



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE – 4332 – TDL /289

PROPRIEDADES TERMICAS DO SOLO: UM ESTUDO DE CASOS

Regina Célia dos Santos

Dissertação de Mestrado em Meteorologia, orientada por Yelisetty Viswanadham,
aprovada em 21 de abril de 1987.

INPE
São José dos Campos
1987



PALAVRAS CHAVES/KEY WORDS

AUTORES/AUTHORS

DIFUSIVIDADE TÉRMICA CALOR ESPECÍFICO
CONDUTIBILIDADE TÉRMICA SOLOS

AUTORIZADA POR/AUTHORIZED BY

Marco Antônio Rolapp
Diretor Geral

AUTOR RESPONSÁVEL
RESPONSIBLE AUTHOR

Regina Célia dos Santos

DISTRIBUIÇÃO/DISTRIBUTION

INTERNA / INTERNAL
 EXTERNA / EXTERNAL
 RESTRITA / RESTRICTED

REVISADA POR / REVISED BY

Y. Viswanadham
Yelissetty Viswanadham

CDU/UDC

551.588.3

DATA / DATE

Setembro 1987

PUBLICAÇÃO Nº
PUBLICATION NO

INPE-4332-TDL/289

TÍTULO/TITLE

PROPRIEDADES TÉRMICAS DO SOLO:
UM ESTUDO DE CASOS

AUTORES/AUTHORSHIP

Regina Célia dos Santos

ORIGEM
ORIGIN

PG/DME

PROJETO
PROJECT

FRH/MET

Nº DE PAG.
NO OF PAGES

133

ULTIMA PAG.
LAST PAGE

112

VERSÃO
VERSION

Nº DE MAPAS
NO OF MAPS

RESUMO - NOTAS / ABSTRACT - NOTES

A transferência de calor nas camadas da superfície do solo é uma função do gradiente de temperatura e de suas propriedades térmicas. A difusividade térmica (K) do solo depende da sua estrutura e conteúdo de umidade (período seco e úmido). O parâmetro K para a estação localizada em 22° 41' S e 45° 00' W, Cachoeira Paulista, SP., foi determinado utilizando-se as temperaturas do solo às profundidades de 05, 10 e 15 cm para o solo úmido durante diferentes estações dos anos 1984 e 1985. Os valores médios de K obtidos a partir dos métodos do "range" e da defasagem estão compatíveis com aqueles obtidos a partir da amplitude e fase do primeiro harmônico da Série de Fourier. Os resultados mostram que os valores de K dependem do método de estimativa e revelam ainda que o conteúdo de umidade no solo atua de forma singular nos perfis de temperatura, nas propriedades térmicas e conseqüentemente nos fenômenos agrometeorológicos relevantes.

OBSERVAÇÕES/REMARKS

Dissertação de Mestrado em Meteorologia aprovada em 21 de abril de 1987.

Aprovada pela Banca Examinadora
em cumprimento a requisito exigido
para a obtenção do Título de Mestre
em Meteorologia

Dr. Y. Viswanadham

Y. Viswanadham

Presidente
Orientador

Dr. Jesus Marden dos Santos

Jesus Marden dos Santos

Orientador

Dr. Mário Benincasa

Mário Benincasa

Membro da Banca
-convidado-

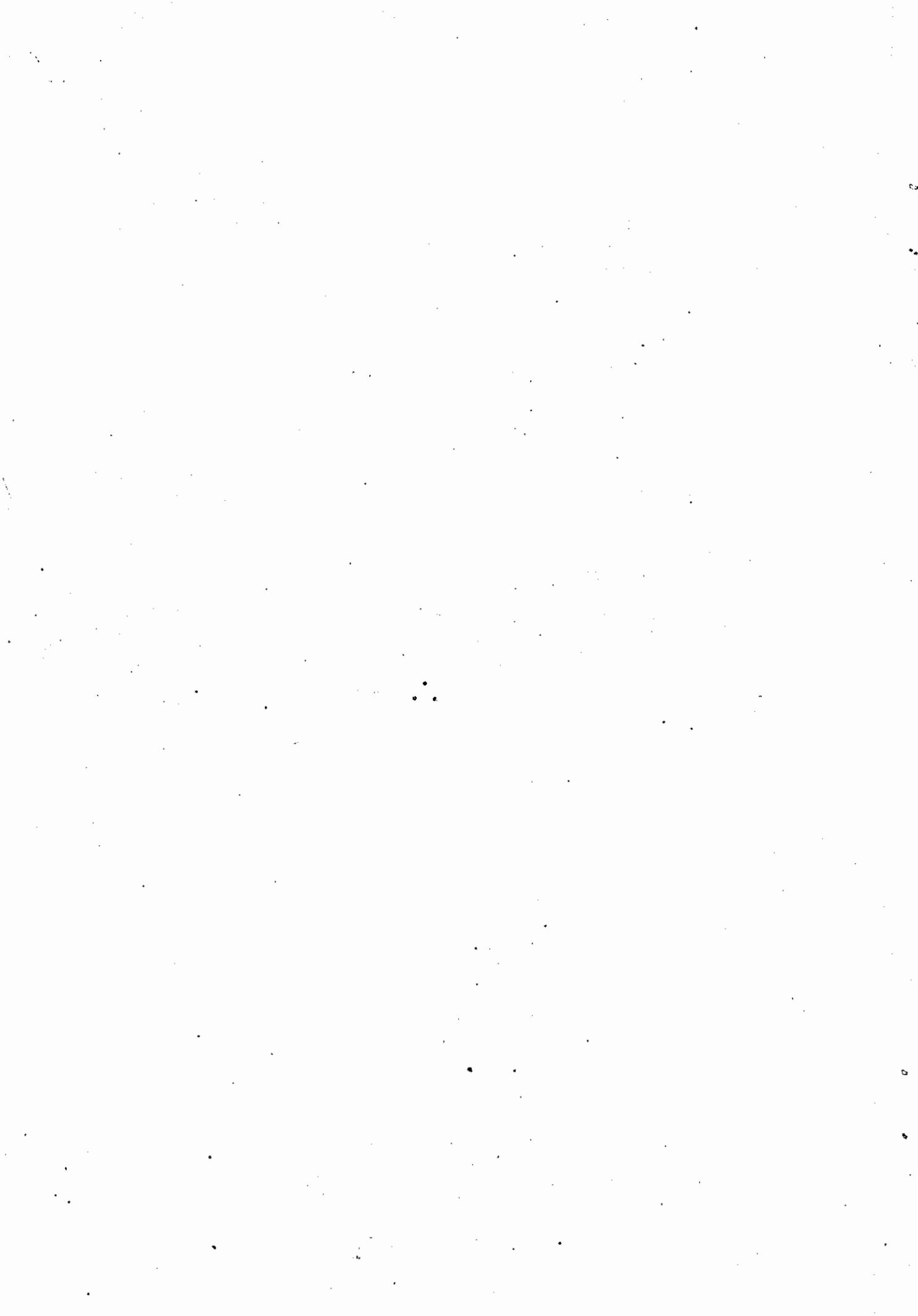
Dr. Alberto Waingort Setzer

Alberto W. Setzer

Membro da Banca

Candidata: Regina Célia dos Santos

São José dos Campos, 21 de abril de 1987



A meu pai,
dedico.



AGRADECIMENTOS

Ao Dr. Yelisetty Viswanadham e ao Dr. Jesus Marden dos Santos pela orientação segura, compreensiva e amigável durante todo o desenvolvimento deste trabalho.

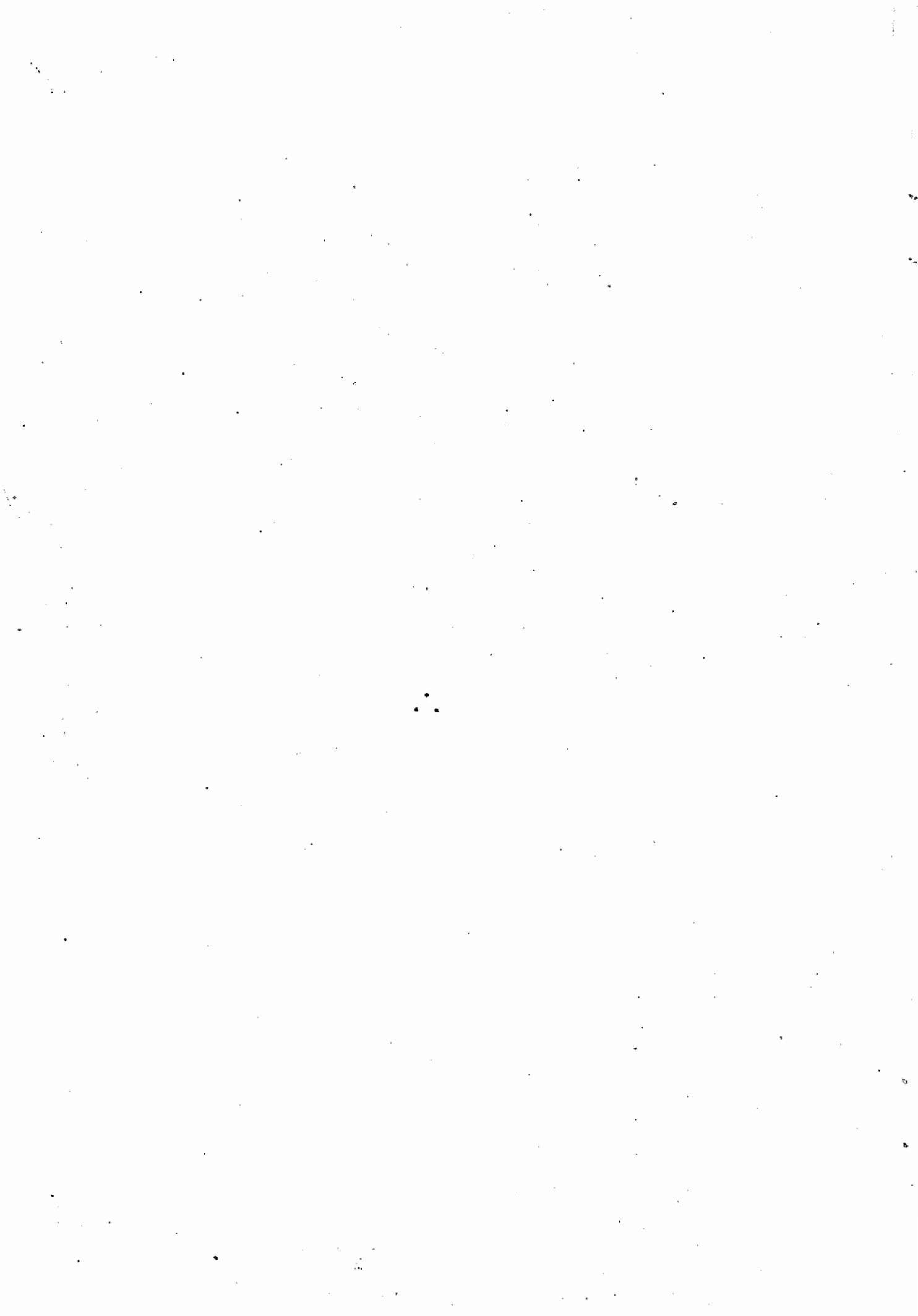
Ao mestre José Paulo Bonatti e ao Sr. Luis Guilherme Hidalgo Plaza pela ajuda dispendida neste trabalho.

Aos membros da banca examinadora pela predisposição em analisar este trabalho, o que resultou no seu aperfeiçoamento.

Ao Departamento de Meteorologia, na pessoa do Sr. Yoshihiro Yamazaki, pelos recursos fornecidos e aos colegas que direta, ou indiretamente, contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Instituto de Pesquisas Espaciais pelos recursos fornecidos e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Tecnológico pela bolsa de Mestrado.

E, em especial, a minha família que me incentivaram e apoiaram em todos os momentos difíceis, cuja vida constitui exemplo e forte estímulo.



ABSTRACT

The inward heat transfer at the surface is a function of the temperature gradient and the thermal properties of the soil. The thermal diffusivity (K) of the soil depends on its structure as well as on its moisture content (dry and rainy periods). The K parameter for the station of Cachoeira Paulista, SP. (22°41' S and 45°00' W) was calculated using the soil temperatures at depths of 05, 10 and 15 cm, in bare soil, during different seasons of the years of 1984 and 1985. The average values for K as given by the range and lag methods are compared to those obtained by using the amplitude and phase of the Fourier series first harmonic. The results show that the parameter K does depend on the particular estimating method employed. They also reveal that the soil moisture content has a conspicuous effect on the temperature profile, thermal properties and consequently on the relevant agrometeorological phenomena.



SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
<u>LISTA DE FIGURAS</u>	xi
<u>LISTA DE TABELAS</u>	xv
<u>LISTA DE SÍMBOLOS</u>	xvii
<u>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO</u>	01
<u>CAPÍTULO 2 - REVISÃO DA LITERATURA</u>	05
<u>CAPÍTULO 3 - DADOS</u>	25
3.1 - Análise Granulométrica.....	28
3.2 - Análise Mineralógica.....	28
3.3 - Apresentação dos Resultados.....	29
<u>CAPÍTULO 4 - MÉTODOS DE ANÁLISE DOS DADOS</u>	33
4.1 - Análise de Fourier.....	33
4.2 - Fluxo de Calor e Temperatura do Solo.....	34
4.3 - Difusividade Térmica.....	38
4.3.1 - Método do "Range" e da Defasagem.....	38
4.3.2 - Método da Amplitude e Fase do Primeiro Harmônico da Série de Fourier.....	40
4.4 - Calor Específico Médio.....	42
4.4.1 - Método de Misturas.....	43
<u>CAPÍTULO 5 - RESULTADOS</u>	45
5.1 - Perfis de Temperatura.....	45
5.1.1 - Ciclo Anual.....	45
5.1.2 - Ciclo Sazonal.....	51

	<u>Pág.</u>
5.1.3 - Ciclo Diário.....	57
5.2 - Análise Harmônica.....	65
5.2.1 - Ciclo Anual.....	65
5.2.2 - Ciclo Sazonal.....	70
5.2.3 - Ciclo Diário.....	70
5.2.4 - Tempo dos Extremos.....	76
5.3 - Difusividade Térmica.....	79
5.3.1 - Ciclo Anual.....	80
5.3.2 - Ciclo Sazonal.....	91
5.3.3 - Ciclo Diário.....	94
5.4 - Condutibilidade Térmica.....	97
<u>CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES</u>	103
<u>SUGESTÕES</u>	107
<u>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u>	109

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
3.1 - Curva granulométrica de uma amostra do solo de Cachoeira Paulista - SP.....	31
5.1(a) - Temperaturas médias diárias do solo à profundidade de 05 cm, anos de 1984 e 1985, Cachoeira Paulista - SP.....	46
5.1(b) - Temperaturas médias diárias do solo à profundidade de 10 cm, anos de 1984 e 1985, Cachoeira Paulista - SP.....	47
5.1(c) - Temperaturas médias diárias do solo à profundidade de 15 cm, anos de 1984 e 1985, Cachoeira Paulista - SP.....	48
5.2 - Progressão anual da temperatura do solo com base em médias mensais às profundidades de 05, 10 e 15 cm, anos de 1984 e 1985, Cachoeira Paulista - SP.....	50
5.3(a) - Temperaturas médias diárias do solo às profundidades de 05, 10 e 15 cm para janeiro de 1984 e janeiro de 1985, Cachoeira Paulista - SP.....	52
5.3(b) - Temperaturas médias diárias do solo às profundidades de 05, 10 e 15 cm para abril de 1984 e abril de 1985, Cachoeira Paulista - SP.....	54
5.3(c) - Temperaturas médias diárias do solo às profundidades de 05, 10 e 15 cm para julho de 1984 e julho de 1985, Cachoeira Paulista - SP.....	55
5.3(d) - Temperaturas médias diárias do solo às profundidades de 05, 10 e 15 cm para outubro de 1984 e outubro de 1985, Cachoeira Paulista - SP.....	56
5.4(a) - Variação diária da temperatura do solo às profundidades de 05, 10 e 15 cm em 05/03/85 para Cachoeira Paulista - SP.....	58
5.4(b) - Variação diária da temperatura do solo às profundidades de 05, 10 e 15 cm em 05/03/85 (valores suavizados) para Cachoeira Paulista - SP.....	58

	<u>Pág.</u>
5.4(c) - Variação diária da temperatura do solo às profundidades de 05, 10 e 15 cm em 08/04/85 para Cachoeira Paulista - SP.....	60
5.4(d) - Variação diária da temperatura do solo às profundidades de 05, 10 e 15 cm em 08/04/85 (valores suavizados) para Cachoeira Paulista - SP.	60
5.4(e) - Variação diária da temperatura do solo às profundidades de 05, 10 e 15 cm em 25/07/85 para Cachoeira Paulista - SP.....	62
5.4(f) - Variação diária da temperatura do solo às profundidades de 05, 10 e 15 cm em 07/11/85 para Cachoeira Paulista - SP.....	62
5.5(a) - Perfís verticais de temperatura do solo às profundidades de 05, 10 e 15 cm em 05/03/85 e 08/04/85 (valores suavizados) para Cachoeira Paulista - SP.....	63
5.5(b) - Perfís verticais de temperatura do solo às profundidades de 05, 10 e 15 cm em 25/07/85 e 07/11/85 para Cachoeira Paulista - SP.....	64
5.6 - Análise de Fourier. Variação da amplitude com a profundidade, harmônicos de 1 a 3, para o ciclo de temperatura em 05, 10 e 15 cm nos anos de 1984 e 1985, Cachoeira Paulista - SP.....	69
5.7 - Análise de Fourier. Variação da amplitude com a profundidade, harmônicos de 1 a 3, para o ciclo diário de temperatura em 05, 10 e 15 cm, Cachoeira Paulista - SP.....	78
5.8(a) - Histogramas para a difusividade térmica na camada entre 05-10 cm, anos de 1984 e 1985, obtida pelo método do " Range " - Cachoeira Paulista - SP.....	82
5.8(b) - Histogramas para a difusividade térmica na camada entre 05-15 cm, anos de 1984 e 1985, obtida pelo método do " Range " - Cachoeira Paulista - SP.....	83

5.8(c)	- Histogramas para a difusividade térmica na camada entre 10-15 cm, anos de 1984 e 1985, obtida pelo método do " Range " - Cachoeira Paulista - SP.....	84
5.9(a)	- Histogramas para a difusividade térmica na camada entre 05-10 cm, anos de 1984 e 1985, obtida pela Defasagem - Cachoeira Paulista - SP....	87
5.9(b)	- Histogramas para a difusividade térmica na camada entre 05-15 cm, anos de 1984 e 1985, obtida pela Defasagem - Cachoeira Paulista - SP....	88
5.9(c)	- Histogramas para a difusividade térmica na camada entre 10-15 cm, anos de 1984 e 1985, obtida pela Defasagem - Cachoeira Paulista - SP....	89
5.10(a)	- Valores da difusividade térmica para o ciclo diário em 05/03/85, 08/04/85, 25/07/85 e 07/11/85, através do método do " Range " - Cachoeira Paulista - SP.....	99
5.10(b)	- Valores da difusividade térmica para o ciclo diário em 05/03/85, 08/04/85, 25/07/85 e 07/11/85, através da Defasagem - Cachoeira Paulista - SP.....	99
5.10(c)	- Valores da difusividade térmica para o ciclo diário em 05/03/85, 08/04/85, 25/07/85 e 07/11/85, através da Amplitude do primeiro harmônico da Série de Fourier - Cachoeira Paulista - SP.....	100
5.10(d)	- Valores da difusividade térmica para o ciclo diário em 05/03/85, 08/04/85, 25/07/85 e 07/11/85, através da Fase do primeiro harmônico da Série de Fourier - Cachoeira Paulista - SP..	100



LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
3.1 - Dias característicos para o estudo do ciclo diário de temperatura	27
3.2 - Análise granulométrica e mineralógica de uma amostra do solo de Cachoeira Paulista - SP.....	30
5.1 - Análise de Fourier para temperaturas médias mensais, ano de 1984, profundidades de 05, 10 e 15 cm, harmônicos de 1 a 3 - Cachoeira Paulista - SP.....	66
5.2 - Análise de Fourier para temperaturas médias mensais, ano de 1985, profundidades de 05, 10 e 15 cm, harmônicos de 1 a 3 - Cachoeira Paulista - SP.....	66
5.3 - Porcentagem da variância para os harmônicos de 1 a 3, ciclo anual de 1984 e 1985.....	68
5.4 - Análise de Fourier para temperaturas médias mensais, ciclo sazonal de 1984, profundidades de 05, 10 e 15, harmônicos de 1 a 3 - Cachoeira Paulista - SP.....	71
5.5 - Análise de Fourier para temperaturas médias mensais, ciclo sazonal de 1985, profundidades de 05, 10 e 15, harmônicos de 1 a 3 - Cachoeira Paulista - SP.....	72
5.6 - Porcentagem da variância para os harmônicos de 1 a 3, ciclo sazonal de 1984.....	73
5.7 - Porcentagem da variância para os harmônicos de 1 a 3, ciclo sazonal de 1985.....	74
5.8 - Análise de Fourier para temperaturas médias diárias, profundidades de 05, 10 e 15 cm; harmônicos de 1 a 3, Cachoeira Paulista - SP.....	75
5.9 - Porcentagem da variância para os harmônicos de 1 a 3, ciclo diário em 05/03/85, 08/04/85, 25/07/85 e 07/11/85 - Cachoeira Paulista - SP.....	77
5.10 - Difusividade térmica ($k \text{ cm}^2/\text{s}$) para as camadas 05-10 cm, 05-15 cm e 10-15 cm a partir do método do "range", ciclo anual de 1984 e 1985 - Cachoeira Paulista - SP.	81

5.11 - Difusividade térmica ($K\text{ cm}^2/\text{s}$) para as camadas 05-10 cm, 05-15 cm e 10-15 cm a partir da defasagem, ciclo anual de 1984 e 1985 - Cachoeira Paulista - SP.....	86
5.12 - Difusividade térmica ($K\text{ cm}^2/\text{s}$) para as camadas 05-10 cm, 05-15 cm e 10-15 cm a partir da amplitude e fase do primeiro harmônico da Série de Fourier, ciclo anual de 1984 e 1985 - Cachoeira Paulista - SP.....	90
5.13 - Difusividade térmica ($K\text{ cm}^2/\text{s}$) para as camadas 05-10 cm, 05-15 cm e 10-15 cm a partir da defasagem, ciclo sazonal de 1984 e 1985 - Cachoeira Paulista - SP....	92
5.14 - Difusividade térmica ($K\text{ cm}^2/\text{s}$) para as camadas 05-10 cm, 05-15 cm e 10-15 cm a partir da amplitude e fase do primeiro harmônico da Série de Fourier, ciclo sazonal de 1984 e 1985 - Cachoeira Paulista - SP....	93
5.15 - Difusividade térmica ($K\text{ cm}^2/\text{s}$) para as camadas 05-10 cm, 05-15 cm e 10-15 cm a partir do método do "range" para o ciclo diário - Cachoeira Paulista - SP.....	95
5.16 - Difusividade térmica ($K\text{ cm}^2/\text{s}$) para as camadas 05-10 cm, 05-15 cm e 10-15 cm a partir da defasagem para o ciclo diário - Cachoeira Paulista - SP.....	96
5.17 - Difusividade térmica ($K\text{ cm}^2/\text{s}$) para as camadas 05-10 cm, 05-15 cm e 10-15 cm a partir da amplitude e fase do primeiro harmônico da Série de Fourier para o ciclo diário - Cachoeira Paulista - SP.....	98

LISTA DE SÍMBOLOS

- a_0, \dots, a_4 - Coeficientes polinomiais
 a_j - Coeficiente da parte seno do j-ésimo harmônico da Série de Fourier
 A_0 - Amplitude da onda de temperatura na superfície
 A_1, A_2 - Amplitude de oscilação da onda de temperatura nos níveis de referência
 A_j - Amplitude do j-ésimo harmônico na expansão de Fourier
 b_j - Coeficiente da parte cosseno do j-ésimo harmônico da Série de Fourier
 c - Capacidade calorífica do solo (watt $m^{-3}s \text{ } ^\circ C$)
 C - Capacidade volumétrica de calor (watt $m^{-3}s \text{ } ^\circ C$)
 D - Profundidade de amortecimento (m)
 $G (Z, t)$ - Fluxo de calor por unidade de área e tempo (watt m^{-2})
 j - Número de harmônicos da Série de Fourier
 K - Difusividade térmica ($m^2 s^{-1}$)
 L - Defasagem da temperatura máxima nos níveis de referência (s)
 M - Massa de uma substância (kg)
 N - Número de observações diárias de temperatura
 P - Período de oscilação da onda de temperatura (s)
 Q - Escoamento total de calor (watt m^{-3})
 R - Range diário de temperatura ($^\circ C$)
 R_1, R_2 - Ranges à profundidade de referência ($^\circ C$)
 s - Calor específico (watt s $kg^{-1}^\circ C^{-1}$)

t	- Tempo (s)
T	- Temperatura (°C)
T_i	- Temperatura no instante inicial (°C)
T_f	- Temperatura no instante final (°C)
T_o	- Amplitude média diária ou anual (°C)
$T(0,t)$	- Temperatura à superfície, no instante t (°C)
$T(Z,t)$	- Temperatura à profundidade Z , no instante t (°C)
T_1	- Temperatura à superfície (°C)
T	- Temperatura média mensal, sazonal, anual (°C)
w	- Frequência angular de oscilação (rad seg ⁻¹)
w_j	- Ângulo de tempo (rad)
X	- Dia (escala de 1 a 365)
X_i	- Dia específico
X_m, X_o, X_w	- Frações volumétricas de material mineral, matéria orgânica e água, respectivamente (m)
Y_i	- Temperatura específica (escala de 1 a 36)
Z	- Profundidade (m)
Z_1, Z_2	- Níveis de profundidade de referência (m)
$\Delta t_{\text{máx}(1)}$	- Instante de máxima temperatura no nível 1 de referência (s)
$\Delta t_{\text{máx}(2)}$	- Instante de máxima temperatura no nível 2 de referência (s)
$\partial T / \partial t$	- Variação local de temperatura (°C s ⁻¹)
$\partial T / \partial Z$	- Gradiente vertical de temperatura (°C m ⁻¹)
λ	- Condutibilidade térmica (watt m ⁻¹ °C)

- ρ - Densidade de uma substância. (kg m^{-3})
- ϕ - Ângulo de fase da onda de temperatura (rad)
- ϕ_j - Ângulo de fase do j-ésimo harmônico da Série de Fourier (rad)

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

As propriedades térmicas do solo e o seu comportamento, com relação aos fluxos de calor e à interação com o ar atmosférico, têm sido objeto de estudos dos micrometeorologistas interessados em diagnosticar e prognosticar fenômenos locais como geadas, orvalho, fluxos de água no solo, balanços energéticos e previsão de temperaturas máximas e mínimas.

A temperatura do solo é um dos fatores que controlam o crescimento e o desenvolvimento dos vegetais. Assim, a germinação das sementes, a taxa e duração do crescimento das plantas, a incidência de pragas e doenças, a absorção de nutrientes e a difusão da água e dos gases, dependem das variações de temperatura do solo. A presença de uma cobertura vegetal numa área antes não vegetada induz modificação nos elementos do clima, ou seja, variações de temperatura do ar, do solo, evatranspiração, umidade do ar, velocidade do vento, com uma consequente alteração no clima local.

A atmosfera da Terra é essencialmente uma máquina térmica e a energia radiante emitida pelo sol é responsável pela manutenção dos processos naturais que ocorrem na biosfera.

No balanço de energia da superfície terrestre um dos termos envolvidos é o do armazenamento de energia no solo que determina os

regimes de temperatura os quais, dependem de características físicas do substrato tais como estrutura, textura, cor, inclinação, cobertura da superfície, calor específico, condutibilidade térmica e difusividade térmica.

A variação do perfil da temperatura do solo constitui-se num dos elementos mais importantes na caracterização do seu microclima. Torna-se, por isso, relevante conhecer a sua variação para melhor entendimento dos fenômenos relacionados aos balanços energéticos.

Considerando-se a condução como o mecanismo primário responsável pela transferência de calor no solo, conclui-se que o estudo da difusividade térmica deve ser feito com base nessa característica. A difusividade térmica pode ser estimada através das observações das temperaturas máximas e mínimas diárias de duas profundidades no perfil do solo, sobre um determinado período de tempo. Várias tentativas têm sido realizadas para se estimar a difusividade térmica a partir de medidas da temperatura das camadas superficiais.

Como a temperatura do solo varia num padrão quase regular, ela reflete os ciclos diário e anual da radiação solar. As condições do tempo, tais como nebulosidade, chuva, períodos de aquecimento e resfriamento podem gerar flutuações que se superpõem sobre os ciclos regulares, porém estas flutuações podem ser removidas e os ciclos regulares isolados e estudados através de dados médios sobre um intervalo de tempo conveniente. Sendo assim, os dados médios podem ser trabalhados por meio da análise de Fourier, reduzindo as curvas de tempo versus temperatura para uma série de coeficientes de Fourier. Estes coeficientes dão uma descrição objetiva da variação da amplitude da onda de temperatura com a profundidade. Em adição, um estudo da variação dos coeficientes de Fourier com a profundidade fornece informações sobre os

processos de transferência de calor e sobre as propriedades térmicas do solo.

Além da análise harmônica, existem outras técnicas para a estimativa das temperaturas do solo que envolvem regressão linear ou regressão múltipla e utilizam outros elementos do clima.

As temperaturas do solo sob várias condições de superfície podem ser estimadas através de modelos empíricos ou físicos. Os modelos empíricos baseiam-se nas relações estatísticas entre temperatura do solo em alguma profundidade e elementos climáticos e do solo. São fáceis de serem utilizados e necessitam apenas de uma pequena calculadora para solução porém, é necessário uma série longa de dados para desenvolvimento dos coeficientes quando estes modelos são estendidos para outras situações. Os modelos físicos baseiam-se nos princípios de transferência de calor no solo e são de difícil utilização pois exigem grande número de variáveis de entrada e um profundo conhecimento de técnicas de análise numérica e de computação.

A umidade é um importante regulador dos processos térmicos no solo. Portanto, os perfís de umidade devem ser investigados já que a difusividade térmica pode aumentar ou diminuir por influência do conteúdo de umidade que por sua vez, altera as relações no sistema solo-planta.

Quando a superfície do solo é aquecida pela radiação solar incidente, um gradiente vertical de temperatura é estabelecido, em que o escoamento de calor é positivo e a temperatura diminui com o aumento da profundidade. Este escoamento será proporcional a condutibilidade térmica, que por sua vez é uma função da composição, conteúdo de umidade e temperatura do solo. Deve existir então, uma dependência

específica da difusividade térmica sobre o conteúdo de umidade do solo em diferentes estações do ano (período de seca e excesso de umidade).

