,1	27,0
14:30	39,2	36,5	31,6	27,9	26,6	40,8	37,9	32,8	28,6	27,2
15:00	39,4	37,0	32,0	28,3	26,8	41,4	38,4	33,2	29,0	27,4
15:30	39,6	37,4	32,4	28,6	27,0	41,4	38,9	33,6	29,4	27,6
16:00	39,4	37,6	32,6	29,0	27,1	41,3	39,1	33,8	29,7	27,8
16:30	39,2	37,6	32,8	29,2	27,3	40,9	39,2	34,0	30,0	27,9
17:00	38,5	37,4	33,0	29,5	27,5	40,3	38,9	34,2	30,3	28,0
17:30	37,8	37,0	33,1	29,8	27,7	39,4	38,4	34,4	30,5	28,2
18:00	36,5	36,2	33,1	29,9	27,8	38,4	37,8	34,4	30,7	28,3
18:30	35,2	35,3	33,0	30,0	27,9	37,1	36,8	34,2	30,9	28,5

continua ...

TABELA 1 - Continuação

Horas	Dia 27/12/79					Dia 28/12/79				
	2 cm	5 cm	10cm	20cm	30cm	2 cm	5 cm	10cm	20cm	30cm
19:00	33,6	34,2	32,8	30,1	28,0	35,4	35,8	34,0	31,0	28,6
19:30	32,0	32,8	32,4	30,1	28,1	34,0	34,4	33,6	31,0	28,7
20:00	30,7	31,4	31,9	30,1	28,2	32,6	33,2	33,2	31,0	28,8
20:30	29,5	30,4	31,4	30,1	28,3	31,4	32,2	32,6	31,0	28,9
21:00	28,6	29,4	30,8	30,0	28,3	30,5	31,1	32,1	30,9	28,9
21:30	27,6	28,6	30,3	29,9	28,4	29,8	30,5	31,6	30,8	29,0
22:00	26,8	27,9	29,7	29,8	28,4	29,0	29,9	31,2	30,7	29,0
22:30	26,2	27,3	29,3	29,6	28,4	28,4	29,2	30,7	30,5	29,1
23:00	25,5	26,7	28,8	29,4	28,4	27,8	28,6	30,3	30,3	29,1
23:30	25,0	26,1	28,3	29,2	28,3	27,3	28,1	29,7	30,1	29,0
24:00	24,5	25,6	27,8	28,9	28,3	26,8	27,6	29,2	29,9	29,0
00:30	24,0	25,1	27,4	28,7	28,2	26,3	27,2	28,7	29,6	28,9
01:00	23,5	24,6	27,0	28,5	28,1	25,8	26,8	28,2	29,4	28,9
01:30	23,0	24,2	26,6	28,2	28,0	25,4	26,3	27,7	29,2	28,8
02:00	22,5	23,8	26,2	27,9	27,9	25,0	25,9	27,3	29,0	28,7
02:30	22,1	23,3	25,9	27,7	27,8	24,6	25,6	27,0	28,8	28,6
03:00	21,8	23,0	25,5	27,5	27,7	24,3	25,3	26,7	28,6	28,5
03:30	21,5	22,6	25,2	27,3	27,6	24,0	25,0	26,5	28,4	28,4
04:00	21,2	22,3	24,8	27,1	27,3	23,7	24,7	26,3	28,2	28,3
04:30	21,0	21,1	24,5	26,9	27,4	23,4	24,4	26,2	28,0	28,2
05:00	20,8	21,8	24,3	26,7	27,3	23,2	24,2	26,1	27,9	28,1
05:30	20,6	21,6	24,1	26,5	27,3	23,0	24,0	26,0	27,7	28,1
\bar{T}	28,7	28,6	28,1	27,7	27,3	30,6	30,3	29,3	28,6	27,8
$\bar{T}(Z)$			28,1					29,3		

TABELA 2 - Valores medidos de temperatura do solo em $^{\circ}\text{C}$.
Solo com cobertura morta