Durante as fases de germinação e crescimento inicial da cultura verifica-se acentuada influência da temperatura do solo, quando a camada superficial está sujeita a grandes amplitudes térmicas diárias. Como as propriedades térmicas variam de solo para solo e, para um mesmo solo, principalmente com o seu teor de umidade, o presente trabalho visou analisar o comportamento da temperatura de um solo argiloso, característico da região de Cachoeira Paulista, SP., considerando a variação anual (ano seco e chuvoso), a variação sazonal e a variação diária (dia descoberto e nublado). As temperaturas observadas às profundidades de 05, 10 e 15 cm, em condições de solo nú, foram expandidas em séries de Fourier de senos e cossenos e os três primeiros harmônicos analisados e discutidos. A partir da amplitude e fase do primeiro harmônico e através do método do "range" (diferença entre a temperatura máxima e mínima) e da defasagem, foi estimada a difusividade térmica. Foram avaliadas as difusividades através dos vários métodos e suas variações em épocas secas e chuvosas. A condutibilidade térmica do solo foi estimada considerando-se o calor específico médio obtido em laboratório.

CAPÍTULO 2

REVISÃO DA LITERATURA

Assumindo que a temperatura da superfície do solo pode ser representada com suficiente aproximação por um pequeno número de termos de Série de Fourier, e que a perda de energia por vários efeitos, tais como evaporação, é proporcional à temperatura da superfície, pode-se mostrar que cada harmônico da variação da temperatura é determinado pela variação diária da radiação global, bem como as mudanças na amplitude e ângulo de fase de cada termo são funções da capacidade calorífica e condutibilidade térmica do solo. Deve haver uma conexão entre a variação diária da radiação global, que é normalmente quasi-simétrica com relação ao meio dia, e aquela da temperatura da superfície que, ao contrário, tem um aspecto característico não simétrico. Assim, Lönnqvist(1961) usando os quatros primeiros termos da Série de Fourier procurou encontrar a conexão entre as duas curvas, isto é, tentou apresentar os meios para ajustar uma curva diária de temperatura à correspondente curva de radiação. A expressão resultante da aproximação teórica foi satisfatoriamente testada contra dados observados. As amplitudes e fases dos harmônicos apresentaram boa concordância com os valores da insolação e temperatura da superfície, exceto o quarto harmônico, e isto pode ser explicado pelo fato que este harmônico é o mais afetado por erros observacionais na radiação e na temperatura.

Dados de temperatura do ar, altura de 1,50 m, juntamente com dados de temperaturas do solo colecionados em sete profundidades

(1, 10, 20, 100, 205 e 884 cm) nos anos de 1953, 1954 e 1955 coletados em Argonne, Illinois, foram submetidos a Análise de Série de Fourier por Carson (1963). Os coeficientes forneceram uma medida objetiva das variações da amplitude e fase com a profundidade dos ciclos diários e anuais das temperaturas do solo. Foram feitas estimativas da difusividade térmica da camada de solo entre cada uma das sondagens de temperatura usando o primeiro harmônico da onda anual da temperatura do solo. Os valores encontrados pelos dois métodos estão em concordância com aqueles encontrados por outros investigadores para solos com as mesmas características. Usando ainda as relações de amplitude e fase determinou-se as difusividades térmicas nos primeiros 50 cm do solo a partir do primeiro harmônico do ciclo diário de temperatura para cada mês. Para os meses de verão, os valores estão em boa concordância com aqueles computados por meio do ciclo anual e com outros dados publicados porém, na camada de 1 a 10 cm em todas as estações e, em outras camadas durante a estação de inverno, os valores computados divergem dos publicados, principalmente na camada entre 1 e 10 cm para os meses de janeiro e fevereiro, o que comprova que a teoria de transferência de calor desenvolvida para meio homogêneo não se aplica para os primeiros 10 cm do solo. É interessante notar que estimativas das difusividades térmicas do solo a partir de médias anuais da temperatura geralmente estão consistentes com os valores medidos, ao passo que cálculos usando o ciclo diário nem sempre apresentam boa concordância. Isto parece indicar que mecanismos não condutivos de transferência de calor são comuns nas camadas superiores do solo, mas a utilização de médias anuais (exceto para os 10 cm do topo) minimizam esta importância.

Khatry et alii (1978) analisaram as variações anuais e diárias das temperaturas para o solo do Kuwait, Oriente Médio. Para a análise, derivaram uma expressão explícita para a temperatura como uma função do tempo e da profundidade, considerando a periodicidade da

radiação solar e temperatura atmosférica. Esta análise, numa primeira aproximação, pode ser aplicada para calcular a transferência de calor entre as camadas do solo.

A análise harmônica foi utilizada por Mohana Rao e Tommaselli(1982) para avaliação do comportamento térmico (ciclo anual) do solo de Presidente Prudente, SP. As difusividades térmicas estimadas pelos métodos da amplitude e fase do primeiro harmônico foram razoáveis, ainda que não tenha sido possível compará-las com outros métodos. Outra restrição encontra-se nos horários de observações das temperaturas (7, 14, 21 horas locais) já que os mesmos não definem exatamente a onda de calor.

Conhecendo-se a temperatura e a capacidade calorífica do solo como funções do tempo e da profundidade calcula-se a energia armazenada pelo solo por unidade de área. Um parâmetro de considerável interesse para meteorologistas e climatologistas é a quantidade de energia armazenada no solo durante o verão e que retorna para a atmosfera durante a estação de inverno. Com este propósito, Carson e Moses (1963) e Ramanadham e Viswanadham (1966) apresentaram os ciclos diários e anuais da temperatura do solo a partir de dados de Argonne, Illinois, e Waltair, Índia, respectivamente. A quantidade de energia armazenada (ou perdida) por unidade de área do solo foi calculado para aqueles locais e deram informações significativas sobre a capacidade calorífica.

Quatro técnicas estão disponíveis para medir ou estimar o fluxo de calor nos solos, a saber:

a) Método do Gradiente de Temperatura - Em princípio, o fluxo de calor é dado por

$$G = - \lambda (\partial T / \partial Z) \quad (2.1)$$

onde λ é a condutibilidade térmica e $\partial T / \partial Z$ é o gradiente vertical de temperatura . Este método é difícil de ser utilizado já que os gradientes de temperatura e a condutibilidade térmica variam rapidamente com o tempo e profundidade e também são difíceis de serem medidos precisamente, especialmente próximo à superfície do solo. Em adição o calor é transportado através do solo por outros processos, tais como difusão do vapor d água e pelo movimento da água líquida e do ar do solo.

b) Método da placa - O instrumento utilizado para medir o fluxo de calor consiste numa placa estreita de um material (geralmente plástico) cuja condutibilidade térmica seja conhecida. Esta placa é colocada no solo, normal à direção do escoamento de calor. O gradiente térmico que atravessa a placa é medido e o fluxo de calor através da placa (e portanto no solo) pode então ser calculado a partir da equação (2.1). A vantagem deste método consiste em se medir diretamente o fluxo de calor bem como, várias placas podem ser colocadas em diferentes locais proporcionando uma amostragem mais representativa.

c) Método de Propagação de Energia - A estimativa da energia armazenada pelo solo pode ser obtida aplicando-se a teoria do escoamento de calor num meio homogêneo, semi-infinito. A taxa de condução da energia (calor) através de uma área unitária do solo é dada pela equação (2.1). Esta equação pode ser integrada em relação ao tempo para obter-se a quantidade de energia que atravessa o solo, caso a condutibilidade térmica e a temperatura, como funções do tempo e da profundidade, sejam conhecidas.

A onda de temperatura diária ou anual em algum tempo t na superfície do solo pode ser aproximada pela função seno

$$T (Z, t) = \bar{T} + A_o \operatorname{sen} \left(\frac{2\pi t}{P} + \phi \right) \quad (2.2)$$

onde A_o é a amplitude da onda de temperatura na superfície, \bar{T} é a temperatura média, P é o período da onda, e ϕ é o ângulo de fase. Assumindo que o solo é um meio homogêneo, semi-infinito, a temperatura na profundidade Z e tempo t é igual a:

$$T (Z, t) = \bar{T} + A_o \exp \left(- Z \sqrt{\frac{\pi}{PK}} \right) \operatorname{sen} \left(\frac{2\pi t}{P} + \phi - Z \sqrt{\frac{\pi}{PK}} \right) \quad (2.3)$$

onde K é a difusividade térmica do solo. Esta é a equação da onda defasada, "amortecida".

Substituindo a equação (2.3) em (2.1) e integrando desde zero até metade de um ciclo de temperatura chega-se ao escoamento total de calor através da superfície por unidade de área, Q , igual a

$$Q = \int_0^{1/2} G dt = A_o \sqrt{\frac{2P}{\pi}} \quad C \sqrt{K} = A_o \sqrt{\frac{2PC\lambda}{\pi}} \quad (2.4)$$

onde C é a capacidade volumétrica de calor. Esta capacidade volumétrica de calor é o produto ρs , onde ρ é a densidade e s é o calor específico. Esta equação mostra que o armazenamento de energia por unidade de área é proporcional a raiz quadrada do produto do período e o fator $(C\lambda)$, a capacidade condutiva do meio.

A combinação das propriedades físicas de um meio que pode

ser representada por $(CK)^{1/2} = (\lambda C)^{1/2}$ desempenha um papel crítico nos problemas referentes a transferência de calor em superfícies descontínuas, tais como a superfície terrestre. O nome dado a este termo por Businger e Buettner (1961) foi "coeficiente de contacto térmico".

d) Método Integral de Temperatura ou Método Calorimétrico - O fluxo de calor no solo é computado a partir da mudança no armazenamento de energia no perfil do solo sobre um dado intervalo de tempo. Este método exige a determinação da capacidade calorífica volumétrica do solo em algumas profundidades, que é estimado a partir das medidas da densidade, do volume e do conteúdo de água usando-se a equação de deVries (1963):

$$C = 0,46X_m + 0,60X_o + X_w \quad (2.5)$$

onde X_m , X_o e X_w são as frações de volume dos minerais, matéria orgânica e água, respectivamente. Nos solos minerais as mudanças na temperatura ocorrem nos primeiros 50 cm, as medidas podem ser confinadas a uma zona relativamente pouco profunda. Assim, o número de medidas do fluxo de calor no solo deve ser grande.

Idealmente, os métodos para determinar fluxos de calor no solo não exigiriam calibração, não interfeririam com o movimento de umidade no solo e seriam necessárias poucas medidas em cada intervalo de tempo. Horton e Wierenga (1983) descreveram o método, utilizando termômetros de resistência ou termopares conectados em paralelo para determinar as mudanças na temperatura média do perfil do solo. O método só se mostrou apropriado para solos com capacidade calorífica volumétrica uniforme além de exigir equipamentos altamente sensíveis para determinar com precisão as pequenas variações na temperatura média do perfil do solo em curtos intervalos de tempo. O uso do método é limitado

quando se considera as condições do solo e da instrumentação. Faz-se necessário então o desenvolvimento de um método simples e preciso para a estimativa do fluxo de calor que considere várias condições no solo.

Horton e Wierenga (1983) estudaram o fluxo de calor no solo por um outro método (analítico) que exigiu observações de temperatura e umidade, somente na superfície e os resultados foram comparados com valores do fluxo de calor determinados através do método integral de temperatura. No método analítico a equação utilizada para o cálculo do fluxo de calor em todas as profundidades e tempos foi a seguinte:

$$G (Z, t) = \sum_{j=1}^N \{ A_j C \sqrt{jwK} \exp (- Z \sqrt{\frac{jw}{2K}}) \sin [jwt + \phi_j + \frac{\pi}{4} - Z \sqrt{\frac{jw}{2K}}] \} \quad (2.6)$$

onde K é a difusividade térmica aparente, C é a capacidade volumétrica de calor, j é o número de harmônicos, A_j e ϕ_j a amplitude e ângulo de fase, respectivamente, do j-ésimo harmônico para a temperatura limite superior e w é a frequência radial igual a $2\pi/P$ com P sendo o período do ciclo fundamental. Portanto, a equação (2.6) representa o fluxo de calor, positivo para baixo, num perfil de solo homogêneo com a temperatura na superfície descrita por uma Série de Fourier e com uma profundidade no perfil com temperatura constante (média temporal da temperatura do solo). Para cálculo do fluxo de calor usando-se a equação (2.6) é necessário conhecer A_j e ϕ_j para a temperatura numa profundidade, bem como K e C para o solo. O método analítico, equação (2.6), para estimar fluxo de calor no solo apresenta algumas vantagens sobre os métodos prévios citados. Primeiro, é melhor determinar a difusividade térmica média aparente para uma camada do solo do que determinar a condutibilidade térmica aparente para uma profundidade específica como

é exigido pelo método do gradiente de temperatura. Também o método analítico não é tão sensível para imprecisões em λ quanto é o método do gradiente de temperatura. O fluxo de calor na superfície determinado pelo método do gradiente é diretamente proporcional ao valor de λ , enquanto que o fluxo de calor na superfície determinado pelo método analítico é diretamente proporcional à raiz quadrada de K . Segundo, o método analítico baseia-se em observações de temperatura, que podem ser feitas com pequenos sensores instalados com distúrbio mínimo para o solo e que não sofrem interferências com o movimento de água e calor. Utilizando termopares como sensores de temperatura, nenhuma calibração individual é necessária. Terceiro, as medidas de temperatura e conteúdo de água são feitas somente em duas ou três profundidades enquanto que no método integral é necessário mais observações destes parâmetros. Finalmente, este método é vantajoso comparado aos métodos de temperaturas médias porque exige medidas somente nos 20 cm superiores do perfil do solo, enquanto que os últimos exigem medidas até a profundidade de 50 cm ou mais. Como as variações de temperatura são mais pronunciadas no perfil superior do solo, o método analítico é de fato mais útil e permite determinação mais precisa da difusividade térmica. Os valores de K não são importantes para estimar fluxos de calor, mas eles podem ser usados para estimar a temperatura no solo. Se K é conhecido para um perfil particular do solo, observações de temperatura são exigidas somente em uma profundidade para a estimativa de fluxo e/ou temperatura no solo. A desvantagem do método analítico é a exigência de maior computação, quando comparado com os métodos de temperaturas médias.

Um modelo numérico para investigar o balanço de energia sobre a superfície do solo com interesse específico na umidade foi desenvolvido por Sasamori (1970). Tal modelo simula as trocas de umidade e calor entre a atmosfera e o solo com as respectivas equações usando condições físicas na interface solo-atmosfera, isto é, conservação de

massa e energia e o equilíbrio termodinâmico local da temperatura e umidade. Investigou-se o balanço de energia numa superfície de solo nua e o modelo simulou características distintas dependendo da umidade do solo. Se a superfície é suficientemente úmida, a maior parte da energia radiativa é transformada em calor latente liberado para a atmosfera, ao passo que com deficiência de água o calor latente é desprezível e a maior parte da radiação líquida é transformada em calor sensível. Comparação entre os resultados calculados e os observados mostraram-se favoráveis.

Schildge et alii (1982) simularam as variações diárias da temperatura e do conteúdo de umidade no solo para um campo cultivado através de um modelo integrado, isto é, combinando um modelo numérico com medidas de campo. Assumindo que o solo é um meio homogêneo e negligenciando os efeitos de histerese, o algoritmo consistiu de um par acoplado de equações tipo difusão (para escoamento de calor e de umidade), sujeitas a uma série específica de condições limite e inicial, e uma equação de fluxo de umidade. Foi obtida uma boa concordância entre os valores calculados e os observados, particularmente nas variações diárias de temperatura. As dificuldades na utilização deste modelo numérico ocorrem por causa das suposições feitas no estabelecimento do modelo, isto é, homogeneidade vertical e horizontal do meio, não consideram os efeitos de histerese, além de outras dificuldades relacionadas à precisão das medidas de campo. Nenhum efeito diário significativo na variação da umidade abaixo de 4 cm foi notado, embora houvesse alguma indicação a partir das observações, que estes efeitos deveriam estender-se além desta profundidade.

Como a difusividade térmica controla a transferência de calor no perfil do solo, existem alguns métodos para sua estimativa direta em laboratório ou por medidas de campo. A estimativa indireta pode

ser feita através da observação de variações da temperatura. A maioria destes métodos baseiam-se em soluções da equação unidimensional da condução de calor com difusividade constante, e portanto aplicam-se somente para solos uniformes. Existem ainda métodos para determinação da difusividade térmica em solos não homogêneos e para utilização de tais métodos exige-se medidas da temperatura do solo com o tempo, para a superfície e algumas profundidades da sub-superfície. Estes têm a sua aplicação limitada devido à falta de dados de temperatura do solo e também porque não apresentam resultados altamente satisfatórios quando aplicados para os 10 cm superiores do perfil do solo. Usando então métodos que assumem difusividade térmica independente da profundidade, Viswanadham e Mohana Rao (1972) estimaram-na para os solos de São José dos Campos, SP, e Arapongas, PR, através dos métodos do "range" e da defasagem. Os resultados concordaram com aqueles obtidos por outras técnicas. Ramana Rao e Vianello (1977) calcularam a difusividade térmica para Cachoeira Paulista, SP, através da amplitude e fase do primeiro harmônico da Série de Fourier e os resultados obtidos mostraram-se coerentes com análises similares para outras regiões tropicais embora os valores não tenham sido idênticos entre si como demonstra a teoria clássica.

Avaliações dos métodos para determinar a difusividade térmica aparente do solo têm sido feitas para diferentes locais e profundidades específicas. Horton et alii (1983) usaram dados de temperatura do solo para calcular a difusividade térmica dos primeiros 10 cm superiores do perfil do solo com seis métodos diferentes (Equação da Amplitude (1), Equação de Fase (2), Equação Arco-tangente (3), Equação Logarítmica (4), Equação Harmônica (5) e Método Numérico(6)). O objetivo deste trabalho consistiu em analisar as limitações dos seis métodos para calcular as difusividades térmicas levando-se em conta a quantidade e qualidade dos dados de temperaturas exigidos. Concluiu-se

que os métodos (1), (2), (3) e (4) estabelecem equações explícitas para a difusividade, exigem poucas medidas de temperaturas e os cálculos são fáceis de serem obtidos porém, os resultados, em geral, foram inconsistentes com estimativas conhecidas e mais confiáveis. Os métodos (5) e (6) necessitam de maior número de medidas de temperaturas, mas em geral estabeleceram estimativas mais confiáveis. Os valores da difusividade térmica calculados por ambos os métodos foram usados na previsão de temperaturas do solo para comparação com temperaturas medidas e os resultados foram satisfatórios, mesmo sob condições de nebulosidade parcial. O método (6) exige de doze a vinte e quatro medidas de temperatura por dia em três profundidades, enquanto que o método (5) exige somente oito a doze medidas, o que faz com que seja recomendado como o mais vantajoso para determinação da difusividade térmica próxima do solo. Persaud e Chang (1985) avaliaram as difusividades térmicas usando medidas de temperatura máximas e mínimas diárias do solo nas profundidades de 10 e 20 cm em situações de solo nú e coberto com grama. Quatro métodos foram usados na avaliação e todos eles basearam-se em análises de transferência de calor no perfil do solo por condução. Os resultados obtidos a partir dos quatro métodos não estão em concordância e as discrepâncias são maiores quando utilizou-se dados para solos cobertos com grama. São feitas restrições a estes métodos já que não existe um meio de distinguir os erros de observações puramente aleatórios e os efeitos ambientais sistemáticos e aleatórios tais como variações no conteúdo de umidade e outras propriedades físicas nas medidas de temperatura. A não ser que os resultados sejam comparados com medidas simultâneas diretas é difícil julgar qual o melhor método para estimar indiretamente a difusividade térmica a partir de medidas de temperatura no perfil do solo.

. Uma expressão matemática (polinomial de quarto grau) foi derivada por Meikle e Treadway (1979) para calcular as temperaturas

máxima e mínima do solo a profundidade de 10 cm para algum dia do ano em 114 locais nos Estados Unidos. Incluiu-se uma compilação dos coeficientes apropriados para as regressões polinomiais para cada local. A expressão polinomial foi a seguinte:

$$\text{Temperatura} = a_0 + a_1X + a_2X^2 + a_3X^3 + a_4X^4 \quad (2.7)$$

onde X é o dia numa escala de 1 até 365 e a temperatura é em °F. Este tipo de equação tem a excelente propriedade de ajustar uma série de dados, se um número suficiente de termos forem utilizados. Para cálculo dos polinômios utilizou-se um programa de computador que determinou os mínimos quadrados e ajuste de quarto grau para os dados emparelhados (X_i, Y_i) . Estes dados (X_i, Y_i) foram o dia do ano e a temperatura do solo, respectivamente. Avaliação destes polinômios dão temperaturas do solo para o dia selecionado e os valores foram considerados satisfatórios. Trabalho semelhante foi feito por Meikle e Treadway (1981) para 52 locais no Canadá e os resultados também foram satisfatórios. A fonte de dados de temperaturas do solo para elaboração dos polinômios apropriados foram publicações do Governo dos Estados Unidos (dados climatológicos) e publicações do Governo do Canadá, respectivamente.

Vários métodos para estimar temperaturas do solo têm sido usado pelos cientistas, frequentemente com variáveis diferentes, mas comparações entre os métodos de estimativa são raras e limitadas. Assim, Bockock et alii (1977) utilizaram seis métodos diferentes para estimar temperaturas médias semanais do solo nas profundidades de 0 e 50 cm numa região de mata com folhas caducas. Os métodos utilizados foram (1) regressão linear da temperatura do solo a partir da temperatura do ar; (2) regressão múltipla da temperatura do solo a partir de outras variáveis climáticas; (3) - (6) análises harmônicas usando curvas médias seno da temperatura do solo e ar e desvios a partir destas para

anos particulares. Dados dentro de um período de três anos (agosto de 1966 à julho de 1969) foram usados para estabelecer as estimativas de temperaturas e a eficiência foi testada usando-se observações de temperaturas do solo de um período maior (agosto de 1966 à novembro de 1970). Dentro do período de registros, o método de regressão linear forneceu estimativas menos precisas, com pouca diferença em relação aos outros métodos. Fora do período, temperatura do solo foi super-estimada por todos os métodos, sendo que, análises harmônicas dão estimativas mais precisas. Cabe salientar que, independente da precisão da estimativa, outra consideração essencial na escolha entre os métodos é a conveniência e o custo da coleta e o processamento dos dados. Se dados para algumas variáveis climáticas têm que ser coletados e processados para outros propósitos além da estimativa de temperatura do solo, pode-se usar regressão linear convenientemente. Se apenas dados de temperaturas do ar são disponíveis os métodos harmônicos são os mais convenientes pois oferecem a vantagem de se usar curvas de temperatura baseando-se em dados meteorológicos de séries longas.

Num estudo de campo, Ghuman et alii (1982) investigaram o comportamento da temperatura do solo sob dois métodos de preparação de plantio de sementes em superfícies lisas e rugosas e sob dois materiais de cobertura sobre superfícies lisas (palha de arroz e pedaços de plástico transparente). Desenvolveram equações de regressões entre temperaturas máximas e mínimas medidas em algumas profundidades no solo e a correspondente temperatura do ar medida à 1 m acima da superfície, bem como determinaram o número de harmônicos necessário para descrever as temperaturas do solo em duas profundidades sob diferentes condições de superfície e dosséis de cultivos. Os resultados mostraram que a temperatura máxima do solo à profundidade de 1 cm na superfície rugosa foi 6°C mais alta e a temperatura mínima foi 2,5°C mais baixa do que aquelas observadas na superfície plana devido a maior exposição ao sol da

primeira superfície; esta exposição levou a maior absorção e perda de calor durante o dia e noite, respectivamente. As temperaturas médias mais altas em todas as profundidades sobre o plástico, comparado com o solo liso não coberto, foi devido ao chamado "efeito estufa" produzido sob o pedaço de plástico e que impediu a ventilação da superfície do solo. Conseqüentemente, o solo sob o plástico reteve maior conteúdo de água devido a reduzida evaporação causada pelo mesmo. As temperaturas do solo computadas a partir de equações de regressão utilizando temperatura do ar apresentaram boa concordância com os valores observados e a Análise de Fourier revelou a possibilidade de se descrever a temperatura à profundidade de 5 cm (isto é, próximo da superfície do solo) utilizando-se somente dois harmônicos enquanto que apenas o primeiro harmônico pode descrever a temperatura na profundidade de 35 cm. O referido estudo comprova a importância da utilização da Análise de Fourier no estudo do regime de temperatura num solo tropical (Ibadan, Nigéria) e apresentou bons resultados.

Um dos objetivos de se descrever modelos para estimar temperaturas do solo utilizando informações prontamente disponíveis é a necessidade de se manusear os efeitos de cultivos. Em alguns casos estas descrições de modelos devem cobrir períodos de um mês ou mais durante a estação de crescimento. Com esta finalidade muitos modelos têm sido desenvolvidos para estimar temperaturas do solo sob várias condições de superfície. Entre os modelos empíricos destacam-se um modelo linear de Toy et alii (1978) e um modelo senoidal de Parton e Logan (1981). O modelo linear estima as temperaturas médias anual, sazonal e mensal do solo utilizando somente dados de temperatura do ar em uma equação geral baseada em todos os meses e estações tomadas conjuntamente, assim como equações sazonais e equações para locais diferentes. O modelo senoidal estima variações diárias das temperaturas do solo e do ar conhecidas as suas temperaturas máximas e mínimas (solo e ar) e

utiliza ainda uma onda seno truncada para estimar temperaturas durante o dia e uma função exponencial para estimar temperaturas durante a noite. Um terceiro modelo empírico, mais específico, foi desenvolvido por Cruse et alii (1980) para estimar efeitos dos cultivos sobre as temperaturas médias diárias do solo à profundidade de 5 cm usando temperatura máxima e mínima do ar, taxa de radiação solar, velocidade do vento, conteúdo de umidade de água na referida profundidade e estágio de evaporação. As análises dos resultados obtidos com aplicação destes modelos, revelaram estimativas de temperaturas do solo com razoável precisão. Certas propriedades dinâmicas que não foram incluídas nestes modelos, parecem ser muito importantes. Médias de variação da rugosidade da superfície e frequência com a época das precipitações devem ser consideradas pois podem influir significativamente nos resultados.

Não há dúvida que modelos mais elaborados, baseando-se em variáveis do solo e elementos climáticos, possam ser desenvolvidos. Com tal finalidade, modelos físicos ou de troca de energia têm sido propostos, baseando-se em princípios de transferência de calor no solo. Gupta et alii (1981) descreveram um modelo para estimar temperaturas da zona da raiz e do limite superior de solos nús e cobertos com vários resíduos com e sem um cultivo de milho (*Zea Mays L.*). O modelo para estimativa de temperaturas do limite superior baseou-se na suposição que a diferença entre a temperatura horária do ar à altura de 2 m e a temperatura da superfície admite uma função seno. O modelo de temperatura da zona da raiz, por outro lado, baseou-se numa aproximação numérica da equação de transferência de calor e utiliza as estimativas de temperatura do limite superior como uma entrada para a sua previsão. As entradas para o modelo são temperaturas horárias do ar à altura de 2 m, temperaturas máximas e mínimas diárias da superfície, temperatura inicial do solo e perfís da difusividade térmica, estas estimadas a partir dos constituintes minerais do solo, porcentagem de matéria orgânica e dados da

densidade volumétrica do solo. Tal modelo, aplicado numa região do Centro de Pesquisas de Conservação do Solo em Morris, Minnesota, forneceu previsões diárias de temperaturas da zona da raiz utilizando temperaturas do limite superior da mesma. As estimativas diferiram em 2°C dos valores medidos sobre a maioria das estações de crescimento. Estas previsões são úteis para a modelagem do continuum atmosfera-planta-solo, onde os valores diários de temperatura do solo são necessários, e um erro de $+3^{\circ}\text{C}$ nas estimativas pode ser tolerado. Exemplos de aplicações são as modelagens de transformações de nitrogênio nos solos e previsões dos rendimentos de cultivos. Numa modificação do primeiro modelo, Gupta et alii (1982) estimaram as temperaturas de solo nú e solo com cobertura morta, com e sem cultivo de milho, com as seguintes entradas: temperaturas máximas e mínimas diárias do ar á altura de 2 m, temperatura inicial do solo e perfis da difusividade térmica. Nesta simplificação, as temperaturas horárias são estimadas e não medidas, reduzindo consideravelmente a quantidade de entradas de dados necessários para estimativa das temperaturas da zona da raiz. Os valores de temperaturas da zona da raiz previstas com este modelo foram úteis na decisão das datas de plantios.

Recentemente, Gupta et alii (1984) desenvolveram outro modelo para estimar temperaturas da superfície em vários tratamentos de cobertura cultura-resíduo, com e sem cultivos. Este modelo utiliza os primeiros dois harmônicos das Séries de Fourier e as relações entre as temperaturas máximas e mínimas diárias da superfície e do ar. As entradas para o modelo são temperatura máxima e mínima diária do ar, difusividade térmica do solo e coeficientes das Séries de Fourier ajustados para temperaturas médias normalizadas do solo. A aplicação deste modelo para um local da parte sul de Minnesota, estimou temperaturas do solo nas profundidades de 5 e 10 cm num período de 45 dias na primavera de 1980 com uma diferença média de 2°C e um desvio de não mais que $3,8^{\circ}\text{C}$

por quase todo o período. A vantagem na utilização deste modelo está na sua simplicidade, já que é possível fazer os cálculos usando somente uma calculadora de mão. A introdução de valores normalizados no lugar de temperaturas do solo além de simplificar o modelo, permite que se faça comparações entre os diferentes tratamentos e locais. Limitações ao modelo ocorrem face à suposição que a difusividade térmica não varia com relação a profundidade e tempo. Baseando-se no modelo, os autores desenvolveram um procedimento para estimar o fluxo de calor horário na superfície do solo sob diferentes condições de cultivos e resíduos com as seguintes entradas: temperaturas máxima e mínima diárias do ar, difusividade térmica e capacidade volumétrica da calor.

Um modelo semelhante ao de Gupta et alii (1981) para estimar temperaturas do solo, sob diferentes coberturas de cultivos e resíduos, foi desenvolvido por Parton e Logan (1984). Este modelo utiliza intervalo temporal de um dia para as estimativas de temperatura enquanto que aquele utiliza intervalo de uma hora. A vantagem desta modificação consistiu na redução do tempo de computação com resultados tão bons quanto àqueles obtidos com a simulação horária.

Nos modelos de previsão numérica do tempo, o cálculo do fluxo de calor na camada inferior é importante para assegurar previsões satisfatórias dos parâmetros meteorológicos. Assim, a temperatura da superfície bem como os fluxos de calor no solo, podem ser estimados através de modelos de superfície. Uma revisão de alguns destes modelos foi feita por Deardorf (1978) onde ele os avalia comparando-os com um modelo de referência mais complexo e que inclui uma equação de difusão de calor no solo. O modelo de referência, denominado modelo de multi-camadas, mostrou-se geralmente superior quando alguma forçante diária, por exemplo forçante solar, está presente e muitíssimo superior quando considera-se a suposição de superfícies isoladas. Deardorf fez

ainda uma parametrização da influência de uma camada vegetativa para avaliar o quanto sua inclusão afeta a temperatura da superfície e os fluxos líquidos de calor e umidade para a atmosfera. A presença da camada de vegetação pode ser ignorada se a taxa de evapotranspiração acima de uma densa camada de folhagem exceder a taxa de evaporação do solo nu por um fator superior a 2. Embora a introdução de tal parametrização aumente o tempo de computação das temperaturas da superfície é sempre bom considerá-la nos modelos de previsão atmosférica, dado os erros grosseiros que podem ocorrer quando a camada vegetativa é ignorada.

Cauteret et alii (1985) testaram os modelos estudados por Deardorf com dados experimentais obtidos na Costa do Marfim, oeste da África. Para a computação dos fluxos de calor latente e calor sensível e fluxo de calor na superfície assumiram que as propriedades físicas do solo são constantes e uniformes. As variáveis de entradas utilizadas foram temperaturas de bulbo seco e úmido, velocidade do vento no nível de 2 m e radiação global. As estimativas dos fluxos de calor latente e sensível concordaram bem com os dados experimentais e dentre os modelos testados, aquele que incluiu a condução de calor no solo apresentou melhores resultados enquanto que os modelos baseados em formulações empíricas foram menos satisfatórios. Contudo, com um modelo de duas camadas, as estimativas são aceitáveis.

Como citado anteriormente, as variações de temperatura na superfície do solo são uma função das propriedades térmicas do solo, cobertura, evaporação e fatores meteorológicos (temperatura do ar, radiação solar, vento, etc). Quando a superfície do solo está úmida a evaporação é o principal fator de controle da perda de calor. Depois que a camada da superfície seca e o suprimento de água no solo não pode suprir a demanda evaporativa, a perda de calor é largamente influenciada pela inércia térmica, definida como $(\rho c \lambda)^{1/2}$ onde ρ é a densidade, c é

o calor específico, e λ é a condutibilidade térmica, é uma indicação de uma resistência do solo para as variações na temperatura. Desde que ρ , c , λ de um solo aumenta enquanto o seu conteúdo de água aumenta, a amplitude resultante da onda diária de temperatura da superfície diminui. Portanto, temperaturas da superfície do solo nos períodos de máxima e mínima do ciclo diário de temperatura pode ser um indicador do conteúdo de água no solo.

Experimentos efetuados sobre um solo argiloso indicaram que o conceito de inércia térmica é razoavelmente correto. Idso et alii (1975) encontraram neste experimento significantes relações entre a amplitude diária de temperaturas da superfície do solo (solo nú) e o conteúdo de água na camada 0 - 4 cm, e entre a diferença de temperatura da superfície do solo-ar e o conteúdo de água no solo para o mesmo intervalo de profundidade. A relação temperatura versus conteúdo de água foi uma função do tipo de solo.

No Brasil, as estimativas de temperaturas dos solos obtidas por métodos não convencionais são raras, embora recentemente Nordemann et alii (1985) tenham medido temperaturas em alguns tipos de solos de regiões do estado de São Paulo utilizando um radiômetro PRT-5 na região do infravermelho. Simultaneamente, utilizaram também um actinógrafo para monitorar a energia solar incidente. O espectro de absorção óptica, entre os comprimentos de onda de 200 a 2000 nm, foram obtidos em laboratório para determinação do comportamento térmico das amostras. O espectro da energia solar pela superfície do solo foram correlacionados considerando-se os correspondentes intervalos de comprimentos de onda. Os resultados sugeriram que a espectroscopia fotoacústica é eficiente e pode ser usada como um método para seleção e definição prévia das larguras das bandas de ondas específicas para instrumentos sensores. Este método além de ser rápido e eficiente, dispensa qualquer tratamento

químico prévio das amostras e oferece a vantagem de eliminar a influência de certos parâmetros que não podem ser controlados sob condições de campo: quantidade de energia solar incidente e sua variação, granulometria, e conteúdo de umidade.

Atualmente a pesquisa está sendo dirigida para uma correta determinação da temperatura na superfície que, por sua vez, é muito importante nos Modelos de Circulação Atmosférica (ACMs) visto que as principais forças dirigentes originam-se na superfície. Sendo assim, os esforços concentram-se em resolver a camada limite com mais níveis do que no resto da troposfera. Yves Delage (1986) apresenta uma formulação que une a temperatura da superfície do solo e o fluxo de calor à temperatura do nível mais baixo no ACM, com um esquema bastante semelhante ao de Deardorf (1972). Dá-se atenção especial à inversão noturna da temperatura e uma integral em tempo é utilizada para gerar uma variação diária mais realística da temperatura da superfície. O modelo reproduziu satisfatoriamente o ciclo diário médio dos dados de Wangara, utilizando-se os perfis verticais observados para simular modelos atmosféricos com várias resoluções, embora a formulação não seja uma parametrização completa da camada limite. É conveniente então que outras parametrizações sejam incorporadas ao ACM para simular as trocas verticais entre os níveis interiores.

CAPÍTULO 3

DADOS

Para a análise harmônica e cálculo da difusividade térmica utilizou-se dados contínuos de temperatura do solo obtidos na Estação Climatológica Principal de Cachoeira Paulista, São Paulo, localizada na latitude 22°41' S, longitude 45°00' W e altitude de 574 m.

As temperaturas foram tomadas em três profundidades (05, 10 e 15 cm), sob condições de solo nú, por meio de termógrafos de mercúrio em metal de fabricação japonesa (OTA - DEIKI - SEISAKUSHO) instalados num abrigo meteorológico, cujo bulbo fica localizado a alguns metros da unidade de registro. O "range" de aplicação abrange temperaturas entre -30°C e +50°C e a precisão das medidas é aproximadamente 2% do "range" da escala. Estes termógrafos baseiam-se no efeito de dilatação a que se submete o mercúrio sob variação de temperatura. O elemento sensível consiste numa haste de imersão com o bulbo, um tubo de capilaridade e um tubo de Bourdon espiralado. Estas partes são preenchidas com mercúrio e formam um sistema único. Flutuações de temperatura provocam uma variação no volume de mercúrio contido no bulbo, e consequentemente, enquanto varia a pressão interna, elas agem sobre a mola espiral que por sua vez é dilatada ou contraída. Estes movimentos são passados para um registrador através de um mecanismo de transmissão.

Os termogramas ou diagramas dos termógrafos são impressos de forma retangular cuja escala horizontal representa o tempo (período

semanal) e a vertical, a temperatura, em unidades Celsius. Foram utilizados os valores de temperatura do período de 01 de janeiro de 1984 a 31 de dezembro de 1985.

Com base em dados de precipitação, foram estudados os ciclos anuais e sazonais das variações das temperaturas e executados os cálculos das difusividades térmicas para os anos de 1984, considerado ano seco, e 1985, considerado ano chuvoso. As precipitações totais anuais foram 877,2 mm e 1523,6 mm, respectivamente.

Para cálculo das temperaturas médias mensais tomou-se os valores das temperaturas em intervalos de 2 horas (desde a zero hora até as 22 horas) para todos os dias de cada mês. A seguir, considerou-se a média mensal para cada horário e finalmente calculou-se a média mensal para cada mês específico, através de uma calculadora. A análise harmônica para variação anual foi calculada utilizando-se as médias mensais de temperatura enquanto que para a variação sazonal utilizou-se as médias obtidas de duas em duas horas.

Para o estudo dos ciclos diários, considerou-se quatro dias distintos com base em informações de precipitação e nebulosidade isto é, dias com alta umidade no solo devido a ocorrência de chuvas e dias secos (Tabela 3.1).

A análise harmônica para variação diária foi calculada considerando-se os valores horários de temperatura no período de 24 horas.

A plotagem do perfis de temperatura, o cálculo dos harmônicos da série de Fourier e os histogramas das difusividades térmicas foram efetuadas no computador BORROUGHS - 6800 através de subrotinas

específicas.

TABELA 3.1 - Dias característicos para o estudo do ciclo diário de temperatura.

DATA	PRECIPITAÇÃO (mm)	NEBULOSIDADE (décimos)	SITUAÇÃO
05/03/85	104,3	7,4	após vários dias com chuvas
08/04/85	46,5	7,2	após vários dias sem chuvas
25/07/85	0	1,2	após 19 dias sem chuvas
07/11/85	0	1,8	após 10 dias com chuvas

Determinou-se o calor específico médio utilizando-se 3 kg de amostra do solo na forma granular, solta. Os ensaios foram realizados pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT empregando-se o método clássico de mistura segundo a norma da ASTM C 351/1973 : Método Teste Padrão para Calor Específico Médio de Isolamento Térmico. As amostras foram secadas em estufa, à temperatura de 100°C e os ensaios

realizados à temperatura média de 56,7°C. O calor específico médio das amostras apresentam um valor de 0,20 cal/g°C ou 836,76 watt s / kg °C.

Para as análises granulométrica e mineralógica do solo, os procedimentos adotados pelo Agrupamento de Petrologia e Divisão de Minas e Geologia Aplicada do Instituto de Pesquisas Tecnológicas de SP.--IPT-- foram os seguintes:

3.1 - Análise Granulométrica

Uma porção representativa da amostra foi dispersada em água deionizada e em seguida pipetada a fração silte/argila. A fração arenosa foi lavada em peneira de abertura 0,062 mm e posta a secar em estufa a 110°C durante 24 horas, procedendo-se a seguir ao peneiramento.

3.2 - Análise Mineralógica

As frações granulométricas maiores que 0,062 mm foram analisadas por microscopia óptica para identificação e cômputo dos seus constituintes mineralógicos. Analisou-se a fração silte/argila por difratometria de raios-X para identificação das fases mineralógicas presentes.

3.3 - Apresentação dos Resultados

Os resultados obtidos nas análises da fração areia encontram-se na Tabela 3.2 e Figura 3.1. A análise mineralógica por difratometria de raios-X da fração silte e argila detectou a presença predominante de quartzo argilo mineral do grupo da caulinita.

TABELA 3.2 - Análise Granulométrica e Mineralógica de uma amostra do solo de Cachoeira Paulista - SP.

GRANULOMETRIA (mm)	PESOS (g)	PORCENTAGEM (%)	% ACUM.	% Nº GRÃOS						% PESO AMOSTRA					
				A	B	C	D	E	F	A	B	C	D	E	F
GRÃNULOS															
4,000-2,830	0,18	0,26	0,26	-	-	-	-	-	-	-	-	0,26	-	-	-
2,830-2,000	0,18	0,26	0,52	-	-	-	-	-	-	-	-	0,16	0,10	-	-
AREIAS															
2,000-1,410	0,40	0,59	1,11	5,1	-	-	-	-	-	-	-	0,41	0,15	0,03	-
1,410-1,000	1,45	2,12	3,23	2,0	2,0	-	-	-	-	-	-	4,78	0,25	0,04	0,05
1,000-0,707	3,01	4,41	7,64	2,2	3,3	-	-	-	-	-	-	3,42	0,72	0,11	0,16
0,707-0,500	4,92	7,20	14,84	3,2	2,1	-	-	-	-	-	-	5,95	0,84	0,24	0,17
0,500-0,354	5,20	7,61	22,45	2,0	3,1	-	-	-	-	-	-	6,41	0,77	0,16	0,27
0,354-0,250	5,50	8,05	30,50	-	4,0	-	-	-	-	-	-	6,88	0,81	-	0,36
0,250-0,177	6,40	9,37	39,87	6,2	-	-	-	2,1	-	-	-	8,25	0,58	-	0,33
0,177-0,125	6,28	9,20	49,07	2,1	-	-	-	2,1	2,1	-	-	8,24	0,19	-	0,21
0,125-0,088	5,47	8,01	57,08	8,2	1,0	-	-	3,1	3,1	1,0	-	6,58	0,65	0,09	0,27
0,088-0,062	2,33	3,41	60,49	4,0	-	-	-	5,0	2,0	1,0	-	2,95	0,13	-	0,19
SUBTOTAL												51,29	5,19	0,67	2,01
SILTAS E ARGILAS															
0,062-0,031	4,78	7,00	67,49												
0,031-0,016	1,42	2,08	69,57												
0,016-0,008	1,69	2,47	72,04												
0,008-0,004	2,59	3,79	75,83												
0,004	16,50	24,16	99,99												
TOTALS	68,30	99,99													

A = quartzo - 2,65
 B = quartzito ou quartzo microcristalino - 2,65
 C = quartzo com turmalina (2,65+3,0) / 2 = 2,825
 D = turmalina - 3,0
 E = biotita - 3,0
 F = opacos - 5,0

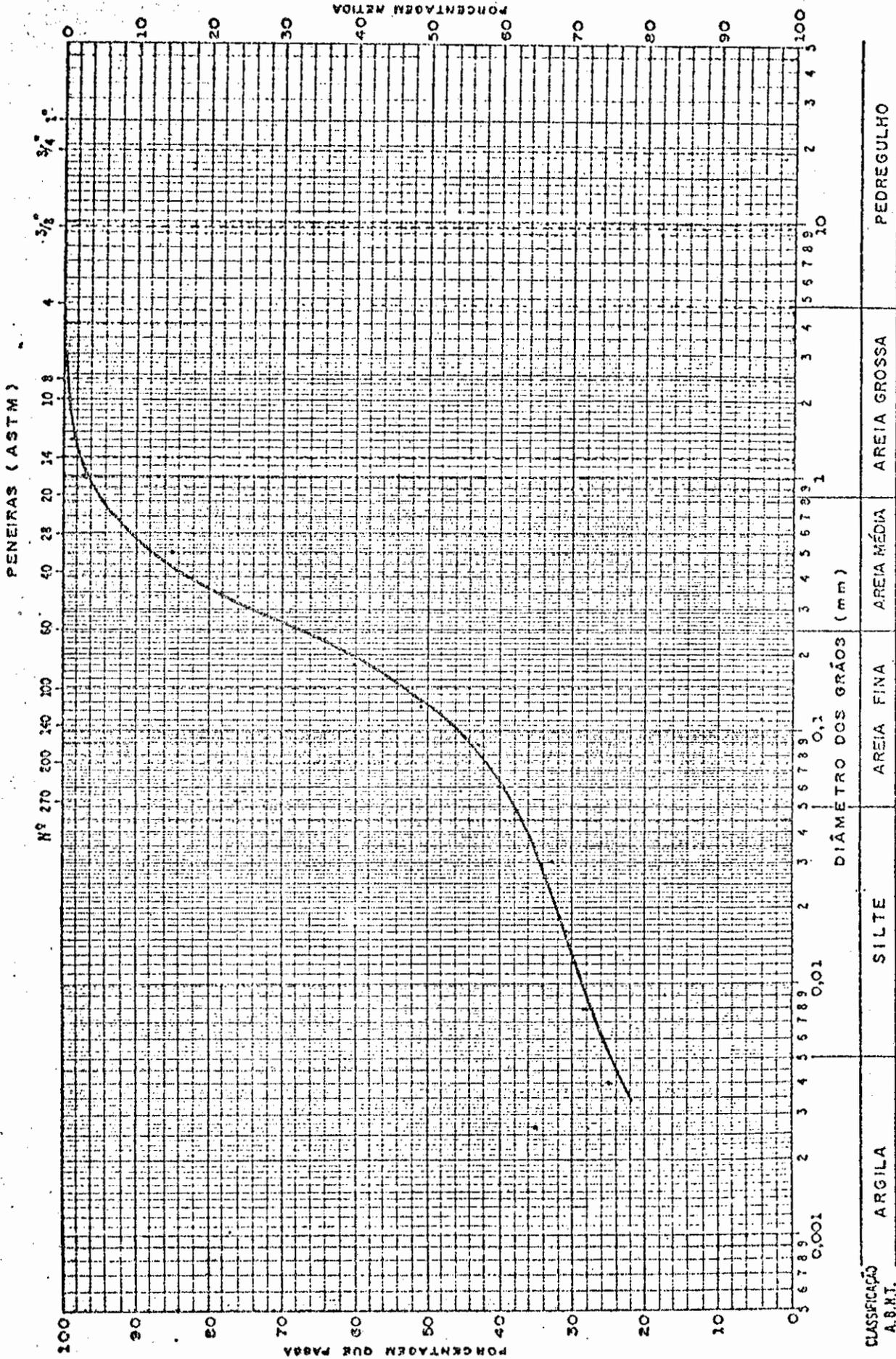


Figura 3.1 - Curva Granulométrica de uma amostra do solo de Cachoeira Paulista - SP.



CAPÍTULO 4

MÉTODOS DE ANÁLISE DOS DADOS

4.1 - Análise de Fourier

A análise harmônica é um dos métodos utilizados na descrição de fenômenos periódicos. Um fenômeno periódico é aquele cujos valores da variável dependente repetem-se em intervalos iguais aos da variável independente que, geralmente, é o tempo. A análise harmônica utiliza as Séries de Fourier, portanto a Análise de Fourier pode ser utilizada para expressar uma série de N observações diárias de temperatura (T_t) a uma dada profundidade como a soma de uma série finita de funções ortogonais seno. Esta análise também estabelece informações sobre a importância relativa de cada componente cíclica da série. A série de funções senos, $A_j \sin (w_j t + \phi_j)$, onde A_j é a amplitude e ϕ_j é o ângulo de fase, é escolhida de tal forma que $w_j = 2\pi_j / N$ para $j = 0, 1, 2, \dots, m$ com $m = (N - 1) / 2$ ou $m = (N - 2) / 2$ para N ímpar ou par, respectivamente.

A série de funções seno pode ser escrita como:

$$a_j \cos w_j t + b_j \sin w_j t \quad \text{com} \quad a_j = A_j \sin \phi_j \quad \text{e} \quad b_j = A_j \cos \phi_j$$

Para N par as séries de observações T_t , $t = 1, 2, \dots, N$ é

expressa como sendo

$$T_t = A_0 + \sum_{j=1}^m (a_j \cos w_j t + b_j \text{sen } w_j t) \quad (4.1)$$

Os coeficientes a_j , b_j (coeficientes de Fourier) podem ser estimados a partir de

$$a_j = \frac{2}{N} \sum_{t=1}^N T_t \cos w_j t \quad (4.2a)$$

$$b_j = \frac{2}{N} \sum_{t=1}^N T_t \text{sen } w_j t \quad (4.2b)$$

O valor de a_0 corresponde a $w_j = 0$ e é o dobro da média de T_t . Desde que $w_{N/2} = \pi$ é também uma frequência e se N é par, um termo adicional a $\cos \pi t$ deve ser adicionado a equação (4.1) com $a_{N/2} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N T_t \cos \pi t$

Pela identidade de Parseval para uma série finita de Fourier, $1/2 A_j^2 = 1/2 (a_j^2 + b_j^2)$ mede a contribuição do j ésimo harmônico para a variância de T_t e portanto estabelece uma medida relativa de cada componente cíclica na decomposição de Fourier de T_t .

4.2 - Fluxo de Calor e Temperatura do Solo

As características essenciais da variação da temperatura

do solo com a profundidade e tempo pode ser entendida comparando-se o solo com um meio homogêneo em que a temperatura varia somente na direção vertical. Sob estas condições, a densidade do fluxo de calor, na superfície do solo (G), pode ser estimada a partir da distribuição de temperatura no perfil do solo, de acordo com a equação (2.1) que pode ser escrita como:

$$G = - K \rho s \left(\frac{\partial T}{\partial Z} \right)_{Z=0} \quad (4.3)$$

onde K é a difusividade térmica da camada do solo; ρ é a densidade da camada do solo; s é o calor específico da camada do solo e $(\partial T / \partial Z)_{Z=0}$ a variação da temperatura com a profundidade.

As constantes térmicas são muito importantes nos processos de transferência de calor nas camadas do solo. A determinação direta das constantes térmicas como condutibilidade de calor (λ), difusividade (K) e calor específico (s) do solo é extremamente difícil.

Desde que o solo não é um meio homogêneo, a equação (4.3) aplica-se somente para aqueles solos em que as variações locais causadas pela estrutura granular ou por outras heterogeneidades sejam desprezadas.

A equação diferencial parcial de Fourier, que descreve a transferência de calor transiente por condução, pode ser utilizada para aproximar as variações de temperatura com o tempo em uma dada profundidade no perfil do solo (van Wijk e de Vries, 1963). Considerando o meio homogêneo, isotrópico, sem fontes ou sumidouros de calor, a equação reduz-se a:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = K \frac{\partial^2 T}{\partial Z^2} \quad \text{ou} \quad \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial Z^2} = \rho s \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4.4)$$

A difusividade térmica (K) é uma função da condutibilidade de dada pela relação

$$K = \frac{\lambda}{\rho s} \quad \text{m}^2 / \text{seg.} \quad (4.5)$$

e os termos ρK e ρs são chamados de coeficiente de troca e capacidade volumétrica de calor do solo respectivamente.

Assumindo que a difusividade é constante, a equação (4.4) pode ser solucionada para dadas condições inicial e limite. Se, por exemplo, uma onda diária de temperatura na superfície for imposta, uma onda amortecida descende diminuindo a amplitude e aumentando o ângulo de fase. Embora esta previsão esteja de acordo, qualitativamente, com os resultados experimentais, existem discrepâncias nos detalhes. Vishwanadhan e Ramanadham, 1970, concluíram que o valor de K não é constante, o que não é surpreendente, considerando-se a variação com a profundidade da composição, compactação e umidade no solo.

O procedimento mais simples, para comparar as observações de temperatura com a teoria, é aproximar a temperatura por uma função senoidal variando no tempo, como descrita na equação (2.2), ou seja:

$$T(0, t) = T_0 \text{ sen } wt \quad (4.6)$$

onde $w = 2\pi/P$ é a frequência radial, T_0 é a metade da amplitude diária ou anual e o período de oscilação da onda de calor é $P = 86400$ segundos para a onda diária de calor ou $P = 365 \times 86400$ segundos para o

fluxo de calor, considerando $\lambda = K\rho s$ como:

$$G (Z,t) = A_0 (\lambda C_w)^{1/2} e^{-aZ} \text{sen} (\omega t - aZ + \frac{\pi}{4}) \quad (4.11)$$

Para $Z = 0$, (4.11) torna-se:

$$G (Z,t) = A_0 (\lambda C_w)^{1/2} \text{sen} (\omega t + \frac{\pi}{4}) \quad (4.12)$$

Através das equações (4.9) e (4.12) verifica-se que a temperatura máxima à superfície ocorre depois do fluxo de calor máximo e com uma diferença de fase correspondente a $\pi/4$ (Sellers, 1965). Sendo assim, para o ciclo diário a defasagem corresponde a 3 horas e para o ciclo anual corresponde a 1,5 meses.

4.3 - Difusividade Térmica

4.3.1 - Método do "Range" e da Defasagem

Das equações (4.9) e (4.10) deduz-se que uma medida da amplitude ou fase à profundidade Z é suficiente para determinar a difusividade térmica K . A razão entre os "ranges" diários R_1 e R_2 em duas profundidades Z_1 e Z_2 é dado por:

$$\ln \frac{R_1}{R_2} = a (Z_2 - Z_1) \quad (4.13)$$

ciclo anual. Esta suposição não é estritamente precisa uma vez que as curvas de temperatura não são verdadeiramente senoidais. Face à dificuldade de se decidir em cada caso a posição da linha zero aproximada, em que a variação seria vista como oscilante, considera-se apropriado medir a amplitude diária extrema e assumir uma curva simples.

*As soluções para a equação (4.4) dadas por Carslaw et alii (1959) para temperatura periódica em alguma profundidade Z e tempo t, são:

$$T (Z, t) = \frac{4T_1}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{2n+1} \exp (- Z \sqrt{(2n+1)w / 4K}) * \text{sen} (\frac{(2n+1)}{2} \omega t - Z (\frac{(2n+1)}{4K} w)^{1/2}) \quad (4.7)$$

ou

$$T (Z, t) = A_0 \exp (- Z \sqrt{w/2K}) \text{sen} (\omega t + \phi - Z \sqrt{w/2K}) \quad (4.8)$$

onde T_1 é a temperatura na superfície.

A solução padrão (4.8) pode ser representada como:

$$T (Z, t) = A_0 e^{-aZ} \text{sen} (\omega t - aZ) \quad (4.9)$$

$$\text{onde } a^2 = \frac{\pi}{PK} \quad (4.10)$$

Diferenciando a equação (4.9) com relação a Z e substituindo na equação (2.1) ou na equação (4.3) tem-se a expressão para o

Esta equação é usada para determinar a quantidade K a partir dos "ranges" diários de temperaturas encontrados para as várias profundidades. Das equações (4.10) e (4.13) tem-se:

$$K = \frac{\pi}{P} \left[\frac{(Z_2 - Z_1)}{\ln R_1/R_2} \right]^2 \text{ m}^2 / \text{seg.} \quad (4.14)$$

onde P é um dia e as profundidades são expressas em centímetros.

A defasagem entre os tempos de ocorrência de temperatura máxima às correspondentes profundidades podem ser utilizadas para a determinação da difusividade térmica. O valor de K é calculado usando o critério de que a temperatura T, em alguma profundidade, alcança um valor máximo (equação 4.9).

Quando $T(Z, t) = 0 \rightarrow t_{\text{máxima}}$

$$t = \left[(2n+1) \frac{\pi}{2} + Z \sqrt{\frac{\pi}{PK}} \right] \frac{P}{2\pi} \quad (4.15)$$

onde n é um inteiro. Portanto a defasagem entre os tempos de ocorrência de temperatura máxima às profundidades Z_1 e Z_2 pode ser representada como segue

$$L = (Z_2 - Z_1) \frac{P}{2\pi} \left(\frac{\pi}{PK} \right)^{1/2} \quad (4.16)$$

onde L é a defasagem de tempo em segundos. Portanto:

$$K = P \frac{(Z_2 - Z_1)^2}{4\pi L^2} \text{ m}^2 / \text{seg.} \quad (4.17)$$

A teoria de condução de calor num meio homogêneo, semi-infinito, prevê que o logarítmo da amplitude de temperatura deve diminuir linearmente e que a defasagem dos valores extremos deve aumentar linearmente com o aumento da profundidade (Carslaw et alii, 1959). Portanto, a representação gráfica da amplitude versus a profundidade num papel logarítmo deve ser uma linha reta com uma inclinação de magnitude a (equação 4.10).

4.3.2 - Método da Amplitude e Fase do Primeiro Harmônico

A solução da equação (4.4) pode ser escrita na seguinte forma:

$$T (Z, t) = \bar{T} + A_0 \exp (- Z / D) \text{sen} (\omega t + \phi - Z / D) \quad (4.18)$$

onde D é uma constante, chamada "profundidade de amortecimento". Ela depende de ω , tanto quanto das propriedades térmicas do solo. Logo

$$D = \left(\frac{2K}{\omega} \right)^{1/2}$$

O valor da fase depende da escolha do ponto zero na escala de tempo t , logo

$$\left(\omega t + \phi - \frac{Z}{D} \right) = \frac{\pi}{2} \quad (4.19)$$

quando a temperatura à superfície atinge seu valor máximo.

Se a amplitude da onda de temperatura à profundidade Z é $(A_0 \exp(-Z/D))$, então a razão de amplitude a duas profundidades Z_1 e Z_2 fornecerá a equação da amplitude, ou seja:

$$\frac{A_1}{A_2} = \exp \frac{(Z_2 - Z_1)}{D} \quad (4.20)$$

onde A_1 e A_2 são as amplitudes nos níveis Z_1 e Z_2 , respectivamente.

Substituindo a expressão de D na equação (4.20) obtém-se a expressão para o cálculo da difusividade térmica em função da amplitude:

$$K = \frac{w}{2} \left[\frac{Z_2 - Z_1}{\ln A_1/A_2} \right]^2 \quad \text{m}^2 / \text{seg.} \quad (4.21)$$

Aplicando a equação (4.19) aos níveis Z_1 e Z_2 , encontra-se a equação da fase, em função de t , ou seja:

$$w \Delta t_{\text{máx}(1)} + \phi - Z = \frac{\pi}{2} \quad (a) \quad \text{e} \quad w \Delta t_{\text{máx}(2)} + \phi - Z = \frac{\pi}{2} \quad (b)$$

Subtraindo (b) de (a), tem-se:

$$\Delta t_{\text{máx}} = \Delta t_{\text{máx}(2)} - \Delta t_{\text{máx}(1)} = \frac{1}{w} \frac{(Z_2 - Z_1)}{D} \quad (4.22)$$

Substituindo a expressão de D na equação (4.22), a expressão para o cálculo da difusividade térmica em função da fase é

$$K = \frac{1}{2w} \left[\frac{Z_2 - Z_1}{\Delta t_{\text{máx}}} \right]^2 \text{ m}^2 / \text{seg.} \quad (4.23)$$

Obviamente, alguns desvios, a partir das condições assumidas, afetarão os valores das difusividades térmicas calculadas por estes métodos. Portanto, os dados assim obtidos representam valores aparentes e divergiriam se calculados a partir de medidas no mesmo solo, quando tomadas sobre diferentes períodos de tempo e sob diferentes condições. Por exemplo, a difusividade térmica aparente pode fornecer valores bem diferentes para um mesmo solo nas condições de solo nú ou solo vegetado, principalmente por causa das diferenças dos perfis hidricos.

4.4 - Calor Específico Médio

É uma propriedade termodinâmica básica de todas as substâncias e o seu valor depende da composição química e da temperatura. Assim sendo, o calor específico médio de uma substância pode ser definido como a quantidade de calor exigido para variar a temperatura de uma massa unitária em um grau, medido como uma quantidade média sobre determinados limites de temperatura (14,5 - 15,5 °C) (Weber et alii, 1955). Entre os métodos conhecidos para determinação do calor específico médio destaca-se o método clássico descrito abaixo:

4.4.1 - Método de Misturas

O princípio do método consiste, essencialmente, em adicionar determinada massa de um material conhecido com alta temperatura à uma massa conhecida de água destilada com baixa temperatura determinando-se a temperatura de equilíbrio. O calor absorvido pela água e o recipiente pode ser calculado e seu valor equacionado a uma expressão para o calor dado pelo material aquecido, ou seja, conhecido o calor específico s de um material, pode-se calcular o calor G necessário para variar a temperatura de uma massa M a partir de seu valor inicial para um valor final T_f , através da expressão:

$$G = M s (T_f - T_i) \quad (4.24)$$

O procedimento estipula temperatura média de 60°C (range de temperatura de 100°C à 20°C) quando se utiliza água como fluido calorimétrico. Substituindo por outros fluidos os limites de temperatura devem ser modificados.