Horas	Dia 27/12/79					Dia 28/12/79				
	2 cm	5 cm	10cm	20cm	30cm	2 cm	5 cm	10cm	20cm	30cm
06:00	22,7	23,4	24,1	24,8	25,2	23,4	24,0	24,5	25,2	25,4
07:00	23,0	23,5	24,0	24,8	25,2	23,8	24,1	24,4	25,0	25,4
08:00	23,6	23,8	24,0	24,7	25,2	24,5	24,4	24,4	24,9	25,4
09:00	24,6	24,2	24,1	24,6	25,2	25,2	24,9	24,6	24,9	25,4
10:00	25,6	24,8	24,4	24,6	25,1	26,1	25,5	24,8	24,9	25,3
11:00	26,6	25,5	24,7	24,7	25,1	27,0	26,1	25,2	25,0	25,2
12:00	27,6	26,2	25,2	24,9	25,0	28,2	27,0	25,6	25,1	25,2
13:00	28,3	26,8	25,6	25,0	25,0	29,4	27,7	26,1	25,3	25,2
14:00	29,0	27,4	26,0	25,2	25,0	30,2	28,2	26,6	25,6	25,3
15:00	29,5	27,8	26,4	25,4	25,1	30,8	28,6	27,1	25,8	25,3
16:00	29,6	28,2	26,7	25,6	25,2	30,8	28,9	27,4	26,1	25,4
17:00	29,4	28,2	26,9	25,8	25,2	30,4	29,1	27,6	26,3	25,5
18:00	28,6	28,2	27,0	26,0	25,3	29,7	28,9	27,8	26,5	25,6
19:00	28,0	27,8	27,0	26,1	25,4	29,0	28,8	27,8	26,6	25,7
20:00	27,2	27,2	26,8	26,2	25,4	28,1	28,2	27,6	26,7	25,7
21:00	26,5	26,8	26,6	26,2	25,5	27,5	27,8	27,4	26,8	25,8
22:00	26,0	26,4	26,4	26,1	25,6	27,0	27,4	27,2	26,8	25,9
23:00	25,0	25,6	25,9	25,8	25,6	26,1	26,6	26,8	26,6	26,0
01:00	24,6	25,2	25,6	25,7	25,5	25,8	26,3	26,6	26,4	26,0
02:00	24,3	24,8	25,4	25,5	25,5	25,4	26,0	26,3	26,3	26,0
03:00	24,0	24,5	25,1	25,4	25,4	25,2	25,8	26,0	26,2	26,0
04:00	23,8	24,3	24,9	25,3	25,4	24,9	25,5	25,8	26,0	25,9
05:00	23,6	24,1	24,7	25,2	25,4	24,7	25,4	25,6	25,9	25,9
\bar{T}	26,1	25,9	25,6	25,4	25,3	27,1	26,8	26,3	25,9	25,6
$\bar{T}(z)$			25,7					26,3		

TABELA 3 - Valores calculados de temperatura do solo em $^{\circ}\text{C}$ com a equação (4.2.7). Difusividade térmica = $6,0 \times 10^{-3} \text{ cm}^2 \cdot \text{seg}^{-1}$