Cabe salientar ainda que não foi considerado o calor de umedecimento na determinação do calor específico médio. Este calor de umedecimento é um índice da energia de adsorção da água (incorporação de uma substância à superfície da outra), isto é, representa a perda de energia cinética das moléculas d água durante a adsorção. Aquele conteúdo de umidade em que nenhum calor de umedecimento foi obtido caracteriza-se como a verdadeira higroscopicidade da substância. Baver (1956) verificou que o calor de umedecimento diminui para zero quando o conteúdo de umidade aumenta. O valor zero (higroscopicidade) para um

solo argiloso ocorre à percentuais muito altos de umidade quando comparado a um solo arenoso, isto é, a argila tem aproximadamente oito vezes o calor de umedecimento da areia.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS

5.1 - Perfís de Temperatura

5.1.1 - Ciclo Anual

As figuras 5.1(a) à 5.1(c) mostram o ciclo anual da temperatura do solo, às profundidades de 05, 10 e 15 cm durante os anos de 1984 e 1985, baseando-se em valores médios horários em cada nível. Esta média é definida como a média de 12 observações diárias, tomadas desde zero hora até às 22 horas (hora local), sendo que em cada curva, mostrada nos gráficos, a hora zero da média de cada mês coincide com a média das 22 horas do mês anterior. Uma característica dominante nas seis curvas é naturalmente, o ciclo anual gerado pela variação cíclica na quantidade de energia solar que alcança a área estudada. As variações mais pronunciadas ocorrem próximo à superfície, no nível de 05 cm, onde as temperaturas atingem seus valores mais altos no mês de fevereiro, por volta das 14 horas. Por sua vez, no ano de 1984, considerado como ano seco, a temperatura média das 14 horas no mês de fevereiro foi 38,6°C enquanto que para a mesma época, no ano de 1985 (ano chuvoso) a temperatura média foi 34°C, diferindo daquela por 4,6°C. À profundidade

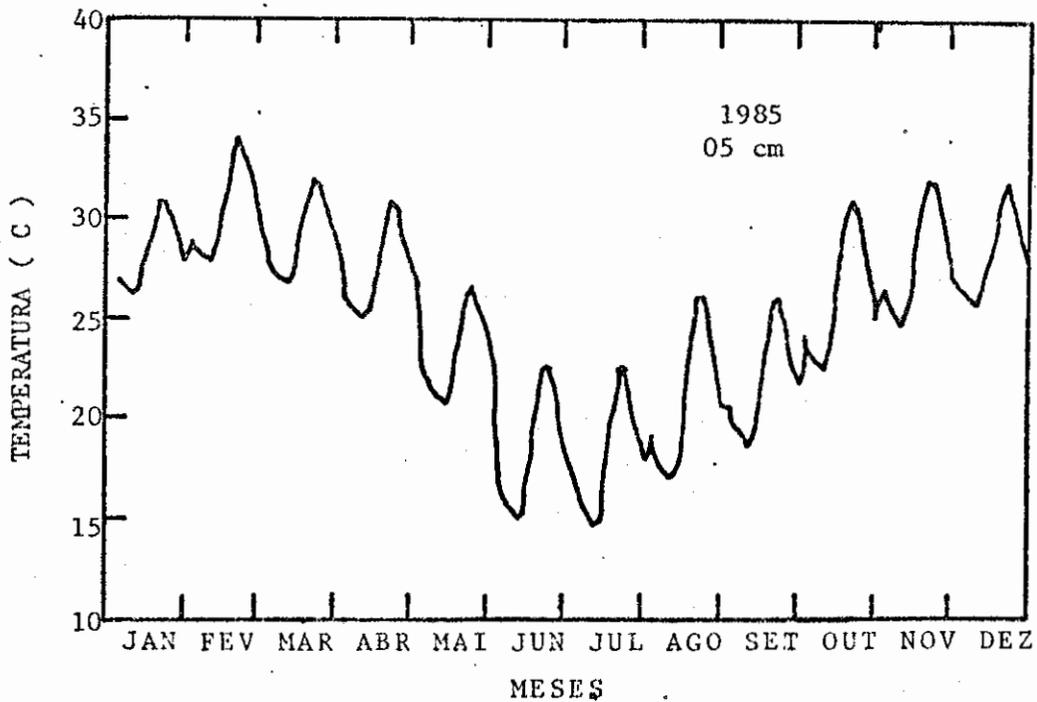
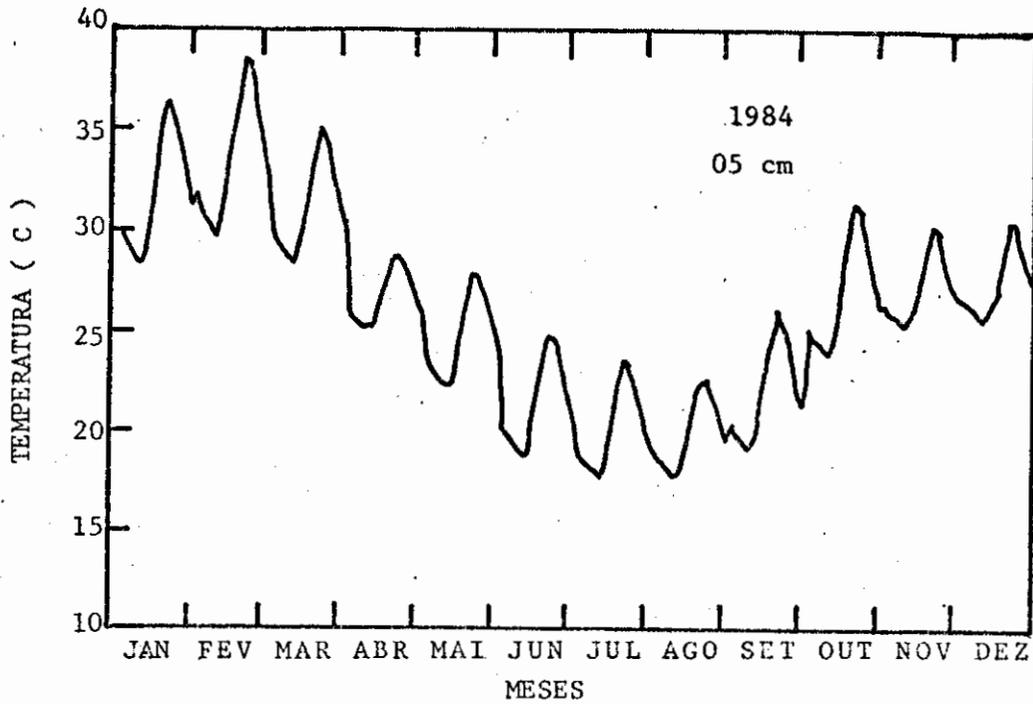


Figura 5.1 (a) - Temperaturas médias diárias do solo à profundidade de 05 cm, anos de 1984 e 1985, Cachoeira Paulista - SP.

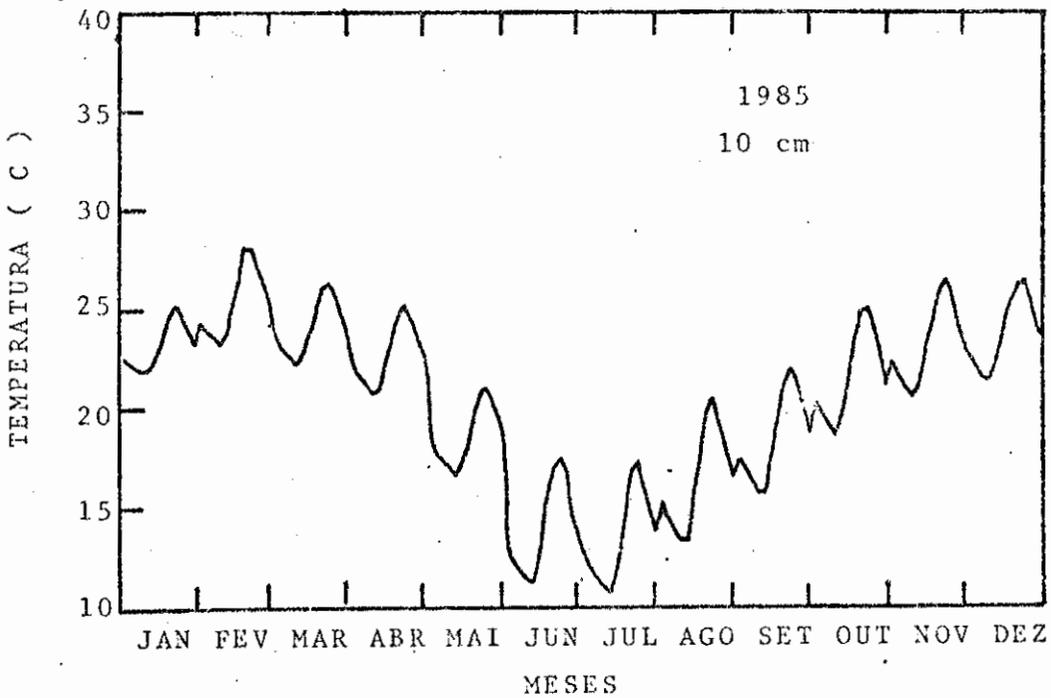
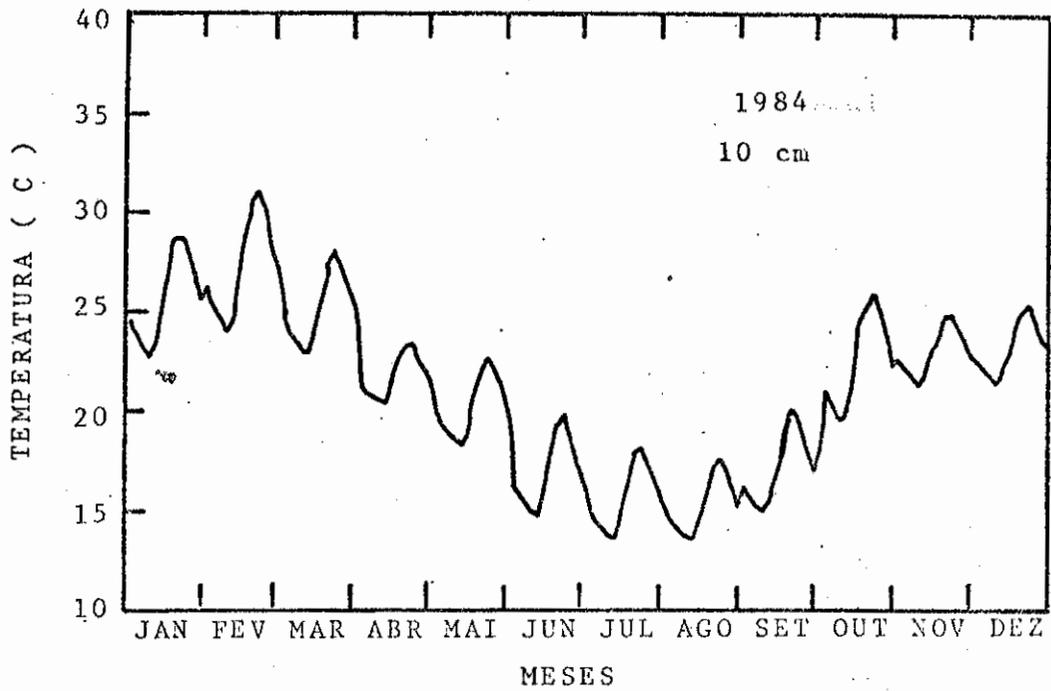


Figura 5.1 (b) - Temperaturas médias diárias do solo à profundidade de 10 cm, anos de 1984 e 1985, Cachoeira Paulista - SP.

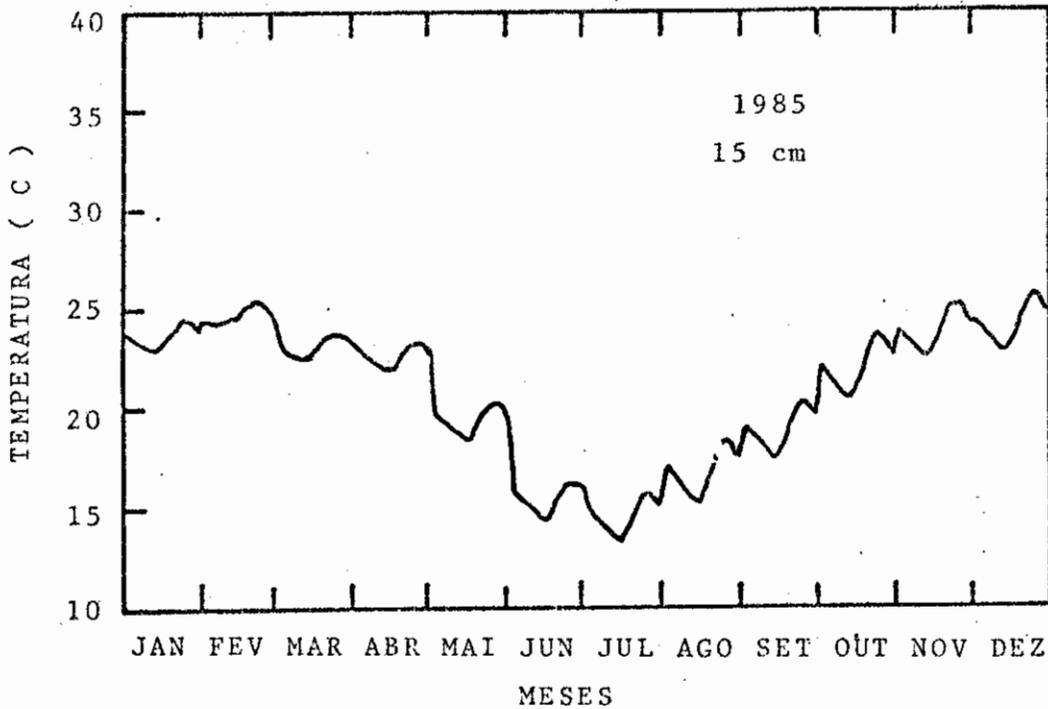
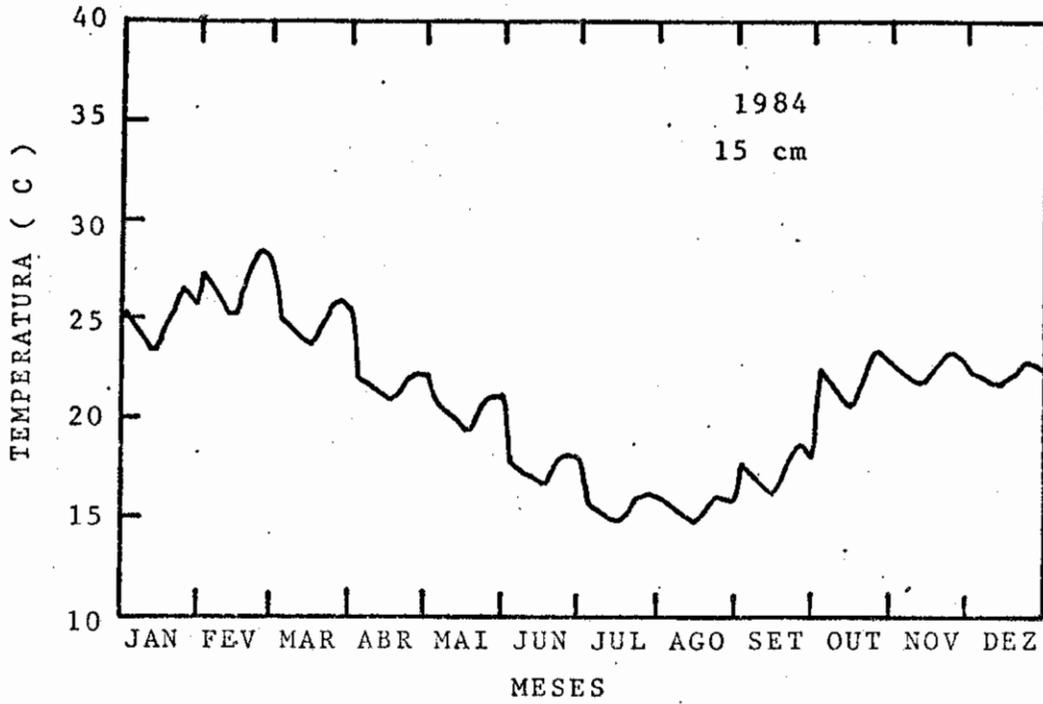


Figura 5.1 (c) - Temperaturas médias diárias do solo à profundidade de 15 cm, anos de 1984 e 1985, Cachoeira Paulista - SP.

de 10 cm, as máximas também ocorreram em fevereiro, entre 14 e 16 horas com os seguintes valores: 31,1°C em 1984 e 28,1°C em 1985 diminuindo a diferença para 2°C. Em 15 cm, as máximas ocorreram por volta de 16 e 18 horas, atingindo 28,4°C em 1984 e 25,5°C em 1985 e aumentando a diferença para 2,5°C. Os valores médios mínimos, em todas as profundidades nos dois anos, ocorreram durante o mês de julho, exceto em 1984 no nível de 10 cm, onde o valor médio mínimo ocorreu em agosto. As diferenças com relação às médias mínimas são menos pronunciadas do que as máximas, atingindo 2,9°C em 05 cm (17,6°C em 1984 menos 14,7°C em 1985 às 6 horas); 2,8°C em 10 cm (13,5°C em 1984 menos 10,7°C em 1985 às 8 horas) e 1,4°C em 15 cm (14,7°C em 1984 menos 13,3°C em 1985 às 10 horas).

Observações das temperaturas em todos os meses mostraram que, em geral, as temperaturas médias em 1984 foram mais altas do que no ano de 1985 com exceções dos meses de abril, agosto, setembro, novembro e dezembro em que a maior diferença (3,5°C entre as temperaturas máximas) foi verificada no mês de agosto à profundidade de 05 cm. Considerando-se estes meses como exceção, cabe salientar que, os totais mensais de precipitação nos meses de abril, agosto e novembro de 1984 foram superiores quando comparados com os respectivos meses do ano de 1985.

A progressão anual da temperatura do solo nos referidos níveis, baseando-se em valores médios mensais para os dois anos (figura 5.2), apresentam as curvas aproximadamente senoidais, com as maiores flutuações ocorrendo no ano de 1985. Verifica-se nestas curvas que, no ano de 1984, em alguns meses, as temperaturas médias no nível de 15 cm são ligeiramente mais altas do que no nível de 10 cm, porém as diferenças não ultrapassam 0,5°C enquanto que em 1985, durante quase todo o ano, as temperaturas foram mais altas em 15 cm do que em 10 cm e o mês

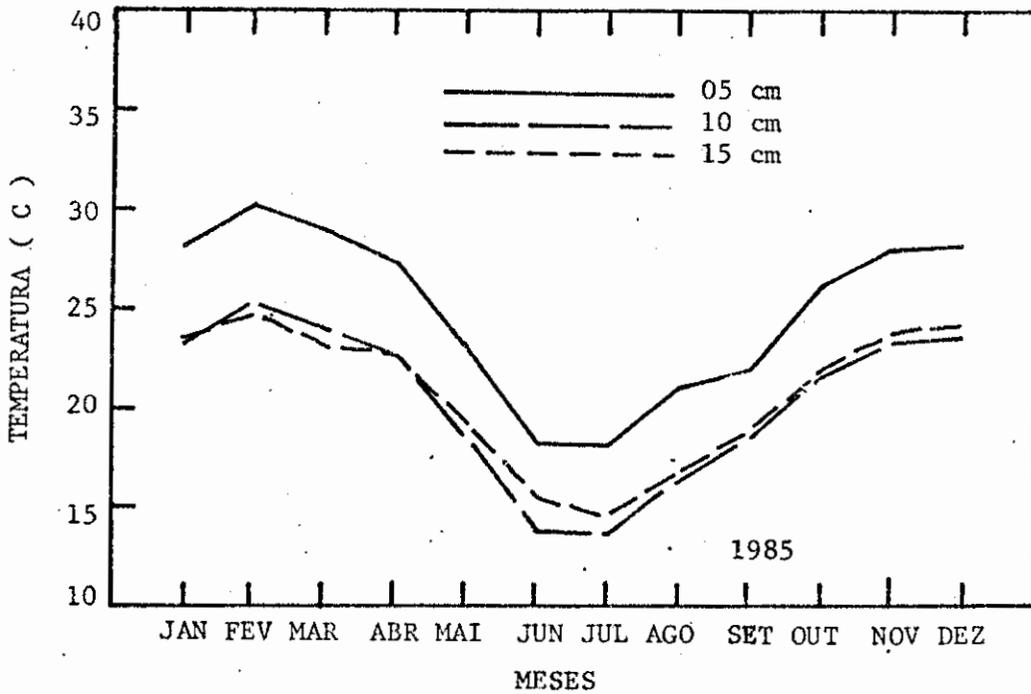
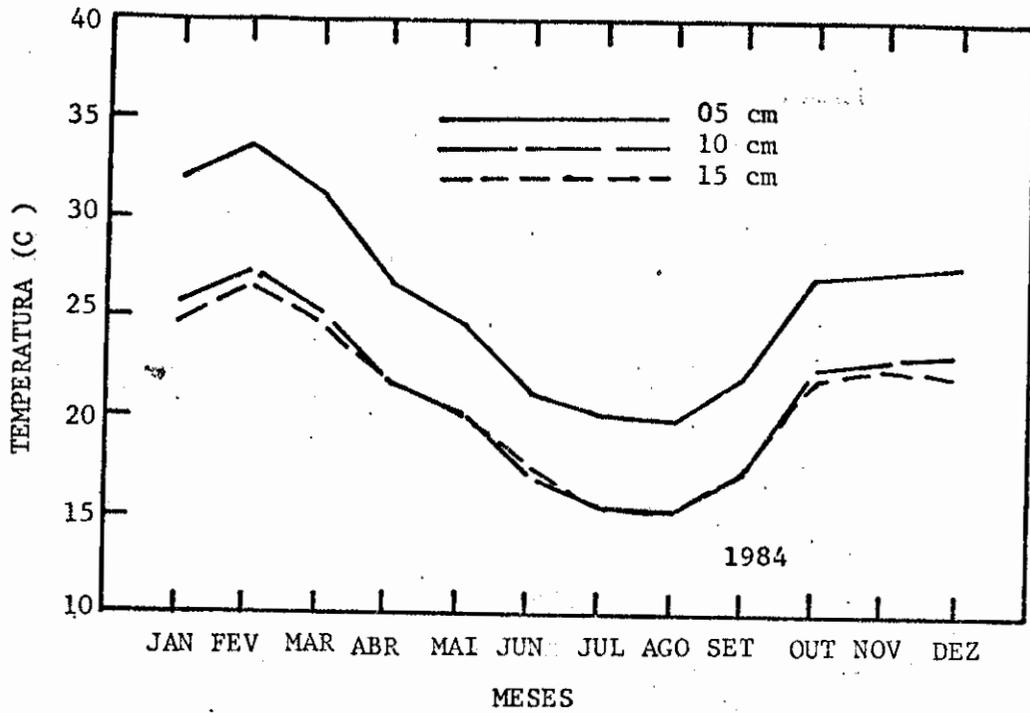


Figura 5.2 - Progressão anual da temperatura do solo com base em médias mensais às profundidades de 05, 10 e 15 cm, anos de 1984 e 1985, Cachoeira Paulista - SP.

de julho é o que apresentou uma diferença maior (1,5°C). Embora o mês de fevereiro seja o que apresenta temperaturas médias mais altas, a diferença máxima entre as temperaturas médias (3,8°C) foi verificada no mês de janeiro e é também neste mês que ocorre a diferença máxima nas precipitações médias (211,1 mm).

5.1.2 - Ciclo Sazonal

Os meses típicos das quatro estações do ano são janeiro, abril, julho e outubro e as figuras 5.3(a) à 5.3(d) mostram os ciclos diários das temperaturas do solo para estes meses baseando-se em valores médios horários (de 2 em 2 horas, hora local). As curvas mostram que as flutuações irregulares no ciclo diário da temperatura do solo, criadas pelas variáveis brilho do sol e precipitação, podem ser removidas quando se utiliza somente dados para um mês.

Durante o mês de janeiro a amplitude do ciclo diário de temperatura no ano seco foi maior do que aquele do ano chuvoso, alcançando 7,3°C contra 4,7°C à profundidade de 05 cm. A medida que se penetra no solo a amplitude vai diminuindo e em 15 cm atingiu 3,0°C à 05 cm em 1984 contra 1,6°C à 15 cm em 1985. Levando-se em conta os valores médios das temperaturas para cada 2 horas, a diferença entre os respectivos valores máximos no nível de 05 cm foi 5,5°C diferindo portanto da diferença entre as máximas quando considerou-se as médias mensais. No verão de 1984 o ciclo de aquecimento diário penetrou até a profundidade de 15 cm pois a onda de temperatura foi perceptível nesta profundidade porém, no ano de 1985 não se verificou tal conformidade e isto se deve

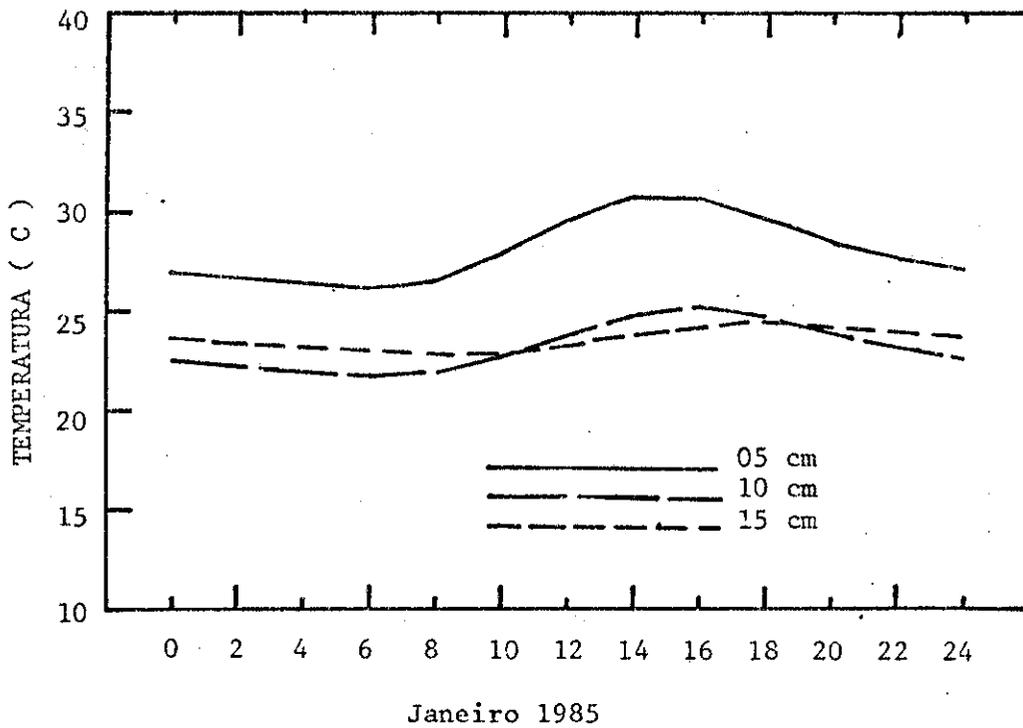
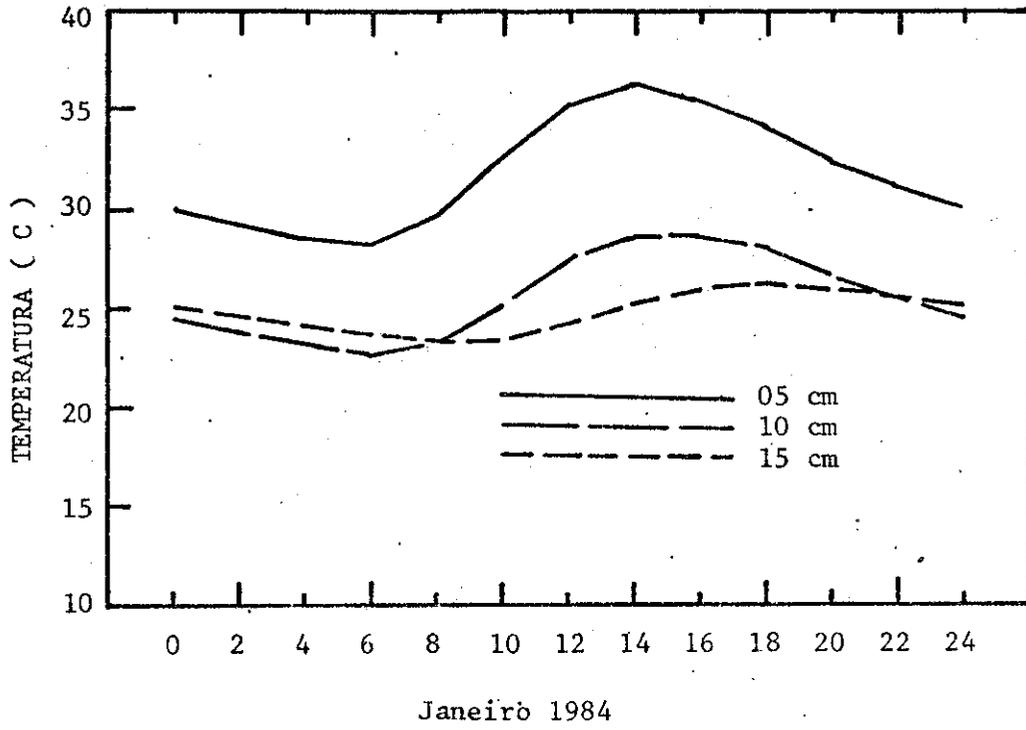


Figura 5.3 (a) - Temperaturas médias diárias do solo às profundidades de 05, 10 e 15 cm para janeiro de 1984 e janeiro de 1985, Cachoeira Paulista - SP.

ao alto conteúdo de umidade do solo.

Em abril, a amplitude da onda de temperatura em 1984 diminuiu consideravelmente enquanto que o total diário da radiação solar também diminuiu no outono porém, o mês de abril de 1985 apresentou a maior amplitude e a diferença entre as temperaturas máximas não ultrapassou 2°C. Os totais mensais de precipitação foram 75,2 e 73,7 mm, respectivamente.

No mês de julho, que é normalmente o mês mais frio nesta área, a amplitude do ciclo diário foi 5,9°C e 7,8°C para 1984 e 1985 respectivamente, e a característica mais proeminente neste mês foi que as maiores diferenças ocorreram entre os valores de temperaturas mínimas em 05 e 10 cm atingindo 2,9°C. Os dois anos apresentaram totais mensais de precipitação bastante baixos com 9,5 mm em 1984 e 0,8 mm em 1985.

Com a chegada da primavera, a quantidade de energia solar que alcança a superfície do solo é maior e aquece a camada superior. Assim, em outubro as amplitudes aumentaram em todas as profundidades atingindo 7,6°C em 1984 e 8,5°C em 1985 e por sua vez, o mês de outubro de 1985 foi menos chuvoso que outubro de 1984, ou seja, 107,6 mm e 74,7 mm, respectivamente. Neste mês, as diferenças entre as temperaturas máximas e mínimas entre os dois anos foi bastante baixa, com o maior valor (1,3°C) ocorrendo em 05 cm.

Uma característica importante nestes diagramas é o rápido decréscimo da amplitude e o aumento da defasagem em tempo dos extremos com a profundidade. É claro que as ondas de temperaturas não são simétricas, já que a fase de aquecimento do ciclo é mais curta que a fase de esfriamento. É interessante notar também que, naqueles meses em que

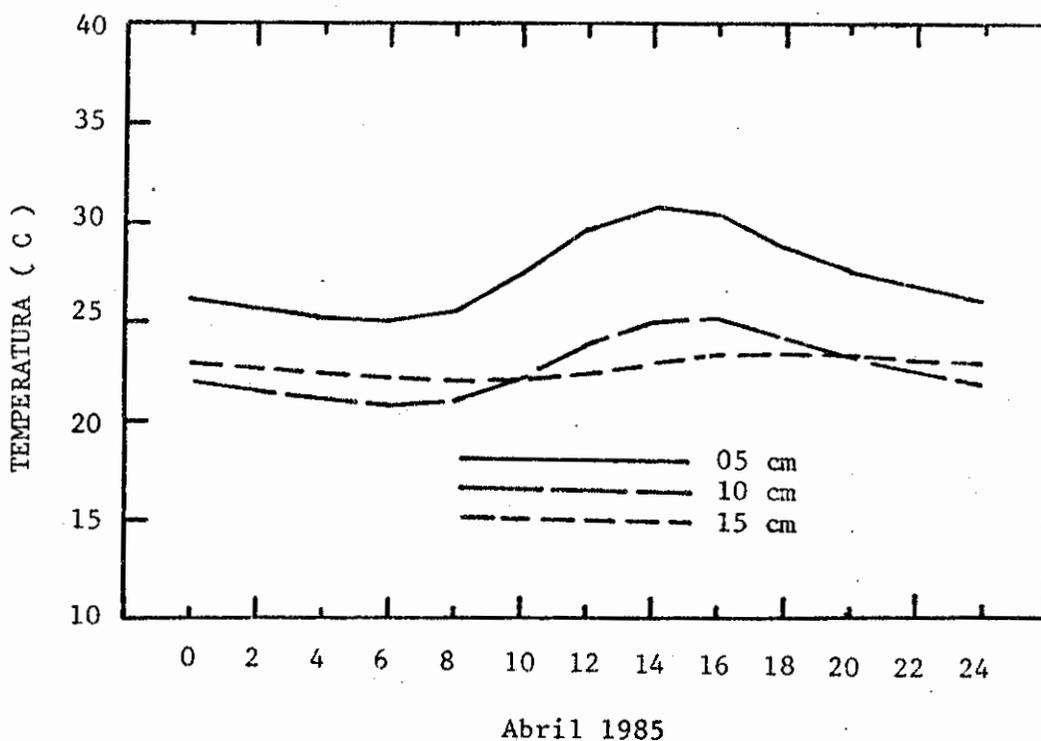
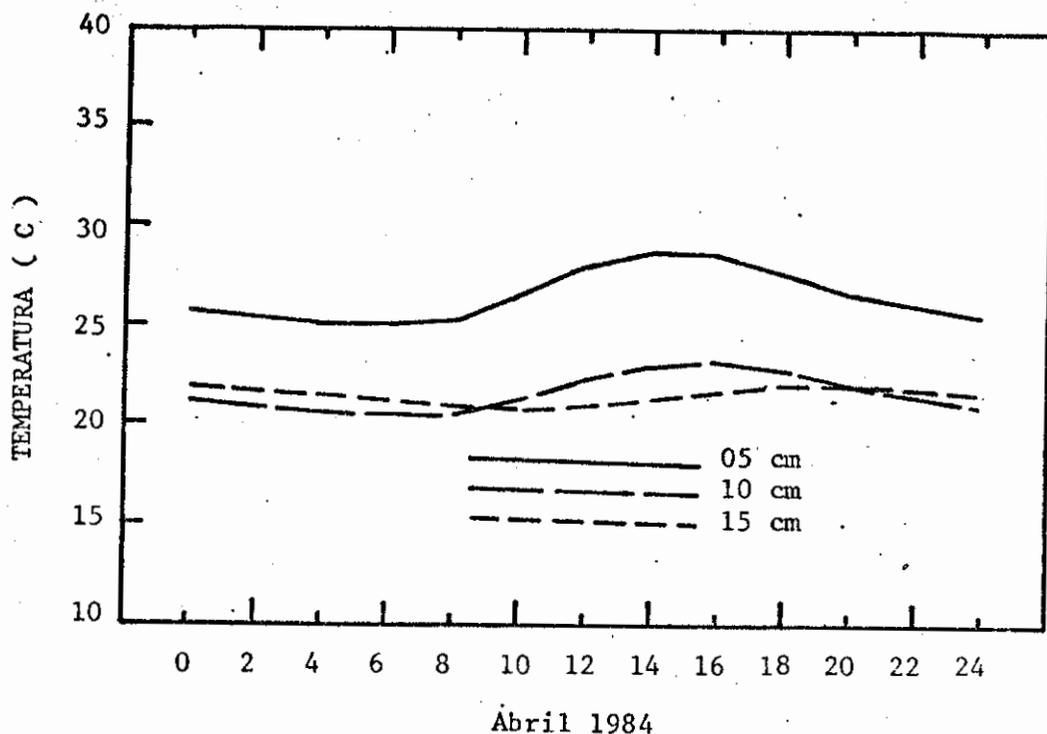


Figura 5.3 (b) - Temperaturas médias diárias do solo às profundidades de 05, 10 e 15 cm para abril de 1984 e abril de 1985, Cachoeira Paulista - SP.

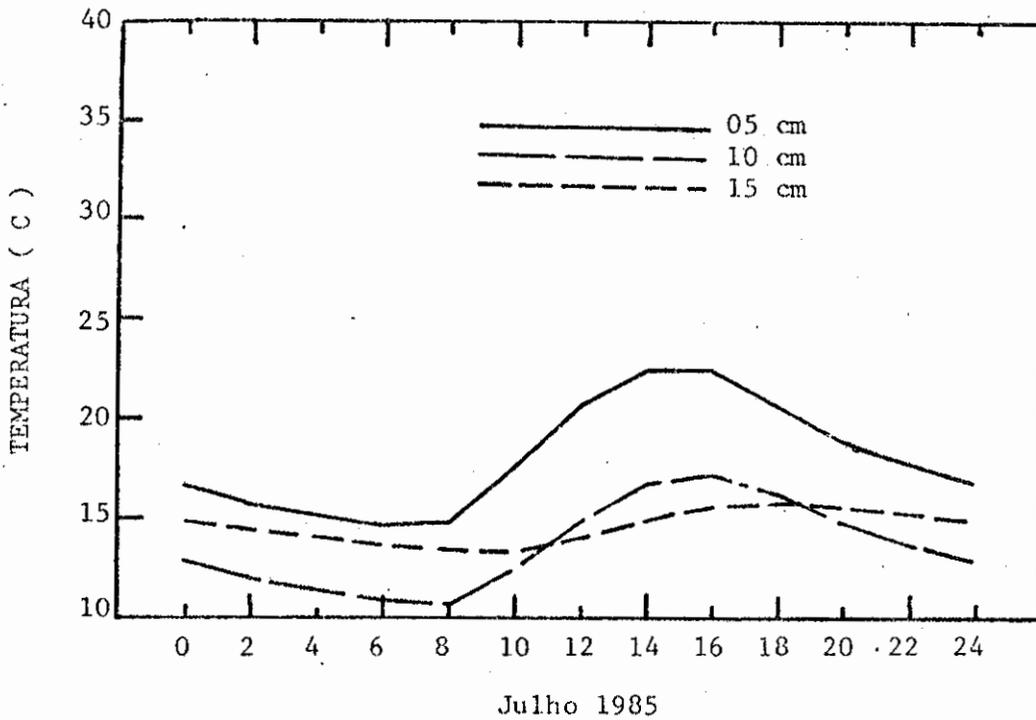
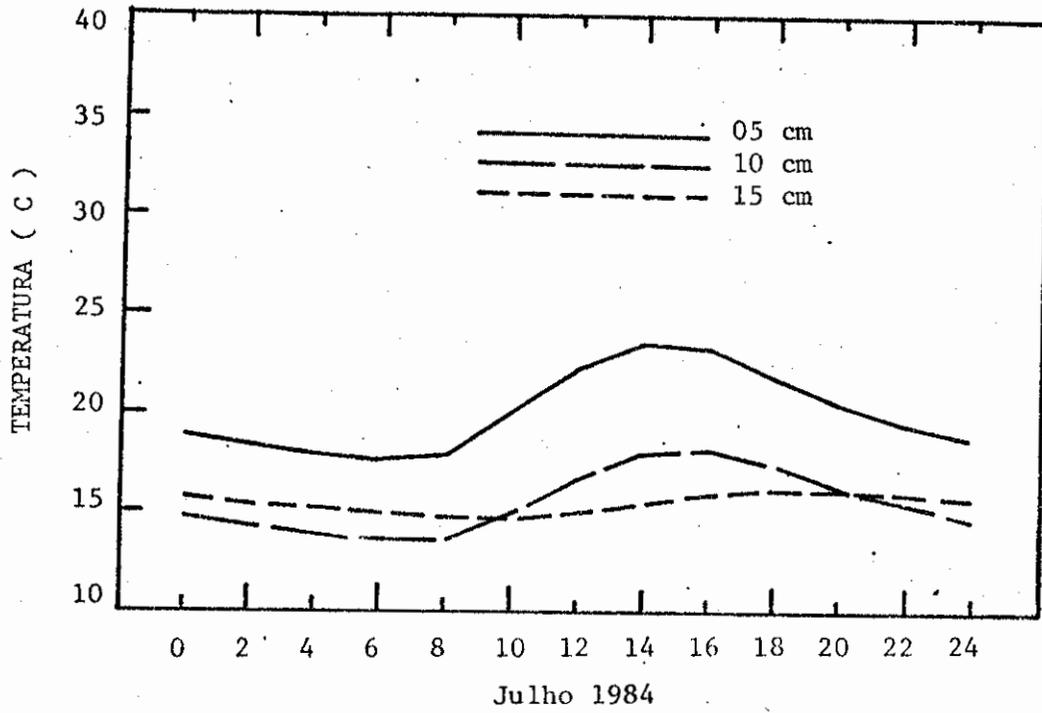


Figura 5.3 (c) - Temperaturas médias diárias do solo às profundidades de 05, 10 e 15 cm para julho de 1984 e julho de 1985, Cachoeira Paulista - SP.

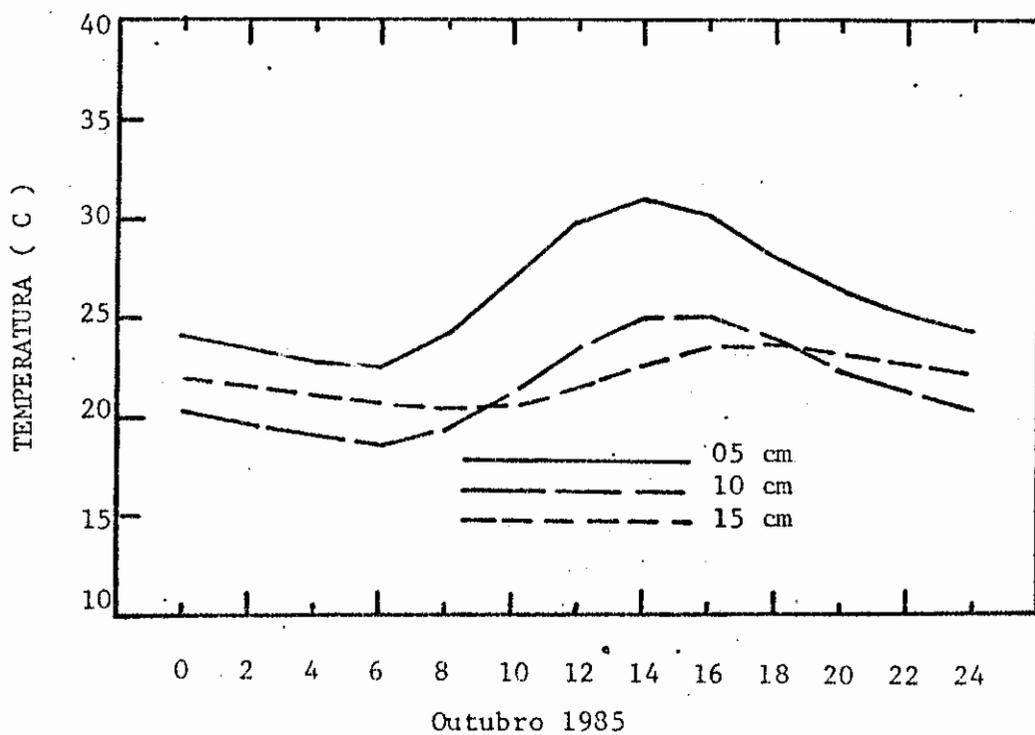
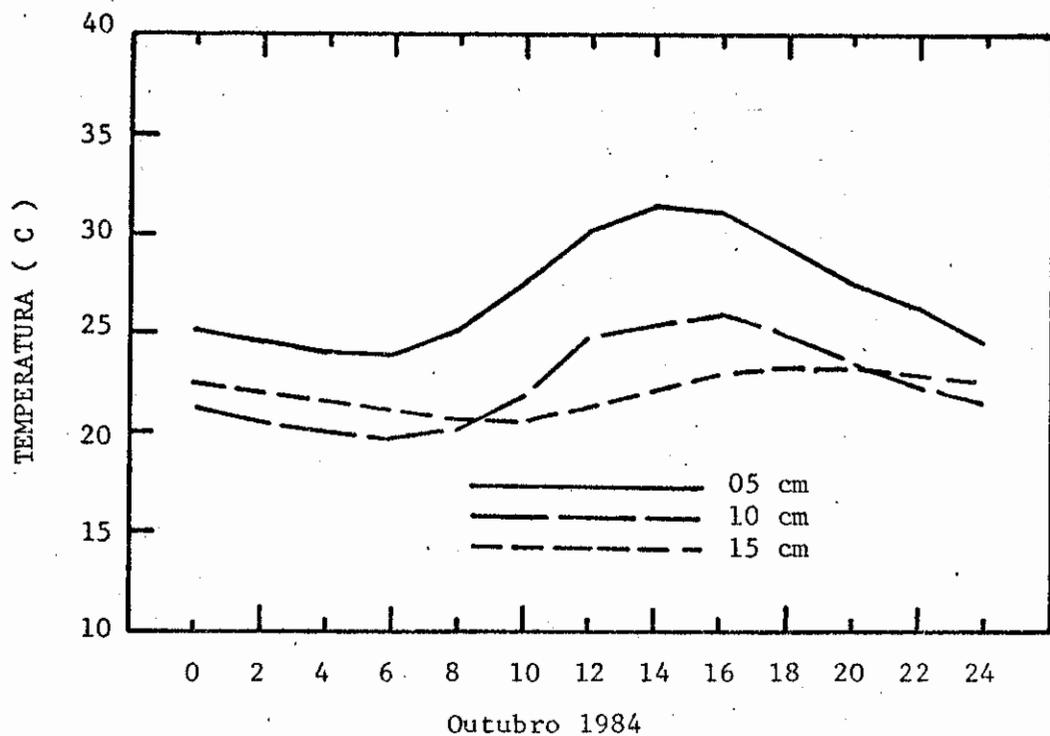
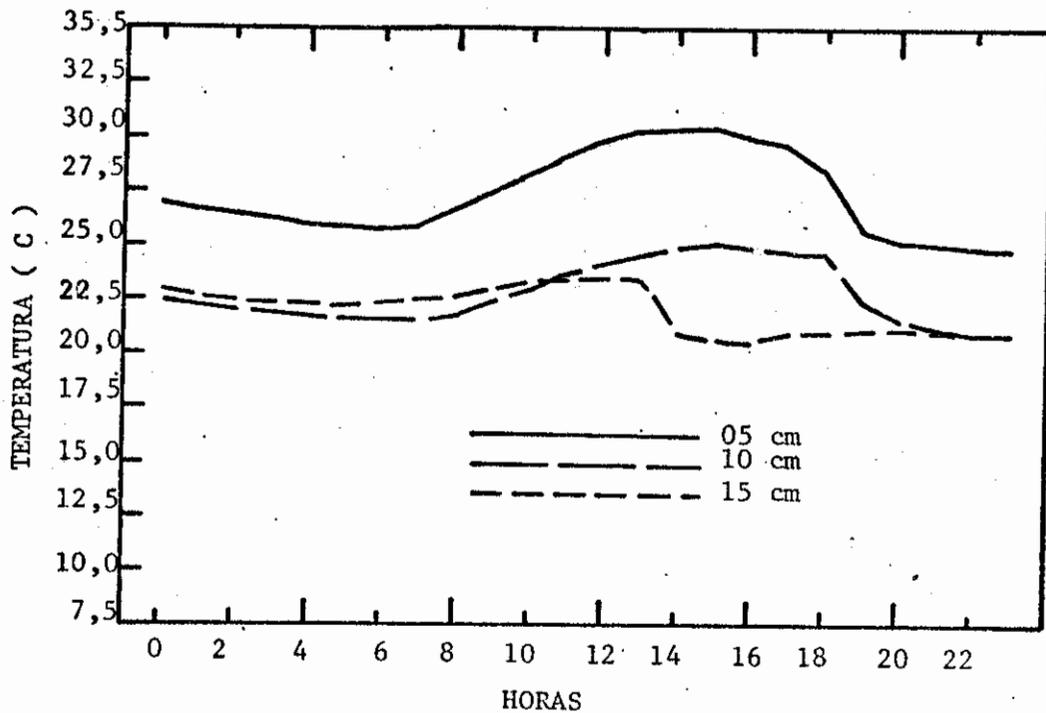


Figura 5.3 (d) - Temperaturas médias diárias do solo às profundidades de 05, 10 e 15 cm para outubro de 1984 e outubro de 1985, Cachoeira Paulista - SP.

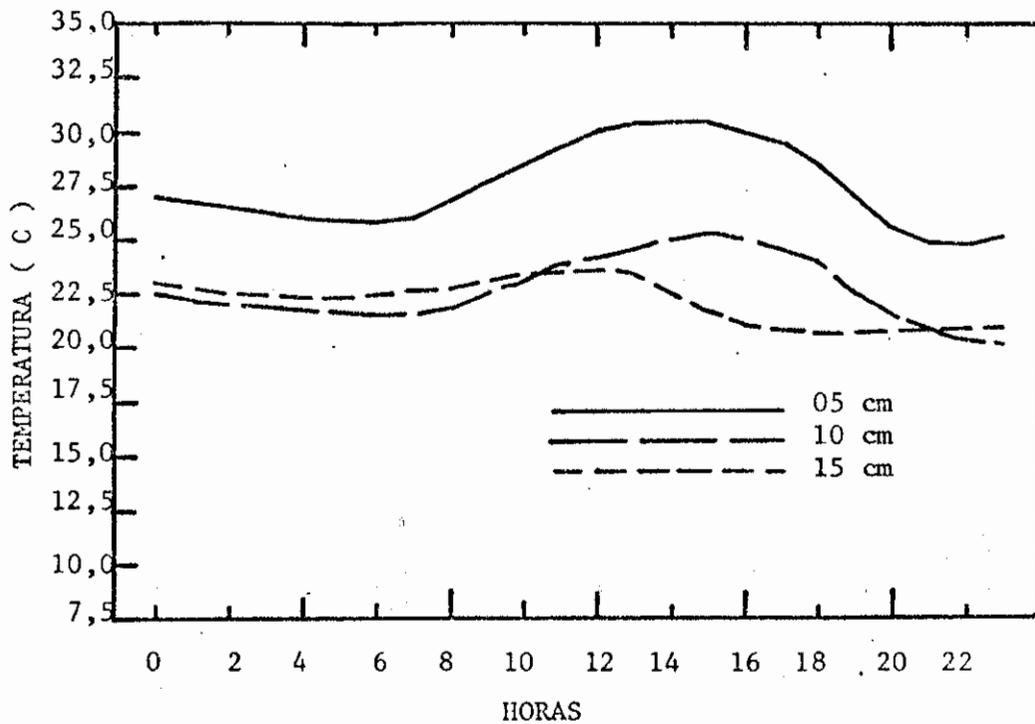
a precipitação média foi mais baixa, a amplitude da onda de temperatura foi maior e para precipitação média mais alta a amplitude da onda de temperatura foi menor, o que comprova que a radiação solar e o conteúdo de umidade no perfil do solo são as principais variáveis de controle da penetração da onda de calor.

5.1.3 - Ciclo Diário

Para representar o ciclo diário da temperatura do solo selecionou-se quatro dias com características distintas, baseando-se em dados de precipitação e nebulosidade. O dia 05/03/85, representado na figura 5.4(a), apresentou 104,3 mm de precipitação e 7,4 décimos de cobertura de nuvens. O conteúdo de umidade no perfil do solo, neste dia específico, foi alto, visto que, houve precipitações em vários dias anteriores a este. A onda de temperatura, neste caso não representa uma verdadeira curva seno, principalmente no nível de 15 cm, onde ela aparece totalmente diferente do comportamento característico. A amplitude da onda à profundidade de 05 cm foi 5,5°C com temperatura máxima (30,5°C) ocorrendo às 15 horas e a temperatura mínima ocorrendo às 22 horas. No nível de 10 cm a amplitude diminuiu para 4,2°C com a temperatura máxima (25,2°C) às 15 horas e a temperatura mínima (21,0°C) às 22 horas. O nível de 15 cm apresentou uma temperatura máxima de 23,6°C às 12 horas e também a temperatura mínima não ocorreu nas primeiras horas da manhã, como normalmente é esperado, e sim por volta das 16 horas, atingindo 20,6°C e implicando portanto, num valor para a amplitude um tanto alto (3,0°C) neste nível. A figura 5.4(b) representa o ciclo diário de temperatura para o mesmo dia 05/03/85, considerando-se o



(a) Dia 05/03/85



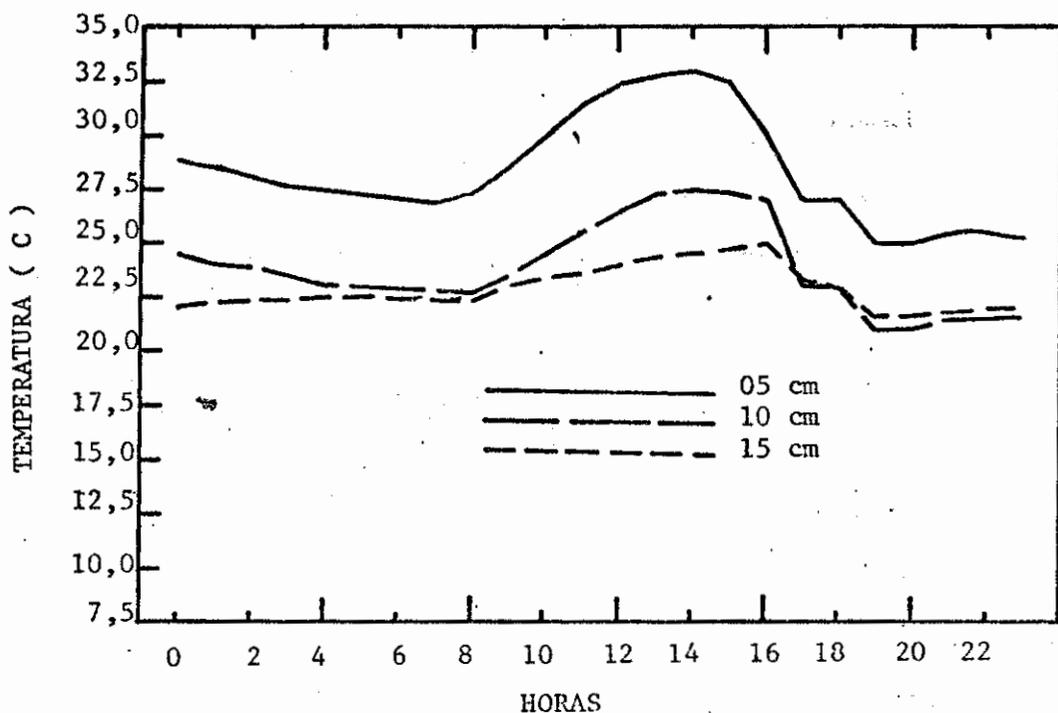
(b) Dia 05/03/85 (valores suavizados)

Figura 5.4 - Variação diária da temperatura do solo à profundidades de 05, 10 e 15 cm para Cachoeira Paulista - SP.

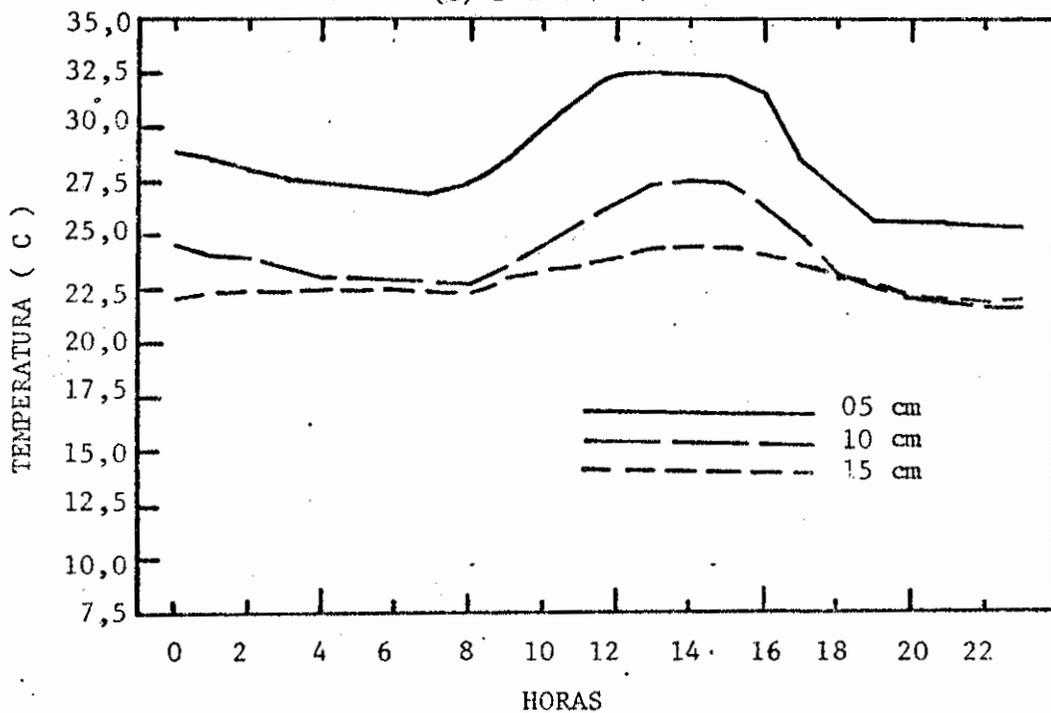
perfil suavizado que as curvas deveriam representar caso não fôsse registrado um valor tão alto de precipitação. Neste caso a amplitude da onda à profundidade de 05 cm cai para 4,7 °C, em 10 cm cai para 3,7°C e em 15 cm para 1,3 °C e as máximas ocorrem entre 12 e 15 horas enquanto as mínimas ocorrem nas primeiras horas da manhã, entre 4 e 6 horas.

A figura 5.4(c) representa a variação diária da temperatura do solo para o dia 08/04/85 com precipitação igual a 46,5 mm porém, em alguns dias antecedentes a este não foi registrado nenhuma precipitação. A onda de temperatura do solo comporta-se como uma curva seno até aproximadamente 16 horas e a partir daí há uma variação um tanto brusca nos valores das temperaturas. Como no caso anterior, as temperaturas máximas ocorreram entre 14 e 16 horas nos três níveis considerados, mas as temperaturas mínimas ocorreram por volta das 19 horas em todos os níveis e as amplitudes foram mais altas, isto é, 8,0°C, 6,5°C e 3,4°C, respectivamente. Provavelmente a precipitação registrada neste dia ocorreu depois das 16 horas e alterou o comportamento da curva a partir deste horário. Considerando-se o perfil suavizado que as curvas deveriam representar, os valores das amplitudes diminuem para 5,6°C, 4,8°C e 2,2°C, respectivamente, com as temperaturas mínimas ocorrendo nas primeiras horas da manhã (figura 5.4(d)).

Considerando o período de inverno, para representá-lo, escolheu-se o dia 25/07/85 (figura 5.4(e)) em que não ocorreu nenhuma precipitação e houve pouca nebulosidade. As temperaturas neste dia foram as mais baixas com o valor máximo de 21,4°C registrado em 05 cm. A onda de temperatura, neste caso, é uma verdadeira curva senoidal e as amplitudes ficaram entre 8,4°C, 6,8°C e 2,8°C nas três profundidades analisadas. A defasagem no tempo apareceu distintamente, com as máximas ocorrendo às 15, 16 e 17 horas e as mínimas às 7, 8 e 9 horas nos níveis considerados.



(c) Dia 08/04/85



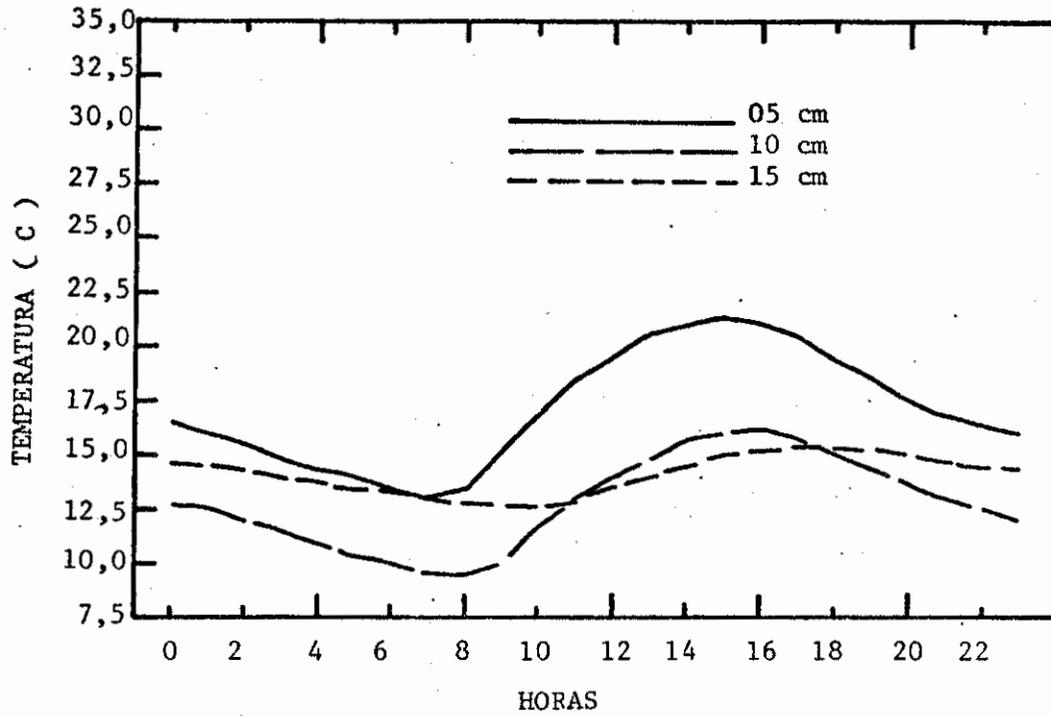
(d) Dia 08/04/85 (valores suavizados)

Figura 5.4 - Variação diária da temperatura do solo às profundidades de 05, 10 e 15 cm para Cachoeira Paulista - SP.