Minutos	Solo nu					Solo com cobertura morta				
	2 cm	5 cm	10cm	20cm	30cm	2 cm	5 cm	10cm	20cm	30cm
0	29,3	27,1	25,5	26,4	28,2	26,3	25,5	24,9	25,2	25,9
30	30,9	28,3	26,2	26,5	28,1	26,9	26,0	25,2	25,3	25,9
60	31,1	29,5	27,0	26,6	28,0	27,5	26,4	25,5	25,3	25,9
90	33,9	20,8	27,8	26,8	28,0	28,1	26,9	25,8	25,4	25,8
120	35,4	32,0	28,6	27,0	27,9	28,6	27,4	26,1	25,5	25,8
150	36,7	33,2	29,5	27,3	27,9	29,1	27,8	26,4	25,6	25,8
180	37,9	34,3	30,3	27,6	28,0	29,6	28,2	26,7	25,7	25,8
210	38,9	35,3	31,2	27,9	28,1	30,0	28,6	27,0	25,8	25,8
240	39,8	36,3	32,0	28,3	28,1	30,3	29,0	27,3	26,0	25,9
270	40,5	37,1	32,7	28,6	28,2	30,6	29,3	27,6	26,1	25,9
300	41,0	37,7	33,4	29,0	28,2	30,7	29,5	27,9	26,2	26,0
330	41,3	38,2	34,0	29,4	28,4	30,9	29,7	28,1	26,4	26,0
360	41,4	38,6	34,6	29,8	28,5	30,9	29,9	28,3	26,5	26,1
390	41,3	38,8	35,0	30,2	28,7	30,9	29,9	28,5	26,7	26,2
420	41,0	28,9	35,4	30,5	28,8	30,7	29,9	28,6	26,8	26,2
450	40,5	38,8	35,7	30,9	29,0	30,6	29,9	28,7	26,9	26,3
480	39,8	38,5	35,8	31,2	29,2	30,3	29,8	28,8	27,1	26,4
510	38,9	38,0	35,8	31,5	29,4	30,0	29,6	28,8	27,2	26,4
540	37,9	37,5	35,7	31,7	29,5	29,6	29,4	28,8	27,3	26,5
570	36,7	36,7	35,5	31,9	29,7	29,1	29,1	28,7	27,3	26,6
600	35,4	35,9	35,2	32,1	29,9	28,6	28,8	28,6	27,4	26,6
630	33,9	34,9	34,8	32,2	30,0	28,1	28,5	28,4	27,4	26,7
660	31,1	33,9	34,3	32,3	30,1	27,5	28,1	28,2	27,5	26,7
690	30,9	32,9	33,7	32,3	30,3	26,9	27,6	28,0	27,5	26,8
720	29,3	31,5	33,1	32,2	30,4	26,3	27,2	27,8	27,4	26,8

continua ...

TABELA 3 - continuação

Minutos	Solo nu					Solo com cobertura morta				
	2 cm	5 cm	10cm	20cm	30cm	2 cm	5 cm	10cm	20cm	30cm
750	27,7	30,3	32,4	32,1	30,5	25,7	26,7	27,5	27,4	26,8
780	26,2	29,0	31,6	32,0	30,6	25,2	26,2	27,2	27,4	26,8
810	24,7	27,8	30,8	31,8	30,6	24,6	25,8	26,9	27,3	26,9
840	23,2	26,6	30,0	31,6	30,7	24,1	25,3	26,6	27,2	26,9
870	21,9	25,4	29,1	31,3	30,7	23,6	24,9	26,3	27,1	26,8
900	20,7	24,3	28,2	31,0	30,6	23,1	24,5	25,9	27,0	26,8
930	19,7	23,2	27,4	30,7	30,6	22,7	24,1	25,6	26,9	26,8
960	18,8	22,3	26,6	30,3	30,5	22,4	23,7	25,3	26,7	26,8
990	18,1	21,5	25,9	30,0	30,4	22,1	23,4	25,1	26,6	26,7
1.020	17,6	20,9	25,2	29,6	30,3	21,9	23,2	24,8	26,4	26,7
1.050	17,3	20,4	24,6	29,2	30,2	21,8	23,0	24,6	26,3	26,6
1.080	17,2	20,0	24,0	28,8	30,1	21,8	22,8	24,4	26,2	26,6
1.110	17,3	19,8	23,6	28,4	29,9	21,8	22,7	24,2	26,0	26,5
1.140	17,6	19,7	23,2	28,1	29,8	21,9	22,7	24,1	25,9	26,5
1.170	18,1	19,8	23,0	27,7	29,6	22,1	22,8	24,0	25,7	26,4
1.200	18,8	20,1	22,8	27,4	29,4	22,4	22,9	23,9	25,6	26,3
1.230	19,7	20,6	22,8	27,1	29,2	22,7	23,0	23,9	25,5	26,3
1.260	20,7	21,1	22,9	26,9	29,1	23,1	23,3	23,9	25,4	26,2
1.290	21,9	21,8	23,1	26,7	28,9	23,6	23,5	24,0	25,3	26,1
1.320	23,2	22,7	23,4	26,5	28,7	24,1	23,9	24,1	25,3	26,1
1.350	24,7	23,7	23,8	26,4	28,6	24,6	24,2	24,3	25,2	26,0
1.380	26,2	24,7	24,3	26,3	28,4	25,2	24,6	24,4	25,2	26,0
1.410	27,7	25,9	24,9	26,3	28,3	25,7	25,0	24,7	25,2	--
\bar{T} (z)			29,3					26,30		
T_0			12,1					4,60		