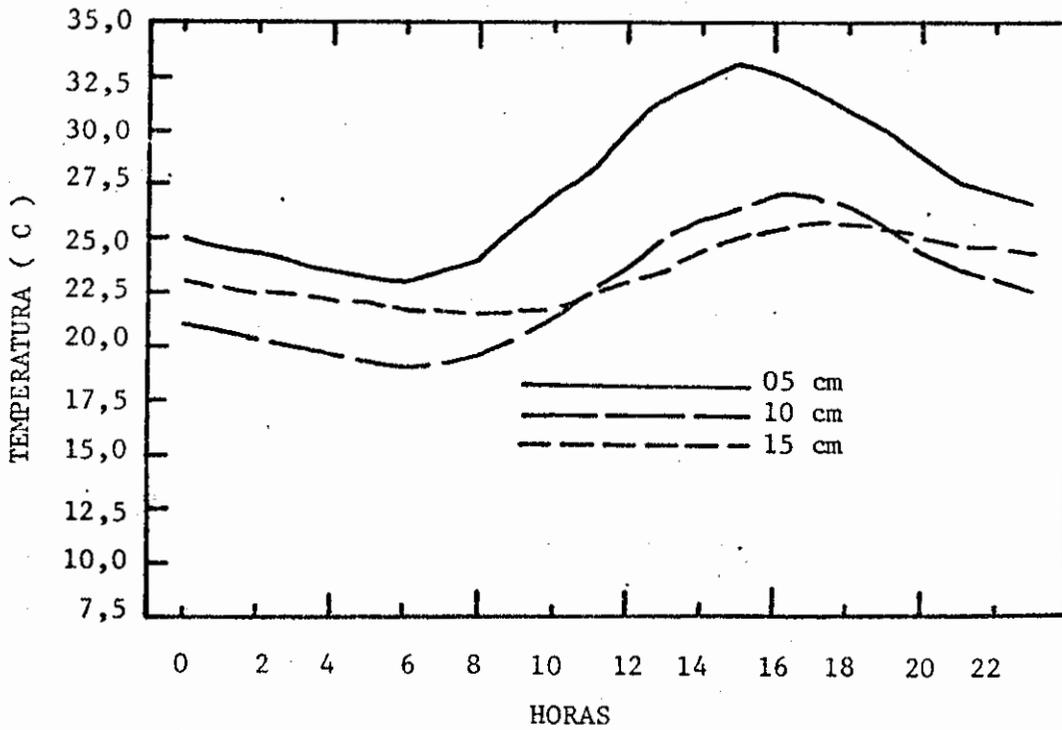
Outro caso estudado, foi o dia 07/11/85, representado na figura 5.4(f), com nenhuma precipitação, pouca nebulosidade, porém sucedeu um período anterior de 10 dias com chuvas. A onda de temperatura do solo para este dia também foi uma verdadeira curva seno e como é esperado na estação da primavera, as amplitudes de temperatura foram maiores, ou seja, foram 10,0°C, 8,0°C e 4,2°C para os três níveis. Como no caso anterior, a defasagem no tempo também é distinta, com máximas de 33°C, 27°C e 25,7°C ocorrendo nos mesmos horários que àquelas e diferindo somente no horário das mínimas que ficou entre 6 e 8 horas para os três níveis.

Através dos dados de temperaturas nos níveis citados obteve-se os perfis verticais de temperatura do solo para os dias estudados. As figuras 5.5(a) obtidas com os valores suavizados de temperaturas e 5.5(b) mostram estes perfis salientando a onda descendente com o decréscimo da amplitude e o aumento na defasagem com o tempo. Pode-se observar que nos dias chuvosos os perfis movimentam-se entre dois extremos, o das 14 e o das 22 horas, caracterizados respectivamente, por acentuado balanço de radiação (figura 5.5(a)). Assim, às 14 horas, a temperatura máxima verificada em 05 cm, diminui rapidamente, até o nível de 15 cm e depois deve diminuir suavemente com a profundidade. A inversão da isócrona das 18 horas verificada no dia 05/03/85 pode ter sido mascarada pelos efeitos da precipitação ocorrida neste dia. Durante todo o resto do período, os perfis situam-se entre esses dois limites.

Para os dias limpos, sem precipitação, os perfis de temperatura movimentam-se entre os extremos das 16 e 8 horas e nestes dias os balanços de radiação foram mais pronunciados (figura 5.5(b)). No dia 07/11/85, a temperatura máxima às 16 horas verificada em 05 cm também



(e) Dia 25/07/85



(f) Dia 07/11/85

Figura 5.4 - Variação diária da temperatura do solo às profundidades de 05, 10 e 15 cm para Cachoeira Paulista - SP.

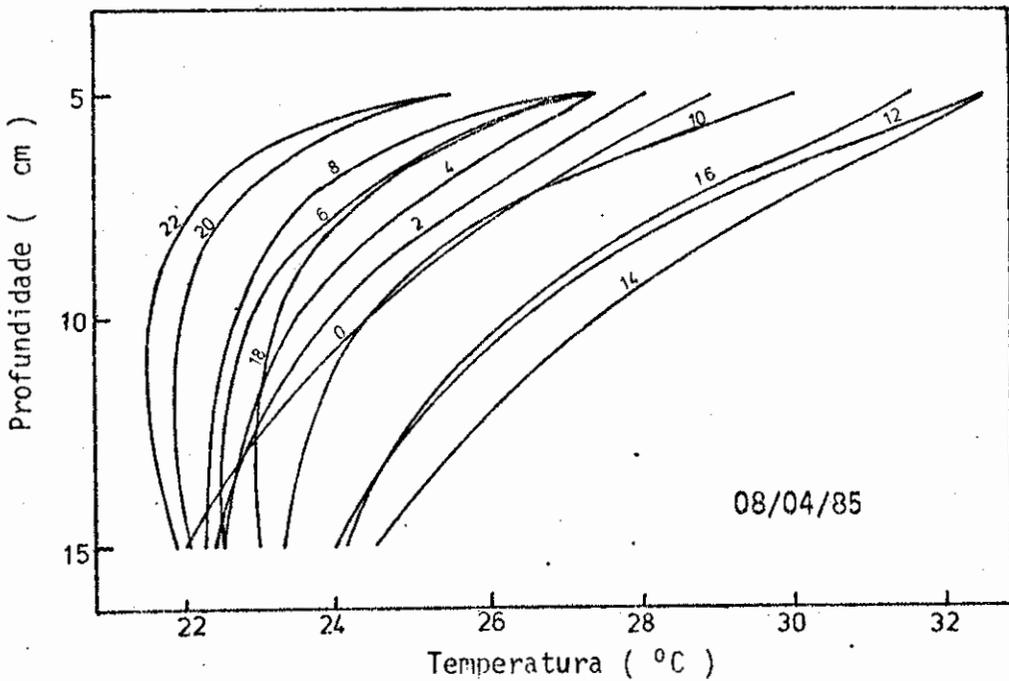
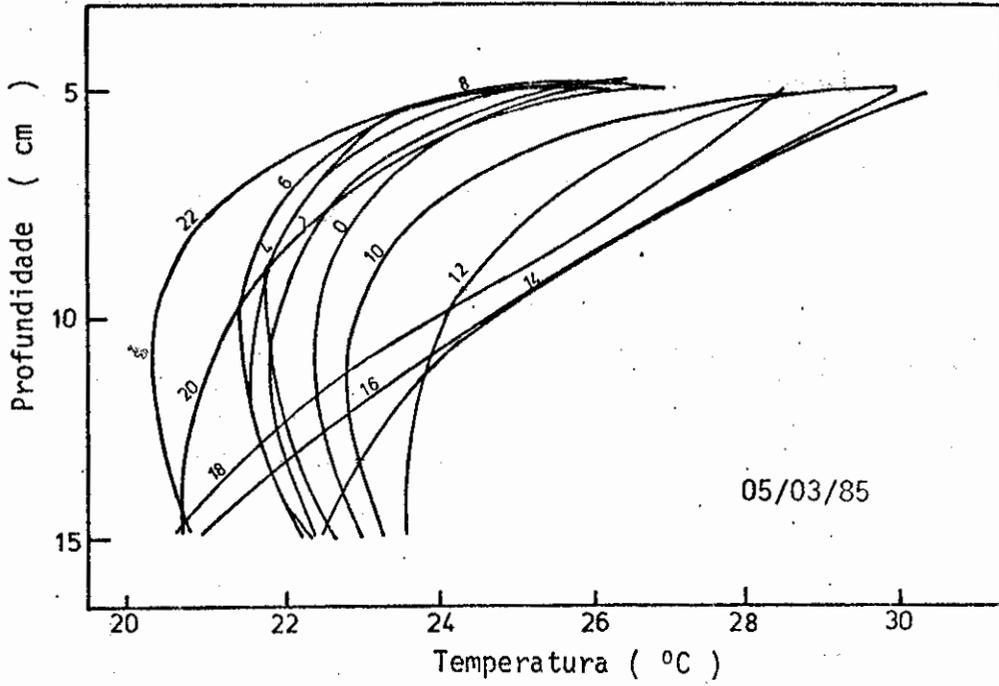


Figura 5.5 (a) - Perfis verticais de temperatura do solo (valores suavizados) às profundidades de 05, 10 e 15 cm em 05/03/85 e 08/04/85, Cachoeira Paulista - SP.

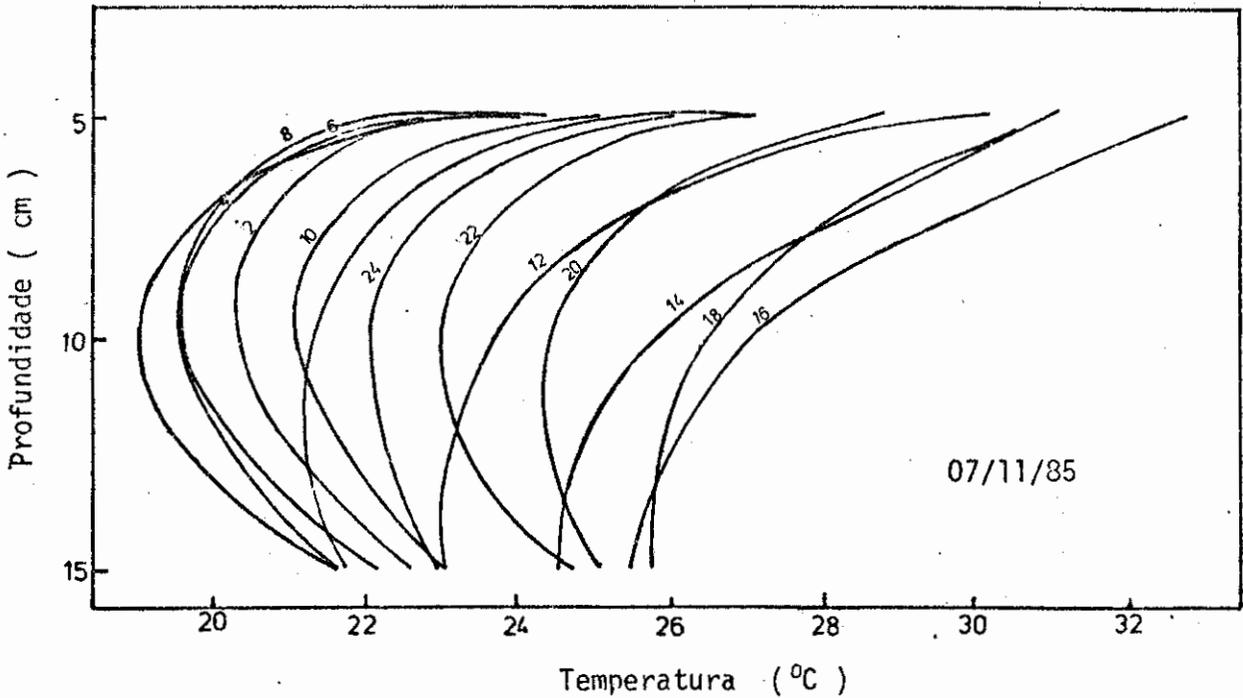
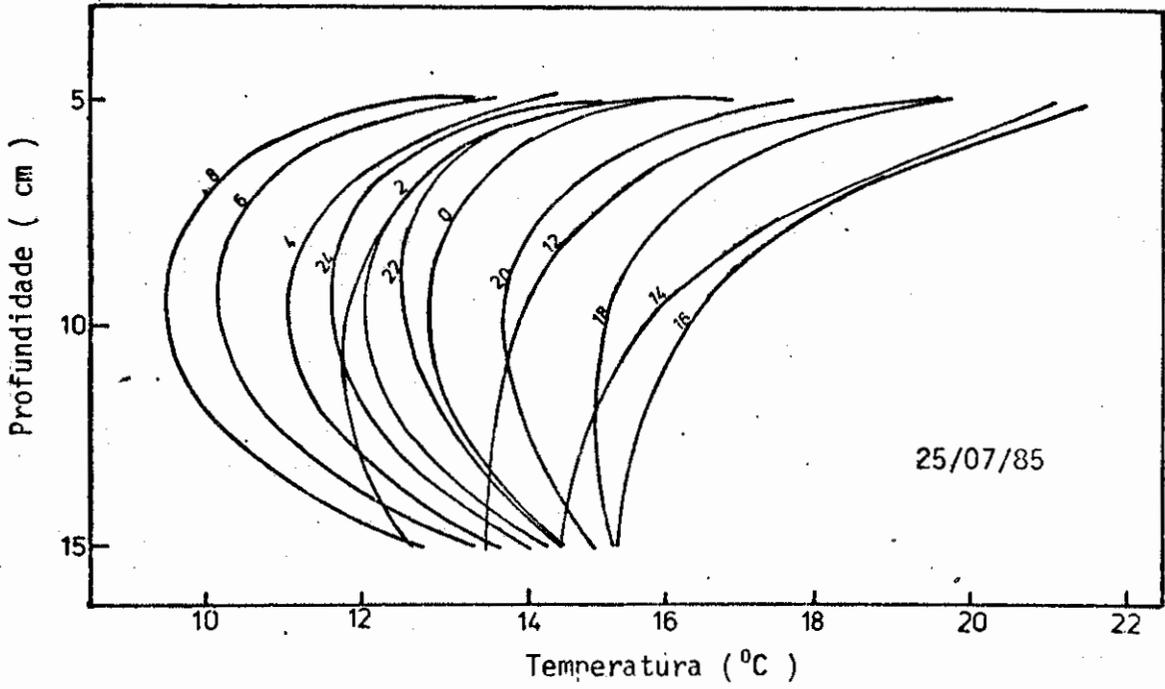


Figura 5.5 (b) - Perfis verticais de temperatura do solo às profundidades de 05, 10 e 15 cm em 25/07/85 e 07/11/85, Cachoeira Paulista - SP.

diminui rapidamente, até o nível de 15 cm. Às 8 horas, a temperatura máxima em 05 cm diminui lentamente até 15 cm. No caso do dia 25/07/85 as variações de temperatura são menos pronunciadas. Naquele caso a inclinação da curva observada com a profundidade indica que o período de observação corresponde a uma época de maior aquecimento local enquanto que neste último há um menor aquecimento e portanto maior resfriamento das camadas superficiais do solo.

5.2 - Análise Harmônica

Em todas as profundidades do perfil do solo, a temperatura varia como uma função harmônica de tempo ao redor de um valor médio. Esta suposição leva a uma descrição aproximada das flutuações reais causada pela sucessão do dia e noite, ou inverno e verão. É necessário então, que uma interpretação quantitativa das temperaturas do solo seja considerada.

A decomposição de Fourier (equação 4.1) das séries de temperaturas médias revelam que a onda seno, descrevendo os ciclos anual e diário contribuem com 90% da variância em todos os casos.

5.2.1 - Ciclo Anual

As tabelas 5.1 e 5.2 expressam os resultados alcançados

Tabela 5.1 - Análise de Fourier para temperaturas médias mensais, ano de 1984, profundidades de 05, 10 e 15 cm, harmônicos de 1 a 3 - Cachoeira Paulista - SP.

PROFUNDIDADE (cm)		HARMÔNICOS		
		1	2	3
05	AMPLITUDE (°C)	6,088	0,968	1,283
	FASE (graus)	75,933	326,567	360,000
10	AMPLITUDE (°C)	5,325	0,753	1,106
	FASE (graus)	78,067	287,867	353,950
15	AMPLITUDE (°C)	4,808	0,845	1,167
	FASE (graus)	75,316	286,900	358,350

Tabela 5.2 - Análise de Fourier para temperaturas médias mensais, ano de 1985, profundidades de 05, 10 e 15 cm, harmônicos de 1 a 3 - Cachoeira Paulista - SP.

PROFUNDIDADE (cm)		HARMÔNICOS		
		1	2	3
05	AMPLITUDE (°C)	5,426	1,700	0,436
	FASE (graus)	85,150	293,533	316,550
10	AMPLITUDE (°C)	5,164	1,801	0,322
	FASE (graus)	87,167	293,633	338,750
15	AMPLITUDE (°C)	4,650	1,431	0,255
	FASE (graus)	89,567	275,200	11,300

pela análise harmônica (de Fourier) das observações médias mensais para os anos de 1984 e 1985, às profundidades de 05, 10 e 15 cm. Nestas tabelas $N = 12 = P$, e t varia desde zero (janeiro) até 11 (dezembro). Verifica-se uma pequena variação com a profundidade da amplitude dos harmônicos nos dois anos estudados, esta característica teoricamente é esperada, dos quais o primeiro harmônico destaca-se predominantemente. Há uma pequena variação no tempo de máxima do primeiro harmônico em todos os níveis do solo, do ano de 1984 para o ano de 1985. A tabela 5.3 mostra a variância total (razão entre a somatória dos quadrados dos desvios e o número de observações), bem como o fluxograma ou porcentagem da variância que é dado por:

$$\text{Fluxograma} = \text{amplitude} \cdot \text{amplitude} \cdot 50 / \text{variância}$$

Pode-se verificar nesta tabela que a porcentagem acumulada para os três harmônicos corresponde a 98%, o que significa que este número de harmônicos foi suficiente para representar, de maneira integral, a variação da temperatura do solo para todas as profundidades nos dois anos considerados.

A figura 5.6 corresponde a plotagem da variação da amplitude com a profundidade para todos os harmônicos da onda anual de temperatura do solo em 1984 e 1985. Uma característica distinta nesta figura são os valores das amplitudes ligeiramente mais altos encontrados para o terceiro harmônico no ano de 1984 e isto deve-se ao fato de que neste ano as temperaturas foram mais altas do que no ano seguinte, portanto esta condição, naturalmente, refletiu-se nos coeficientes de Fourier, embora a teoria clássica de escoamento de calor mostre que a magnitude relativa dos vários harmônicos deve diminuir a medida que se penetra no perfil do solo.

Tabela 5.3 - Porcentagem da Variância para os harmônicos 1 a 3, ciclo anual de 1984 e 1985.

ANO	PROFUNDI- DADE(cm)	VARIÂNCIA TOTAL	FLUXOGRAMA(%)		
			1	2	3
1984	05	20,095	92,210	2,333	4,098
	10	15,286	92,760	1,854	4,002
	15	12,735	90,774	2,802	5,348
1985	05	16,612	88,623	8,694	0,573
	10	15,205	87,681	10,665	0,341
	15	12,031	89,859	8,509	0,270

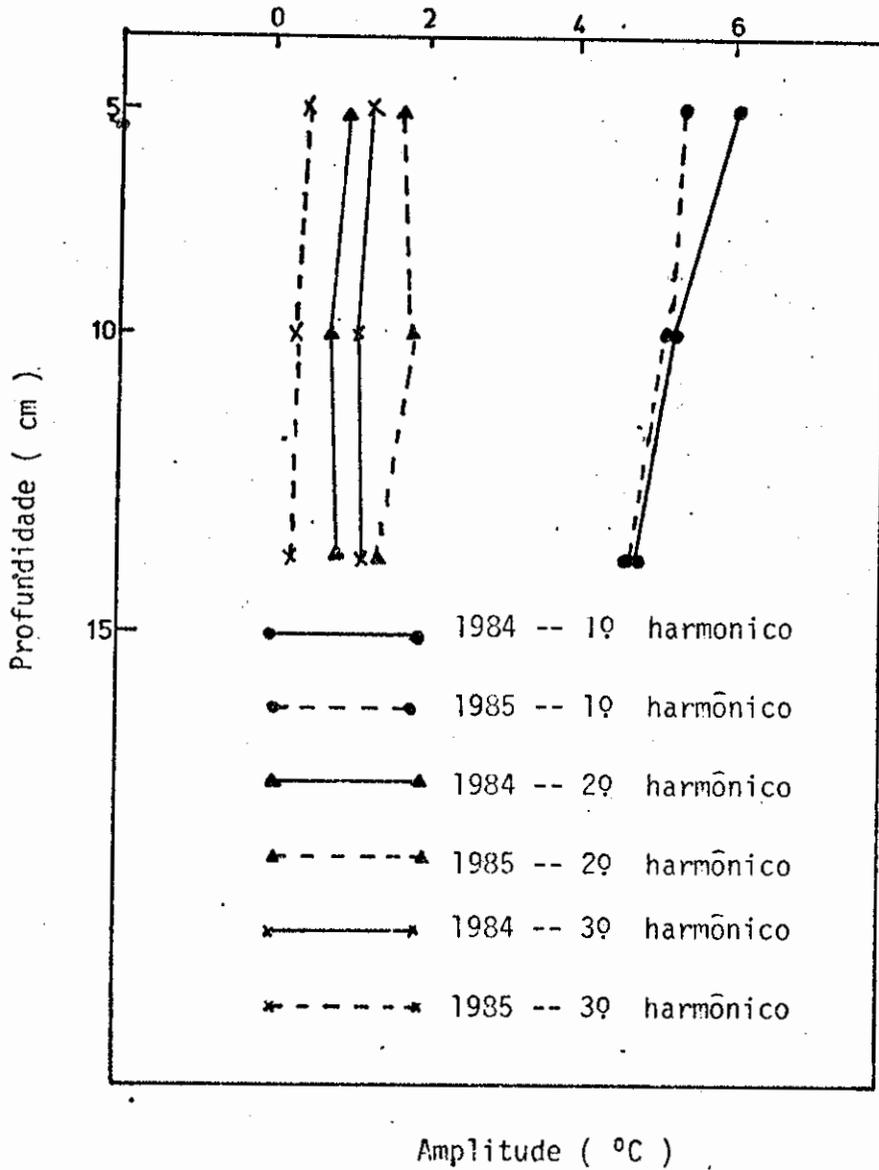


Figura 5.6 - Análise de Fourier. Variação da amplitude com a profundidade, harmônicos de 1 a 3, para o ciclo de temperatura em 05, 10 e 15 cm nos anos de 1984 e 1985, Cachoeira Paulista - SP.

5.2.2 - Ciclo Sazonal

Para a análise harmônica sazonal utilizou-se as temperaturas médias (de 2 em 2 horas, hora local) para os meses típicos das quatro estações do ano. As tabelas 5.4 e 5.5 expressam estes resultados, onde $N = 12 = P$ e t varia desde zero (hora zero) até 11 (22 horas). Como no ciclo anual, a amplitude dos harmônicos nos dois anos estudados varia sensivelmente com a profundidade e o primeiro harmônico também destaca-se com predominância.

Quanto ao fluxograma ou percentagem da variância acumulada para os três harmônicos, observa-se nas tabelas 5.6 e 5.7 que estes valores ultrapassam 99% em todos os casos, o que significa que a análise harmônica representa de forma bastante satisfatória o ciclo sazonal de temperatura.

5.2.3 - Ciclo Diário

Os coeficientes de Fourier para o ciclo diário de temperatura do solo, foram calculados baseando-se em dados horários para os quatro dias selecionados. Aqui $N = 24 = P$ e t varia desde zero até 23. O fator tempo $t = 0$ representa a hora zero local e $t = 23$ representa as 23 horas (local). A tabela 5.8 mostra a análise de Fourier (diária) e verifica-se que os valores encontrados não apresentam nenhum desvio, o

Tabela 5.4 - Análise de Fourier para temperaturas médias mensais, ciclo sazonal de 1984, profundidades de 05, 10 e 15 cm, harmônicos de 1 a 3 - Cachoeira Paulista - SP.

MESES	PROF. (cm)		HARMÔNICOS		
			1	2	3
JANEIRO	05	AMPLITUDE (°C)	3,814	0,911	0,190
		FASE (graus)	319,258	56,329	285,255
	10	AMPLITUDE (°C)	2,941	0,601	0,154
		FASE (graus)	332,912	32,755	282,529
	15	AMPLITUDE (°C)	1,407	0,292	0,053
		FASE (graus)	17,927	327,167	161,564
ABRIL	05	AMPLITUDE (°C)	1,781	0,542	0,060
		FASE (graus)	322,511	28,474	303,690
	10	AMPLITUDE (°C)	1,378	0,362	0,033
		FASE (graus)	336,131	3,963	270,000
	15	AMPLITUDE (°C)	0,657	0,145	0,017
		FASE (graus)	137,056	293,413	90,001
JULHO	05	AMPLITUDE (°C)	2,746	0,867	0,107
		FASE (graus)	324,581	30,000	93,816
	10	AMPLITUDE (°C)	2,181	0,625	0,060
		FASE (graus)	334,629	13,898	326,311
	15	AMPLITUDE (°C)	0,728	0,130	0,047
		FASE (graus)	29,344	296,329	45,001
OUTUBRO	05	AMPLITUDE (°C)	3,661	0,871	0,075
		FASE (graus)	319,336	35,706	296,566
	10	AMPLITUDE (°C)	3,072	0,629	0,174
		FASE (graus)	331,793	23,413	286,699
	15	AMPLITUDE (°C)	1,300	0,252	0,083
		FASE (graus)	28,360	313,372	0,001

Tabela 5.5 - Análise de Fourier para temperaturas médias mensais, ciclo sazonal de 1985, profundidades de 05, 10 e 15 cm, harmônicos de 1 a 3 - Cachoeira Paulista - SP.

MESES	PROF. (cm)		HARMÔNICOS		
			1	2	3
JANEIRO	05	AMPLITUDE (°C)	2,249	0,578	0,075
		FASE (graus)	325,667	18,482	333,436
	10	AMPLITUDE (°C)	1,621	0,376	0,017
		FASE (graus)	337,203	357,457	0,001
	15	AMPLITUDE (°C)	0,745	0,161	0,033
		FASE (graus)	12,524	308,948	0,001
ABRIL	05	AMPLITUDE (°C)	2,692	0,845	0,149
		FASE (graus)	320,742	34,901	333,435
	10	AMPLITUDE (°C)	2,058	0,585	0,085
		FASE (graus)	334,334	15,710	11,309
	15	AMPLITUDE (°C)	0,675	0,142	0,037
		FASE (graus)	20,104	324,182	26,566
JULHO	05	AMPLITUDE (°C)	3,717	1,100	0,177
		FASE (graus)	329,358	28,497	318,815
	10	AMPLITUDE (°C)	3,015	0,854	0,105
		FASE (graus)	340,571	11,260	341,566
	15	AMPLITUDE (°C)	1,157	0,285	0,047
		FASE (graus)	21,551	324,182	45,001
OUTUBRO	05	AMPLITUDE (°C)	3,925	1,043	0,127
		FASE (graus)	316,348	49,406	293,198
	10	AMPLITUDE (°C)	3,076	0,732	0,047
		FASE (graus)	330,621	22,066	315,001
	15	AMPLITUDE (°C)	1,552	0,355	0,047
		FASE (graus)	9,367	320,633	45,001

Tabela 5.6 - Porcentagem da Variância para os harmônicos 1 a 3, ciclo sazonal de 1984.

MESES	PROFUND. (cm)	VARIÂNCIA	FLUXOGRAMA (%)		
			1	2	3
JANEIRO	05	7,709	94,334	5,385	0,234
	10	4,519	95,677	3,993	0,261
	15	1,035	95,673	4,120	0,134
ABRIL	05	1,737	91,305	8,450	0,104
	10	1,017	93,328	6,431	0,055
	15	0,227	95,131	4,653	0,061
JULHO	05	4,157	90,718	9,035	0,137
	10	2,579	92,244	7,561	0,070
	15	0,275	96,341	3,084	0,404
OUTUBRO	05	7,088	94,564	5,351	0,039
	10	4,961	95,088	3,990	0,305
	15	0,881	95,947	3,611	0,394

Tabela 5.7 - Porcentagem da Variância para os harmônicos 1 a 3, ciclo sazonal de 1985.

MESES	PROFUND. (cm)	VARIÂNCIA	FLUXOGRAMA (%)		
			1	2	3
JANEIRO	05	2,702	93,603	6,190	0,103
	10	1,387	94,704	5,085	0,010
	15	0,292	95,028	4,420	0,190
ABRIL	05	3,996	90,698	8,928	0,278
	10	2,294	92,311	7,453	0,157
	15	0,239	95,382	4,241	0,294
JULHO	05	7,544	91,559	8,026	0,208
	10	4,923	92,328	7,400	0,113
	15	0,711	94,017	5,701	0,156
OUTUBRO	05	8,258	93,252	6,581	0,098
	10	5,002	94,567	5,357	0,022
	15	1,270	94,875	4,954	0,088

Tabela 5.8 - Análise de Fourier para temperaturas médias diárias, profundidades de 05,10 e 15 cm, harmônicos de 1 a 3. Cachoeira Paulista - SP.