TABELA 4 - Valores calculados de temperatura do solo em $^{\circ}\text{C}$ com a equação (4.2.7) e com valores de temperatura média de cada profundidade. Difusividade térmica = $6,0 \times 10^{-3} \text{ cm}^2 \cdot \text{seg}^{-1}$

Minutos	Solo nu					Solo com cobertura morta				
	2 cm	5 cm	10cm	20cm	30cm	2 cm	5 cm	10cm	20cm	30cm
0	30,6	28,3	25,9	26,0	26,8	27,1	26,1	24,7	25,0	25,2
30	32,0	29,4	26,5	26,0	26,7	27,6	26,5	24,9	25,0	25,2
60	33,4	30,5	27,2	26,2	26,6	28,1	26,9	25,2	25,0	25,2
90	34,8	31,7	28,0	26,3	26,6	28,6	27,3	25,4	25,1	25,2
120	36,0	32,8	28,7	26,5	26,6	29,0	27,7	25,7	25,2	25,2
150	37,2	33,8	29,5	26,8	26,6	29,4	28,0	26,0	25,3	25,2
180	38,3	34,8	30,2	27,0	26,6	29,8	28,4	26,2	25,4	25,2
210	39,2	35,7	31,0	27,3	26,6	30,1	28,7	26,5	25,5	25,2
240	40,0	36,6	31,7	27,7	26,7	30,4	29,0	26,7	25,6	25,2
270	40,7	37,3	32,4	28,0	26,8	30,6	29,2	27,0	25,7	25,2
300	41,1	37,9	33,0	28,4	26,9	30,8	29,4	27,2	25,8	25,3
330	41,4	38,4	33,6	28,7	27,0	30,9	29,6	27,4	25,9	25,3
360	41,5	38,7	34,0	29,1	27,1	30,9	29,7	27,6	26,1	25,4
390	41,4	38,9	34,5	29,4	27,2	30,9	29,8	27,7	26,2	25,4
420	41,1	38,9	34,8	29,7	27,4	30,8	29,8	27,8	26,3	25,5
450	40,7	38,8	35,0	30,0	27,5	30,6	29,8	27,9	26,4	25,5
480	40,0	38,6	35,1	30,3	27,7	30,4	29,7	27,9	26,5	25,6
510	39,2	38,2	35,1	30,6	27,9	30,1	29,5	27,9	26,6	25,6
540	38,3	37,7	35,1	30,8	28,0	29,8	29,4	27,9	26,7	25,7
570	37,2	37,0	34,9	31,0	28,2	29,4	29,1	27,9	26,7	25,7
600	36,0	36,2	34,6	31,1	28,3	29,0	28,9	27,8	26,8	25,8
630	34,8	35,4	34,3	31,2	28,5	28,6	28,6	27,6	26,8	25,8
660	33,4	34,4	33,8	31,3	28,6	28,1	28,2	27,5	26,8	25,9
690	32,0	33,4	33,3	31,3	28,7	27,6	27,9	27,3	26,8	25,9

continua ...

TABELA 4 - Continuação

Minutos	Solo nu					Solo com cobertura morta				
	2 cm	5 cm	10cm	20cm	30cm	2 cm	5 cm	10cm	20cm	30cm
720	30,6	32,3	32,7	31,2	28,8	27,1	27,5	27,1	26,8	26,0
750	29,2	31,2	32,1	31,2	28,9	26,6	27,1	26,9	26,8	26,0
780	27,8	30,1	31,4	31,0	29,0	26,1	26,7	26,6	26,8	26,0
810	26,4	28,9	30,6	30,9	29,0	25,6	26,3	26,4	26,7	26,0
840	25,2	27,8	29,9	30,7	29,0	25,2	25,9	26,1	26,6	26,0
870	24,0	26,8	29,1	30,4	29,0	24,8	25,6	25,8	26,5	26,0
900	22,9	25,8	28,4	30,2	29,0	24,4	25,2	25,6	26,4	26,0
930	22,0	24,9	27,6	29,9	29,0	24,1	24,9	25,3	26,3	26,0
960	21,2	24,0	26,9	29,5	28,9	23,8	24,6	25,1	26,2	26,0
990	20,5	23,3	26,2	29,2	28,8	23,6	24,4	24,8	26,1	26,0
1.020	20,1	22,7	25,6	28,9	28,7	23,4	24,2	24,6	26,0	25,9
1.050	19,8	22,2	25,0	28,5	28,6	23,3	24,0	24,4	25,9	25,9
1.080	19,7	21,9	24,6	28,2	28,5	23,3	23,9	24,2	25,7	25,8
1.110	19,8	21,7	24,1	27,8	28,4	23,3	23,8	24,1	25,6	25,8
1.140	20,1	21,7	23,8	27,5	28,2	23,4	23,8	24,0	25,5	25,7
1.170	20,5	21,8	23,6	27,2	28,1	23,6	23,8	23,9	25,4	25,7
1.200	21,2	22,0	23,5	26,9	27,9	23,8	23,9	23,9	25,3	25,6
1.230	22,0	22,4	23,5	26,6	27,7	24,1	24,1	23,9	25,2	25,6
1.260	22,9	22,9	23,5	26,4	27,6	24,4	24,2	23,9	25,1	25,5
1.290	24,0	23,6	23,7	26,2	27,4	24,8	24,5	23,9	25,1	25,5
1.320	25,2	24,4	24,0	26,1	27,3	25,2	24,7	24,0	25,0	25,4
1.350	26,4	25,2	24,3	26,0	27,1	25,6	25,0	24,2	25,0	25,4
1.380	27,8	26,2	24,8	25,9	27,0	26,1	25,4	24,3	25,0	25,3
1.410	29,2	27,2	25,3	25,9	26,9	26,6	25,7	24,5	25,0	25,3
\bar{T}	30,6	30,3	29,3	28,6	27,8	27,1	26,8	26,3	25,9	25,6
T_0			10,9					3,8		

TABELA 5 - Valores médios mensais da temperatura média do perfil em °C. Soló nu

Meses	Anos						
	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978
Janeiro	26,4	25,9	27,0	25,8	25,4	26,7	26,4
Fevereiro	26,3	25,6	24,2	26,4	26,2	26,8	26,2
Março	24,1	25,2	24,6	24,2	23,2	25,2	25,2
Abril	19,8	22,2	22,0	20,7	19,7	20,6	20,4
Maio	19,0	17,8	18,6	17,8	17,0	17,3	16,2
Junho	17,4	14,9	13,4	15,3	13,9	15,4	14,2
Julho	14,3	14,6	15,3	13,6	13,4	16,6	15,8
Agosto	15,2	13,2	14,9	15,1	14,6	15,0	15,2
Setembro	17,2	15,9	16,9	16,4	16,8	19,2	18,2
Outubro	18,6	20,2	19,8	19,9	19,4	21,4	21,4
Novembro	21,2	22,2	22,5	22,0	23,0	23,6	22,0
Dezembro	25,5	25,8	24,2	25,3	25,8	26,4	26,6

TABELA 6 - Valores médios mensais das amplitudes máximas na profundidade de 20 cm. Solo nu

Meses	Anos						
	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978
Janeiro	1,45	1,00	1,20	1,30	1,10	1,10	1,45
Fevereiro	1,30	0,95	1,10	1,20	1,20	1,05	1,35
Março	0,90	1,25	1,00	0,95	0,85	1,05	1,35
Abril	0,90	0,85	0,95	0,90	0,90	0,95	0,99
Mai	0,90	0,80	0,75	0,70	0,85	0,70	1,10
Junho	0,40	0,70	0,95	0,70	0,70	0,70	0,85
Julho	0,40	0,90	0,75	0,60	0,75	0,60	0,65
Agosto	0,55	0,85	0,70	0,60	0,75	0,65	0,75
Setembro	1,05	1,10	1,00	0,95	1,05	1,15	1,00
Outubro	0,95	1,05	1,45	1,10	1,30	0,75	1,15
Novembro	0,85	1,40	1,30	1,40	1,40	1,25	1,35
Dezembro	1,10	1,35	1,35	1,60	1,55	1,25	1,75