DATA	PROFUND.(cm)	HARMÔNICOS	1	2	3
05/03/85	05	AMPLITUDE(°)	2,318	1,232	0,526
		FASE(graus)	291,830	25,006	33,667
	10	AMPLITUDE(°)	1,729	1,052	0,462
		FASE(graus)	297,920	8,119	28,079
	15	AMPLITUDE(°)	1,190	0,725	0,167
		FASE(graus)	328,066	80,361	333,564
08/04/85	05	AMPLITUDE(°)	2,527	2,168	0,207
		FASE(graus)	274,824	42,218	78,813
	10	AMPLITUDE(°)	1,830	1,734	0,210
		FASE(graus)	285,706	32,127	97,519
	15	AMPLITUDE(°)	1,053	0,540	0,018
		FASE(graus)	289,415	18,482	322,861
25/07/85	05	AMPLITUDE(°)	3,442	1,368	0,194
		FASE(graus)	331,259	33,165	326,261
	10	AMPLITUDE(°)	2,700	1,169	0,175
		FASE(graus)	344,721	18,737	324,385
	15	AMPLITUDE(°)	1,169	0,453	0,068
		FASE(graus)	23,925	338,676	77,881
07/11/85	05	AMPLITUDE(°)	4,638	0,926	0,076
		FASE(graus)	329,811	17,588	13,100
	10	AMPLITUDE(°)	3,742	0,612	0,035
		FASE(graus)	341,841	353,356	35,264
	15	AMPLITUDE(°)	2,012	0,360	0,115
		FASE(graus)	5,348	309,958	9,326

que significa que a onda diária de temperatura do solo pode ser bem representada pela análise harmônica. Com relação aos fluxogramas, verifica-se através da tabela 5.9 que nos dias sem precipitação a porcentagem da variância acumulada, para os três harmônicos somam 99%, enquanto que os outros dois dias exibem valores percentuais menores, porém, não inferiores a 90%. Obviamente, as precipitações registradas neste dia, interferiram na análise.

A figura 5.7 representa a variação da amplitude com a profundidade para os quatro dias e a maior variação aparece no primeiro harmônico do dia 07/11/85. Neste dia não houve precipitação, porém os dez dias anteriores foram chuvosos e esta condição, naturalmente, alterou os coeficientes de Fourier. No mês de julho, a amplitude diminui rapidamente com a profundidade e as menores temperaturas são encontradas à profundidade de 10 cm. Em contraste com o ciclo anual, as variações na fase desde 05 até 15 cm são bastante pronunciadas.

5.2.4 - Tempo dos Extremos

Os tempos dos extremos das ondas constituintes dos ciclos de temperatura podem ser calculados a partir da equação para os tempos de máxima, ou seja, o tempo de máxima adicionado à amplitude é igual a 90°C Ou 450°C. Assim:

$$w_j t + j = 90^\circ \text{ ou } 450^\circ, \text{ onde } j \text{ é o número do termo.}$$

Para o ciclo anual de 1984, por exemplo, à profundidade

Tabela 5.9 - Porcentagem da Variância para os harmônicos 1 a 3, ciclo diário em 05/03/85, 08/04/85, 25/07/85 e 07/11/85.

DATA	PROFUNDI- DADE(cm)	VARIÂNCIA TOTAL	FLUXOGRAMA(%)		
			1	2	3
05/03/85	05	3,647	73,681	20,797	3,799
	10	2,243	66,608	24,672	4,749
	15	1,069	66,262	24,576	1,298
08/04/85	05	5,801	55,039	40,489	0,371
	10	3,337	50,178	45,066	0,659
	15	0,709	78,241	20,535	0,022
25/07/85	05	6,923	85,543	13,516	0,270
	10	4,385	83,143	15,575	0,347
	15	0,795	85,995	12,901	0,289
07/11/85	05	11,227	95,806	3,821	0,026
	10	7,219	96,976	2,596	0,008
	15	2,119	95,538	3,053	0,314

Profundidade (cm)

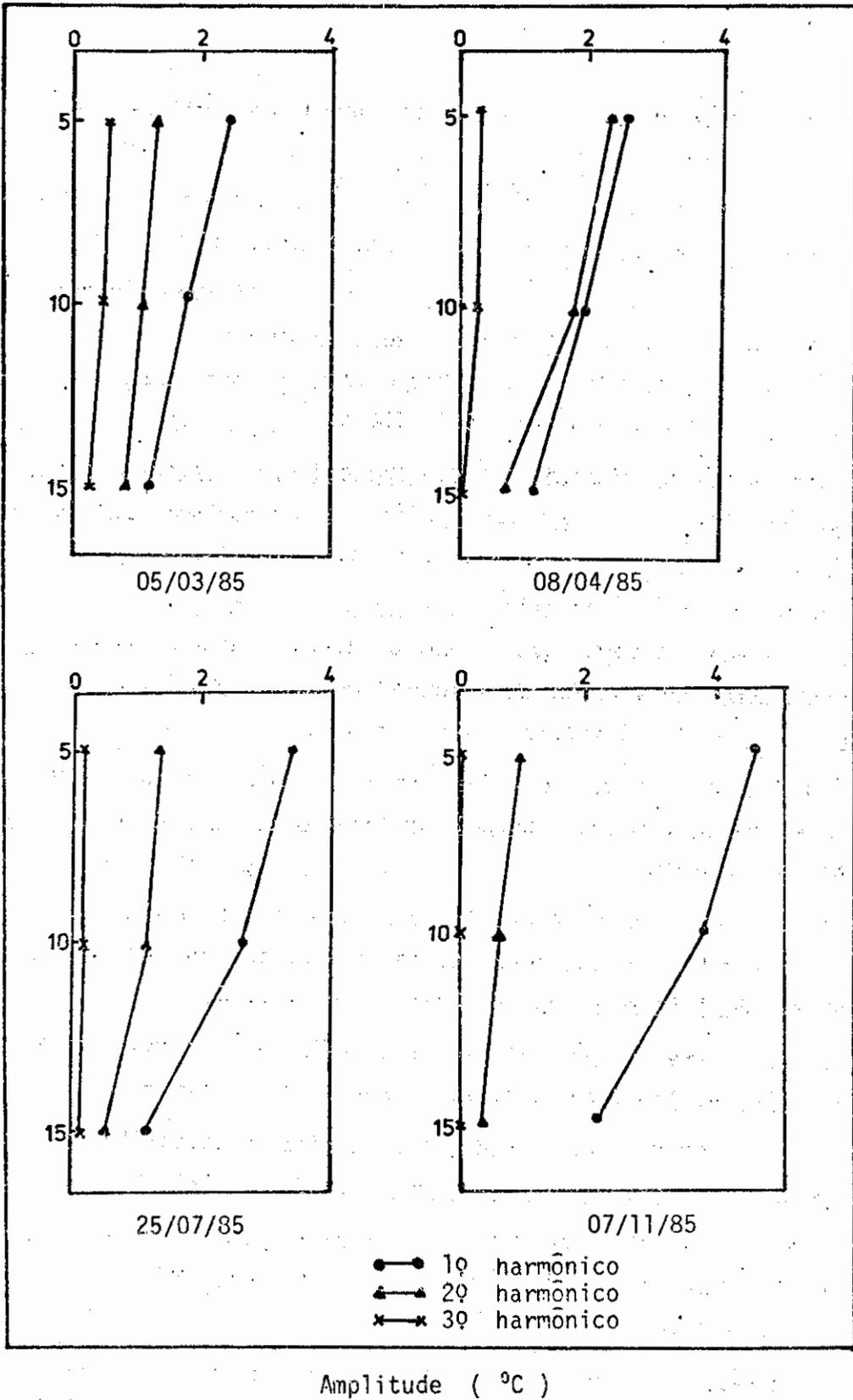


Figura 5.7 - Análise de Fourier. Variação da amplitude com a profundidade, harmônicos de 1 a 3, para o ciclo diário da temperatura em 05, 10 e 15 cm, Cachoeira Paulista - SP.

de 05 cm, o tempo de máxima da primeira onda é :

$$w_j t_j + 75,933^\circ = 90^\circ \text{ ou } w_j t_{j \text{ max}} = 14,067^\circ.$$

O ângulo em graus deve ser multiplicado por 1,01416 para obter a conversão em dias, já que 360° corresponde a um ano médio de 365,25 dias. Portanto, $14,067^\circ * 1,01416 = 14$ dias, isto é, transcorreram 14 dias entre 1º de janeiro e o tempo de máxima.

Para o ciclo diário, os tempos de máxima das ondas, às várias profundidades, são obtidas de forma similar porém, os ângulos em graus deve ser multiplicado por 0,0667 para obter a conversão em horas (360° corresponde a um dia de 24 horas).

5.3 - Difusividade Térmica

A difusividade térmica, que constitui um índice de facilidade com a qual o solo sofre mudanças de temperatura quando o calor é conduzido através das camadas adjacentes, foi investigada considerando-se um modelo simples de transferência de calor, isto é, àquele em que o solo é um meio homogêneo, semi-infinito, cujas propriedades térmicas permanecem constantes com a profundidade e tempo e o calor é transferido para as camadas mais profundas somente por condução molecular, desprezando os outros processos por serem pequenos. Para todos os ciclos as difusividades foram calculadas pelo método do "range" e da defasagem e através da amplitude e fase do primeiro harmônico da série de Fourier.

5.3.1 - Ciclo Anual

Os resultados para a difusividade térmica do solo, anos 1984 e 1985, através do método do "range", podem ser vistas na tabela 5.10. Este método utiliza as diferenças entre as temperaturas máximas e mínimas para o cálculo da difusividade e verifica-se que não há nenhuma discrepância entre os valores encontrados.

A difusividade térmica média na camada entre 05 e 10 cm é de $15,522 \cdot 10^3 \text{ cm}^2/\text{s}$ para o ano seco e aumenta para $20,325 \cdot 10^3 \text{ cm}^2/\text{s}$ para o ano chuvoso, portanto compatível com a teoria, que estabelece que a difusividade térmica aumenta com o conteúdo de umidade do solo. Na camada mais profunda, entre 10 e 15 cm, o valor médio diminui para $1,255 \cdot 10^3 \text{ cm}^2/\text{s}$ e $1,288 \cdot 10^3 \text{ cm}^2/\text{s}$, respectivamente. Para a camada maior, isto é, entre 05 e 15 cm os valores aumentam, e são $2,884 \cdot 10^3 \text{ cm}^2/\text{s}$ e $3,172 \cdot 10^3 \text{ cm}^2/\text{s}$ para 1984 e 1985, respectivamente.

As figuras 5.8(a) à 5.8(c) são histogramas das difusividades térmicas para os anos de 1984 e 1985 obtidas pelo método do "range" e dão uma visão da variabilidade, mês a mês, dos valores encontrados para as três camadas consideradas. Assim, verifica-se que no ano seco, a difusividade térmica na camada entre 05 e 10 cm alcança um valor máximo em junho, que corresponde ao mês mais seco do ano, enquanto que o menor valor ocorre em novembro, que por sua vez, foi o mês mais chuvoso, durante o ano de 1984. Para o ano chuvoso, o menor valor da difusividade térmica não relaciona-se com o mês mais seco, ou seja, o maior valor para K ocorreu em setembro, que apresentou um valor de precipitação total mensal de 95,2 mm, bastante superior a 0,8 mm, que foi

Tabela 5.10 - Difusividade Térmica ($K \text{ cm}^2 / \text{s}$) para as camadas 05-10 cm, 05-15 cm e 10-15 cm a partir do Método do "Range", ciclo anual de 1984 e 1985 - Cachoeira Paulista - SP.

MESES DO ANO	1984			1985		
	CAMADAS (cm)			CAMADAS (cm)		
	05-10	05-15	10-15	05-10	05-15	10-15
	$K * 10^3 \text{ cm}^2 / \text{s}$			$K * 10^3 \text{ cm}^2 / \text{s}$		
JAN	9,316	3,596	1,892	10,460	3,132	1,484
FEV	14,759	3,534	1,549	13,878	1,348	0,473
MAR	11,361	2,783	1,229	11,479	2,052	0,825
ABR	15,316	3,850	1,714	14,114	1,800	0,667
MAI	15,630	2,823	1,138	14,114	2,919	1,223
JUN	27,346	2,081	0,700	25,830	1,753	0,579
JUL	14,674	1,939	0,724	32,573	2,809	0,965
AGO	18,256	2,004	0,720	16,574	3,136	1,280
SET	9,948	3,528	1,788	36,136	4,027	1,451
OUT	25,830	3,395	1,266	12,631	3,810	1,810
NOV	8,424	3,124	1,615	22,925	4,076	1,636
DEZ	15,401	1,946	0,720	33,182	7,208	3,064
MÉDIA	15,522	2,884	1,255	20,325	3,172	1,288

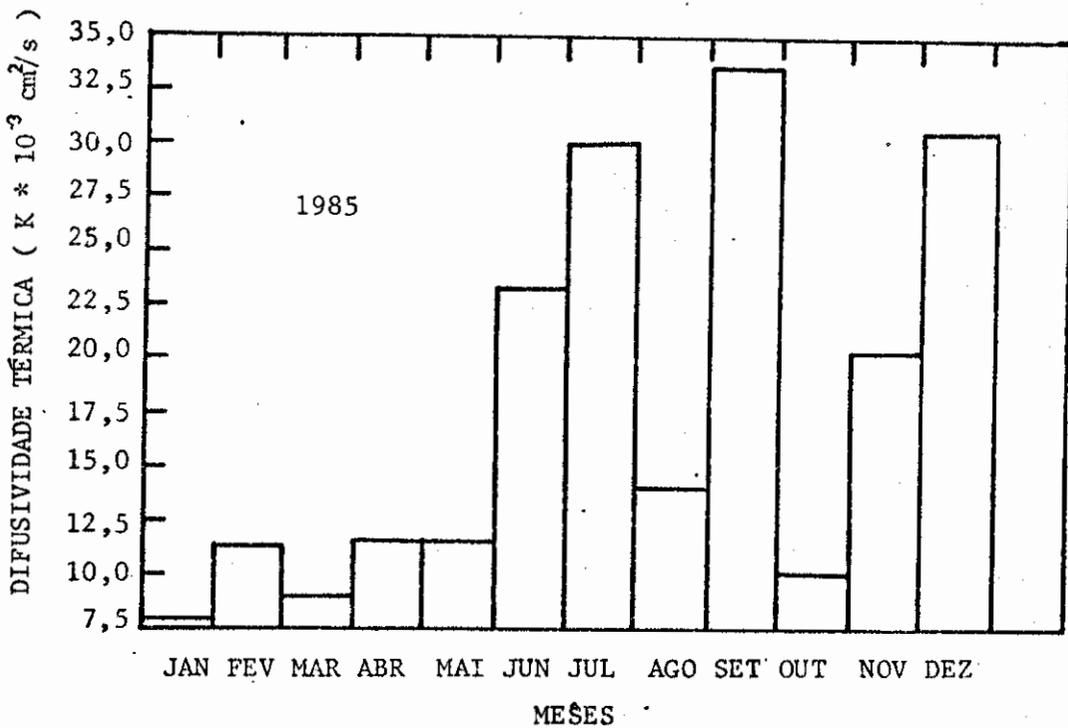
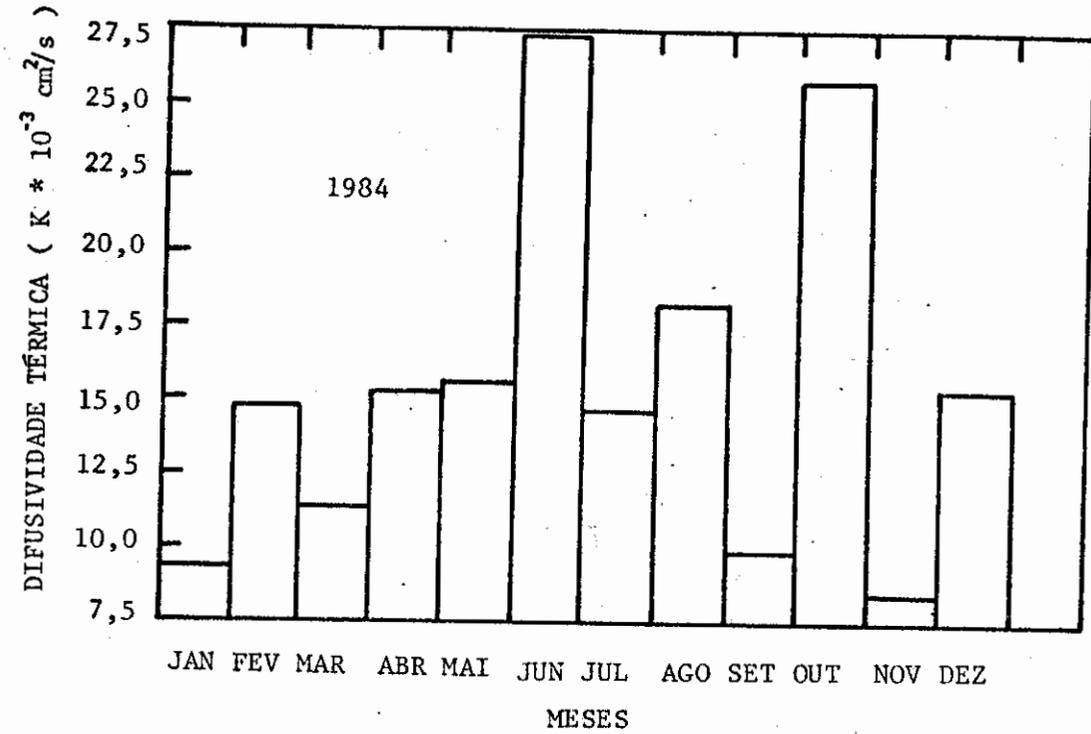


Figura 5.8 (a) - Histogramas para a difusividade térmica na camada entre 05 e 10 cm, anos de 1984 e 1985, obtida pelo Método do " Range " - Cachoeira Paulista - SP.

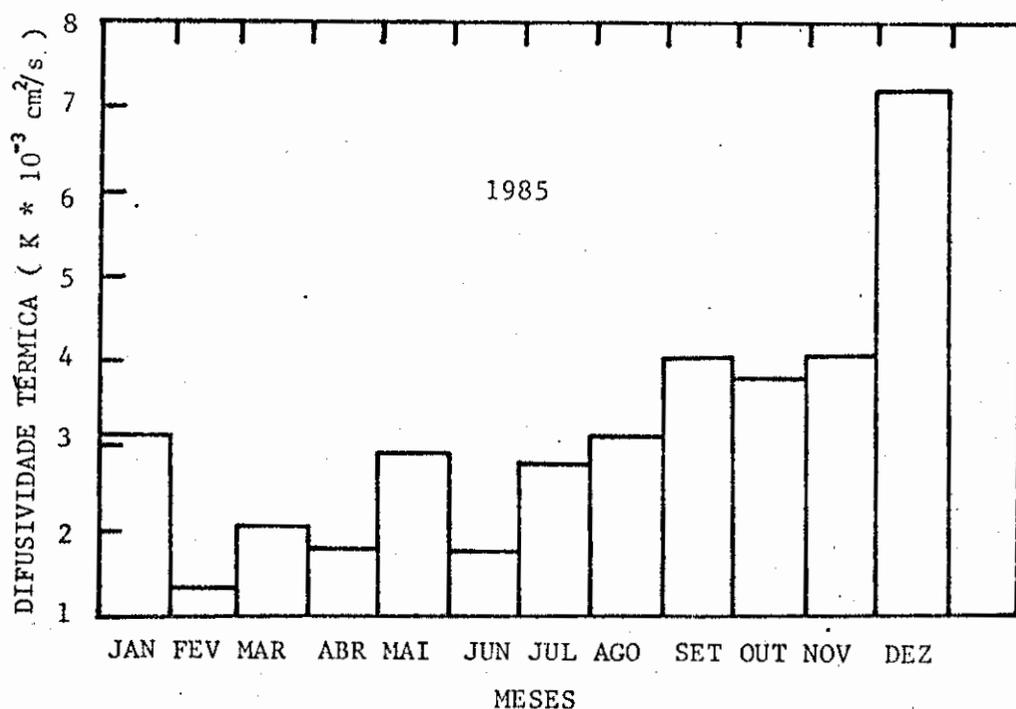
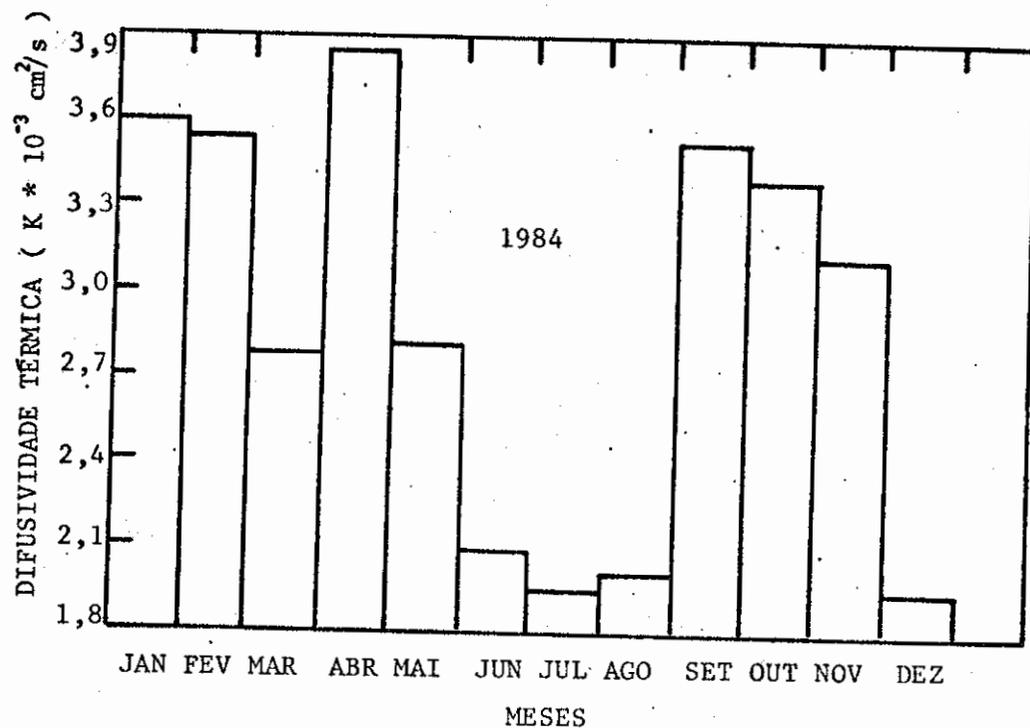


Figura 5.8 (b) - Histogramas para a difusividade térmica na camada entre 05 e 15 cm, anos de 1984 e 1985, obtida pelo Método do " Range " - Cachoeira Paulista - SP.

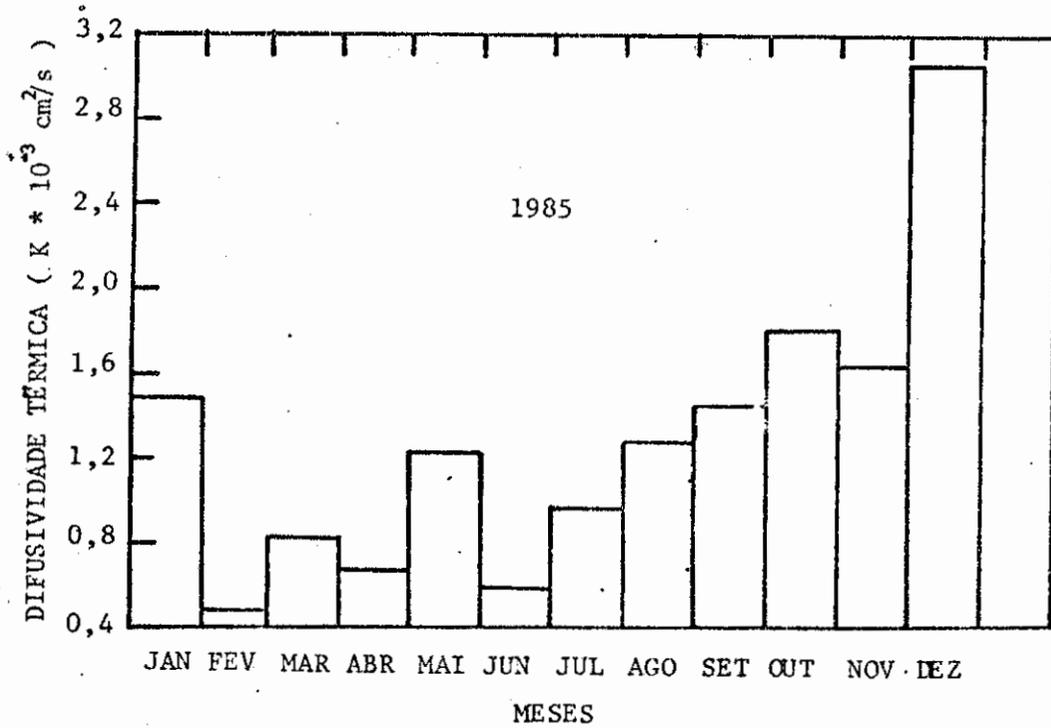
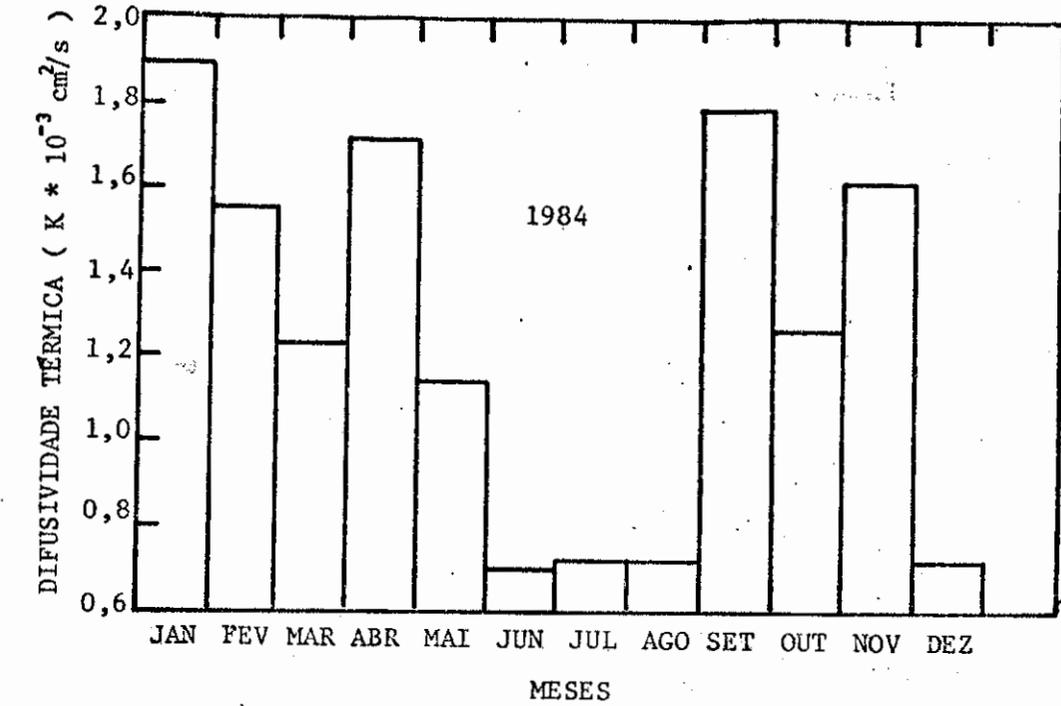


Figura 5.8 (c) - Histogramas para a difusividade térmica na camada entre 10 e 15 cm, anos de 1984 e 1985, obtida pelo Método do " Range " - Cachoeira Paulista - SP.

a precipitação total mensal do mês mais seco (julho).

Para as outras camadas, observa-se menores valores da difusividade térmica. Na camada entre 05 e 15 cm, no ano seco, o maior valor ocorre em abril, enquanto que o menor valor foi encontrado no mês de julho. Já no ano chuvoso, o padrão verificado é diferente, isto é, o maior valor ocorre em dezembro e o menor em fevereiro. Na camada mais profunda, entre 10 e 15 cm, verifica-se outra situação, com os maiores valores encontrados em janeiro (1984) e dezembro (1985) e os menores em junho, para os dois anos, com pequenas diferenças entre um ano e o outro. Neste caso, esta pequena diferença deve-se aos pequenos totais mensais de precipitação, registrados no mês de junho.

A tabela 5.11 expressa os valores para a difusividade térmica do solo nos anos 1984 e 1985, através do método da defasagem, para as três camadas citadas anteriormente. Neste método considera-se a defasagem de tempo entre as máximas temperaturas nas três profundidades. Como as temperaturas médias mensais foram obtidas para cada 2 horas, os tempos de máximas ocorrem na maioria das vezes, num mesmo horário, o que leva a coincidir os valores das difusividades, não representando, portanto, confiavelmente tal propriedade térmica do solo. As figuras 5.9(a) à 5.9(c) são os histogramas para as difusividades obtidas através deste método, que ressaltam a pouca variabilidade, porém salientam o aumento da difusividade no ano chuvoso.

As difusividades térmicas das camadas do solo entre cada uma das sondagens de temperaturas foram ainda computadas, utilizando-se o primeiro harmônico da onda anual da temperatura do solo. Os resultados destes cálculos estão na tabela 5.12. Exceto na camada entre 05 e 15 cm, que apresenta um valor discrepante para a difusividade térmica no ano de 1984, através da fase, os valores são sensivelmente maiores

Tabela 5.11 - Difusividade Térmica ($K \text{ cm}^2 / \text{s}$) para as camadas 05-10 cm, 05-15 cm e 10-15 cm a partir do Método da Defasagem, ciclo anual de 1984 e 1985 - Cachoeira Paulista - SP.

MESES DO ANO	1984 CAMADAS (cm)			1985 CAMADAS (cm)		
	05-10	05-15	10-15	05-10	05-15	10-15
	$K * 10^3 \text{ cm}^2 / \text{s}$			$K * 10^3 \text{ cm}^2 / \text{s}$		
JAN	-	3,316	0,829	3,316	3,316	3,316
FEV	3,316	3,316	3,316	-	13,263	3,316
MAR	3,316	3,316	3,316	3,316	13,263	-
ABR	3,316	1,474	0,829	3,316	3,316	3,316
MAI	-	3,316	0,829	-	13,263	3,316
JUN	-	13,263	3,316	-	3,316	0,829
JUL	3,316	3,316	3,316	3,316	3,316	3,316
AGO	-	13,263	3,316	3,316	3,316	3,316
SET	-	3,316	0,829	-	13,263	3,316
OUT	3,316	3,316	3,316	3,316	3,316	3,316
NOV	3,316	3,316	3,316	3,316	3,316	3,316
DEZ	3,316	13,263	-	3,316	3,316	3,316
MÉDIA	3,316	5,649	2,412	3,316	6,632	3,090

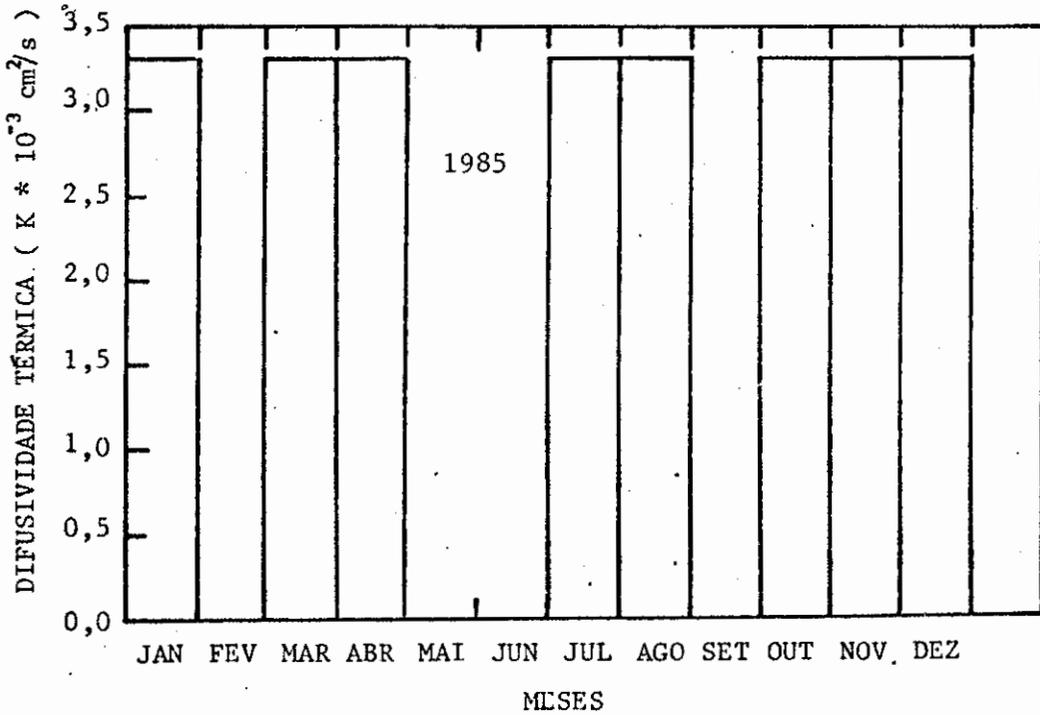
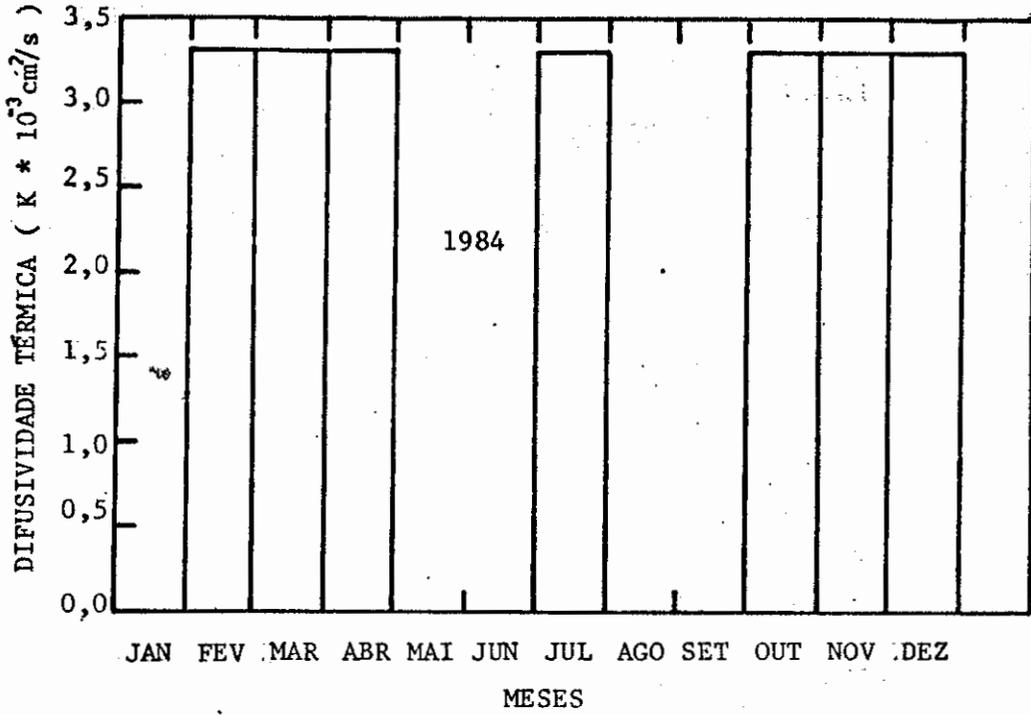


Figura 5.9 (a) - Histogramas para a difusividade térmica na camada entre 05 e 10 cm, anos de 1984 e 1985, obtida pelo Método da Defasagem - Cachoeira Paulista - SP.

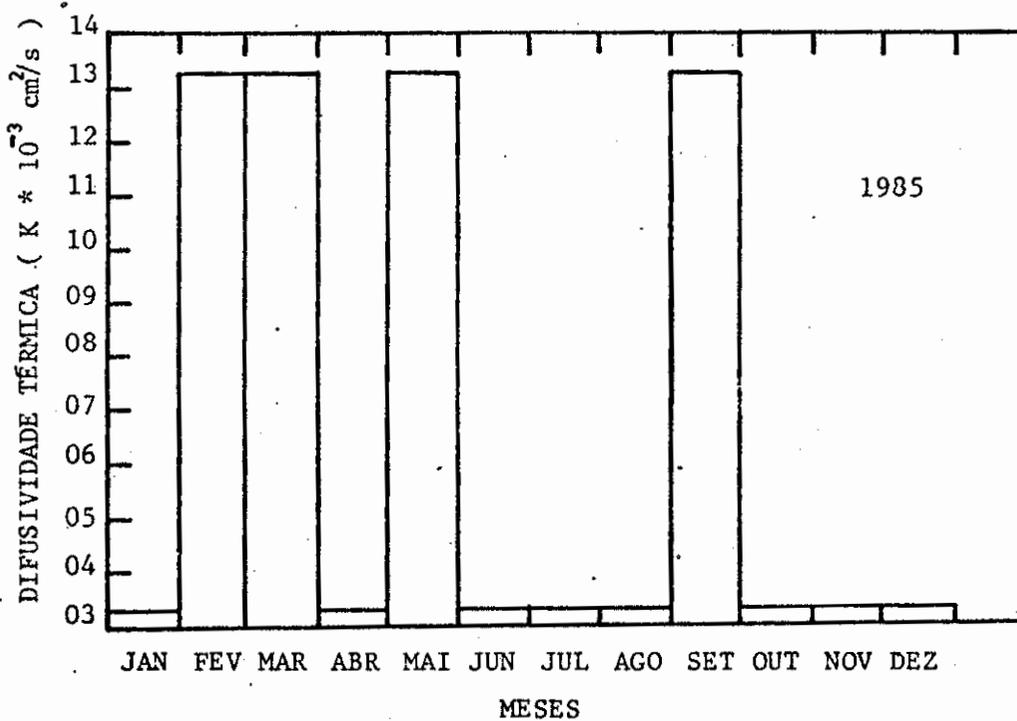
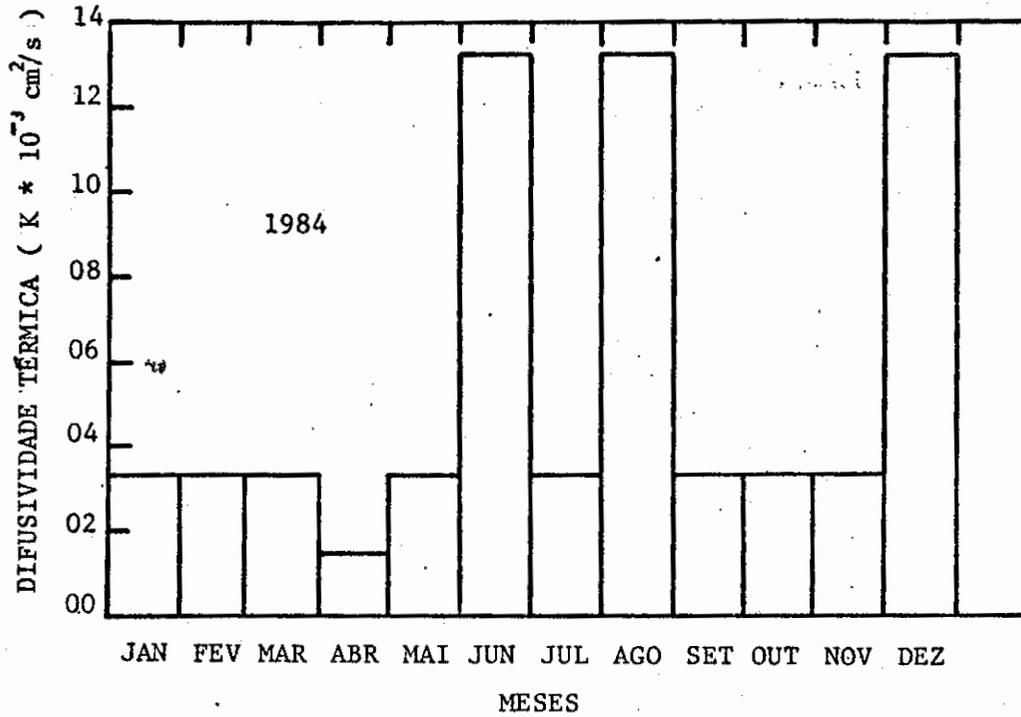


Figura 5.9 (b) - Histogramas para a difusividade térmica na camada entre 05 e 15 cm, anos de 1984 e 1985, obtida pelo Método da Defasagem - Cachoeira Paulista - SP.

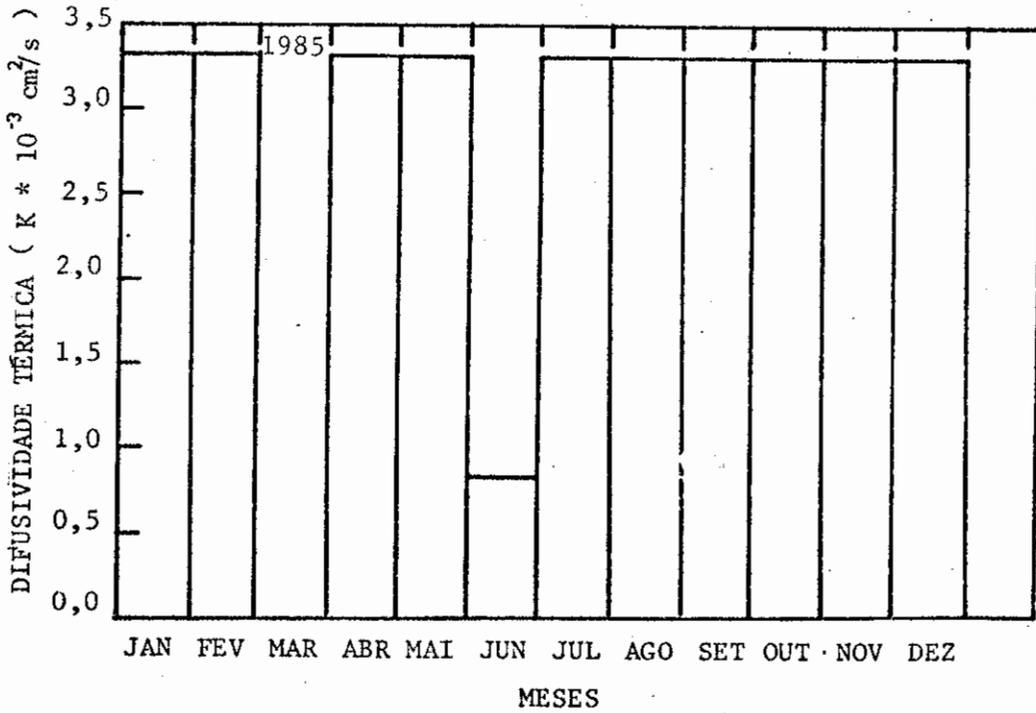
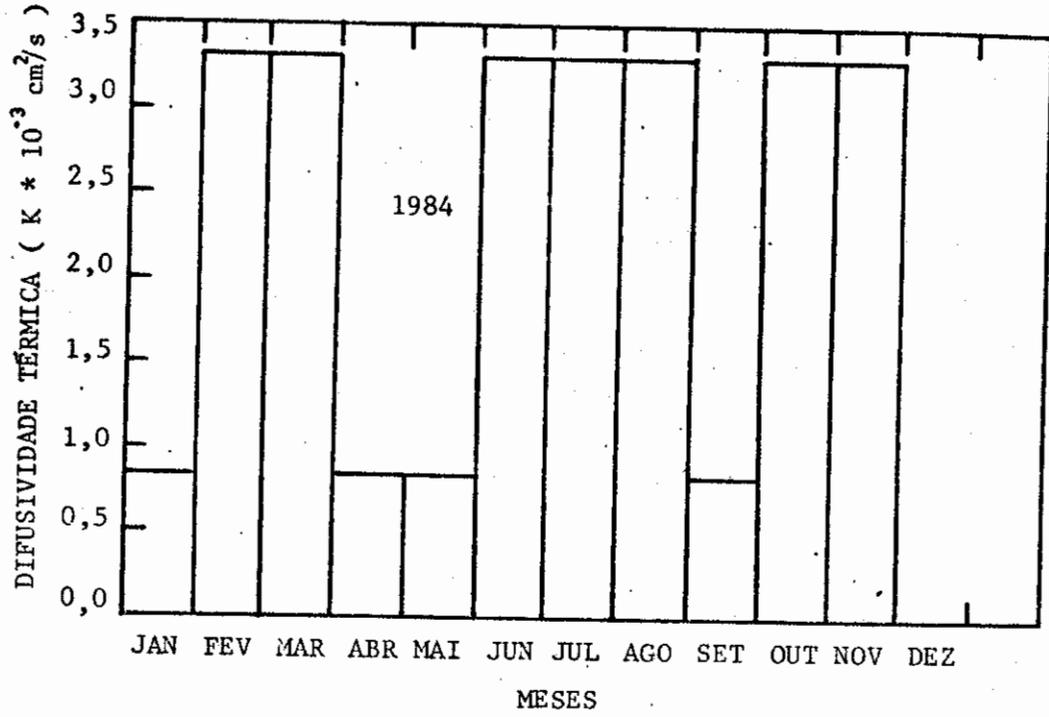


Figura 5.9 (c) - Histogramas para a difusividade térmica na camada entre 10 e 15 cm, anos de 1984 e 1985, obtida pelo Método da Defasagem - Cachoeira Paulista - SP.

Tabela 5.12. - Difusividade Térmica ($K \text{ cm}^2 / \text{s}$) para as camadas 05-10 cm, 05-15 cm e 10-15 cm a partir da Amplitude e Fase do primeiro harmônico da Série de Fourier, ciclo anual de 1984 e 1985 - Cachoeira Paulista - SP.

CAMADA ENTRE AS PROFUND. (cm)	1984		1985	
	AMPLITUDE	FASE	AMPLITUDE	FASE
	$K * 10^3 \text{ cm}^2 / \text{s}$		$K * 10^3 \text{ cm}^2 / \text{s}$	
05-10	0,139	1,795	1,017	2,010
05-15	0,179	85,905*	0,418	1,676
10-15	0,239	1,080	0,227	1,419

* Valor duvidoso.

no ano de 1985.

Verifica-se que em todos os métodos utilizados, os valores da difusividade não aumentam com a profundidade como é previsto teoricamente e isto deve-se ao fato de que as profundidades estudadas estão muito próximas à superfície, onde ocorrem as maiores variações das propriedades térmicas do solo. Os altos valores encontrados para a difusividade, nos dois anos, na camada entre 05 e 10 cm, através do método do "range" pode ser devido a outros processos de transferência de calor, tais como movimento de umidade do solo e, em outras palavras, o modelo matemático cai devido a falta de homogeneidade nesta camada do solo.

5.3.2 - Ciclo Sazonal

Os valores da difusividade térmica obtidos através do método do "range" para os meses intermediários das estações do ano (janeiro, abril, julho e outubro) encontram-se na tabela 5.10. Estes valores não estão compatíveis com aqueles obtidos através da defasagem (tabela 5.13) e como citado anteriormente, este último método não representa confiavelmente a difusividade térmica do solo através do seu ciclo sazonal. Quanto a difusividade, obtida através da amplitude e fase do primeiro harmônico, verifica-se, observando a tabela 5.14 que os valores estão razoavelmente compatíveis com aqueles obtidos através do método do "range", com as maiores diferenças ocorrendo na camada entre 05-10 cm no ano chuvoso e a maior compatibilidade ocorrendo no ano seco na camada entre 10-15 cm.

TABELA 5.13 - Difusividade Térmica ($K \text{ cm}^2/\text{s}$) para as camadas 05-10 cm, 05-15 cm e 10-15 cm a partir da Defasagem, ciclo sazonal de 1984 e 1985 - Cachoeira Paulista - SP.

ESTAÇÃO	CAMADA ENTRE AS PROF. (cm)	1984	1985
		$K * 10^3 \text{ cm}^2 / \text{s}$	
JANEIRO	05-10	13,263	3,316
	10-15	3,316	3,316
	05-15	1,474	3,316
ABRIL	05-10	3,316	3,316
	10-15	2,122	3,316
	05-15	1,474	3,316
JULHO	05-10	3,316	13,263
	10-15	2,122	5,895
	05-15	1,474	3,316
OUTUBRO	05-10	3,316	3,316
	10-15	2,122	3,316
	05-15	1,474	3,316

Tabela 5.14 - Difusividade Térmica ($K \text{ cm}^2/\text{s}$) para as camadas 05-10 cm, 05-15 cm e 10-15 cm a partir da Amplitude e Fase do primeiro harmônico da Série de Fourier, ciclo sazonal de 1984 e 1985 - Cachoeira Paulista - SP.

ESTAÇÃO	CAMADA ENTRE PROFUND. (cm)	1984		1985	
		$K * 10^3 \text{ cm}^2/\text{s}$		$K * 10^3 \text{ cm}^2/\text{s}$	
		AMPLITUDE	FASE	AMPLITUDE	FASE
JANEIRO	05-10	13,442	16,005	8,484	22,422
	10-15	1,674	1,473	1,505	2,392
	05-15	3,658	3,468	2,980	5,437
ABRIL	05-10	13,792	16,087	12,586	16,152
	10-15	1,657	0,115	0,732	1,424
	05-15	3,655	0,392	1,901	3,387
JULHO	05-10	17,134	29,557	20,775	23,735
	10-15	0,754	0,997	0,990	1,777
	05-15	2,061	2,846	2,668	4,382
OUTUBRO	05-10	29,453	19,230	15,305	14,647
	10-15	1,230	0,933	1,944	1,988
	05-15	3,391	2,505	4,227	4,246

5.3.3 - Ciclo Diário

A difusividade térmica nos primeiros 15 cm do solo para os quatro dias selecionados também foi avaliada pelos métodos do "range" e da defasagem e pela amplitude e fase do primeiro harmônico da série de Fourier.

Os valores encontrados para a difusividade térmica apresentam valores discrepantes entre os dois métodos. Na tabela 5.15 tem-se os valores das difusividades para o ciclo diário, obtidas pelo método do "range" e verifica-se um valor muito alto para a difusividade na camada entre 05 - 10 cm no dia 05/03/85. Os "ranges" de temperatura nas profundidades de 05 e 10 cm foram aproximadamente de mesma magnitude devido a alta precipitação e nebulosidade registradas neste dia, o que levou portanto a um valor discrepante para a difusividade nesta camada. Verifica-se, porém, nos outros dias, que os valores de K são maiores para condições de céu nublado e por sua vez, menores para condições de céu descoberto.

Os valores da difusividade obtidos pela defasagem estão na tabela 5.16 e novamente verifica-se um valor discrepante para a difusividade na camada entre 05 e 10 cm no dia 05/03/85, bem como na camada entre 05 e 15 cm no dia 08/04/85. Neste último dia também registrou-se considerável precipitação e nebulosidade, que por sua vez, afetaram os valores da difusividade. Uma desvantagem, quando da aplicação deste método, é que quando não há defasagem em tempo das temperaturas máximas ou mínimas, torna-se impossível a aplicação da expressão para o cálculo da difusividade pela defasagem.

Tabela 5.15 - Difusividade Térmica ($K \text{ cm}^2/\text{s}$) para as camadas 05-10 cm, 05-15 cm e 10-15 cm a partir do Método do "Range" para o ciclo diário - Cachoeira Paulista - SP.

DATA	"RANGES"			CAMADAS (cm)		
	R05	R10	R15	05-10	05-15	10-15
				$K * 10^3 \text{ cm}^2 / \text{s}$		
05/03/85	5,8	5,1	3,0	54,951*	8,366	3,228
08/04/85	7,2	5,9	2,6	22,925	3,505	1,354
25/07/85	8,4	6,8	2,9	20,358	3,215	1,252
07/11/85	10,0	8,0	4,1	18,256	4,574	2,034

* Valor duvidoso.

NOTA : O sufixo de R indica o "range" de temperatura em graus centígrados à profundidade em centímetros.

Tabela 5.16 - Difusividade Térmica ($K \text{ cm}^2/\text{s}$) para as camadas 05-10 cm, 05-15 cm e 01-15 cm a partir da Defasagem para o ciclo diário - Cachoeira Paulista - SP.

DATA	Z1 (cm)	Z2 (cm)	L (min)	$K * 10^3 \text{ cm}^2/\text{s}$
05/03/85	05	10	30	53,051*
08/04/85	05	10	60	13,263
25/07/85	05	10	60	13,263
07/11/85	05	10	60	13,263
05/03/85	05	15	150	8,488
08/04/85	05	15	60	53,051*
25/07/85	05	15	120	13,263
07/11/85	05	15	180	5,895
05/03/85	10	15	180	1,474
08/04/85	10	15	-	-
25/07/85	10	15	60	13,263
07/11/85	10	15	120	3,316

* Valores duvidosos.

Com relação à difusividade térmica, obtida pela amplitude e fase do primeiro harmônico, observa-se na tabela 5.17 que os valores discrepantes oriundos do cálculo através da fase, embora nos dias de céu descoberto, os mesmos estejam compatíveis com aqueles obtidos pelo método do "range". Há uma boa concordância entre os valores, obtidos para condições de céu limpo, através do "range" e da amplitude do primeiro harmônico.

As figuras 5.10(a) à 5.10(d) esboçam os valores das difusividades obtidos pelos métodos do "range" e da defasagem e através da amplitude e fase do primeiro harmônico da série de Fourier, respectivamente, e permitem melhor visualização das discrepâncias encontradas nos valores de k , nos dias de céu coberto, a saber : na camada entre 05 - 10 cm, em 05/03/85, pelo método do "range"; nas camadas entre 05 - 10 cm, em 05/03/85 e entre 05 - 15 cm, em 08/04/85 pela defasagem e finalmente, nas camadas entre 05 - 10 cm, em 05/03/85 e entre 05 - 15 cm, em 08/04/85 pela fase do primeiro harmônico. Quanto aos dias de céu descoberto, os valores são compatíveis em ambos os métodos, embora os valores encontrados em 25/07/85, para as três camadas, através da defasagem, sejam coincidentes, o que se deve ao fator de coincidência nas defasagens de tempo das temperaturas máximas, originando tal semelhança.

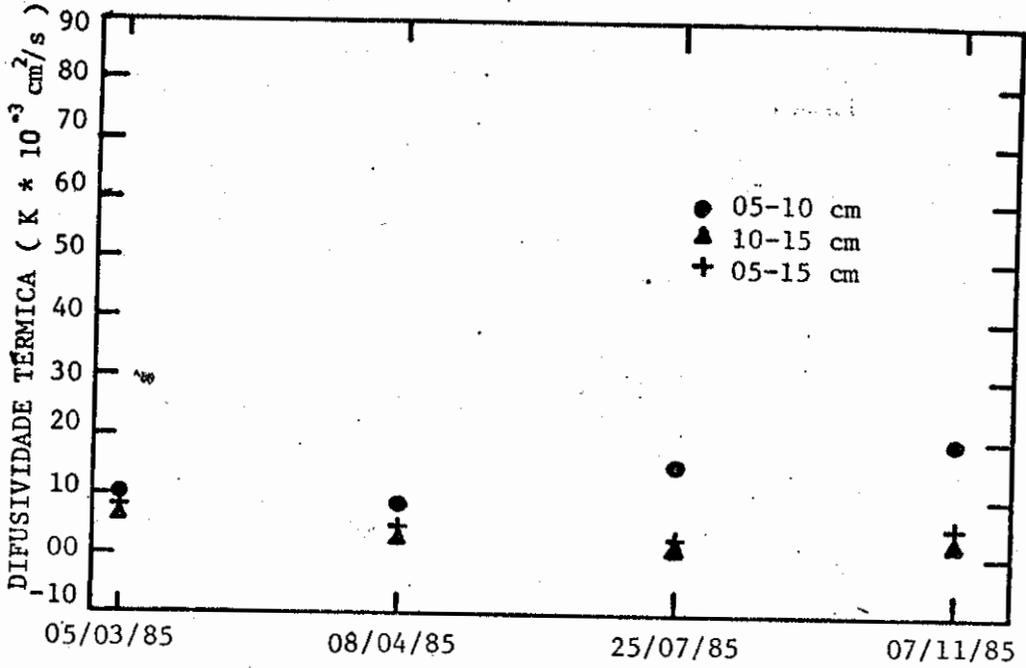
5.4 - Condutibilidade Térmica

A quantidade de calor que flui por unidade de tempo, através da unidade de área de uma camada do solo de espessura unitária,

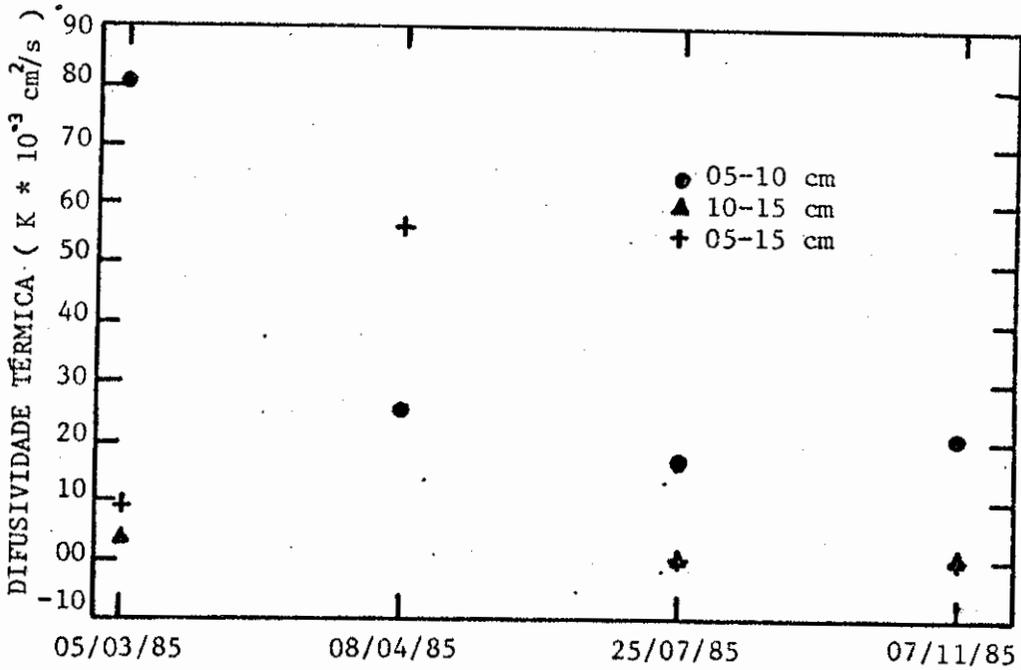
Tabela 5.17 - Difusividade Térmica ($K \text{ cm}^2 / \text{s}$) para as camadas 05-10 cm, 05-15 cm e 10-15 cm a partir da Amplitude e Fase do primeiro harmônico da Série de Fourier para o ciclo diário Cachoeira Paulista - SP.

DATA	CAMADA ENTRE AS PROFUNDIDADES (cm)	$K * 10^3 \text{ cm}^2 / \text{s}$	
		AMPLITUDE	FASE
05/03/85	05-10	10,552	80,460*
	10-15	6,519	3,283
	05-15	8,175	9,090
08/04/85	05-10	8,723	25,201
	10-15	2,979	216,887*
	05-15	4,747	56,066*
25/07/85	05-10	15,457	16,467
	10-15	1,297	1,942
	05-15	3,119	4,304
07/11/85	05-10	19,709	20,618
	10-15	2,363	5,401
	05-15	5,214	9,452

* Valores duvidosos.

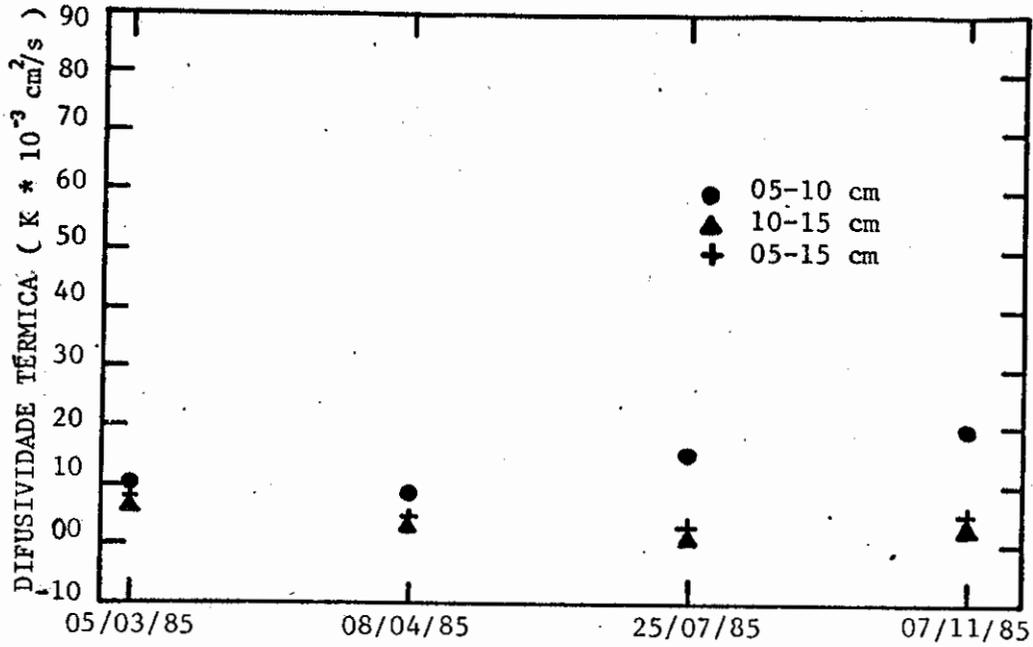


(a) " Range "

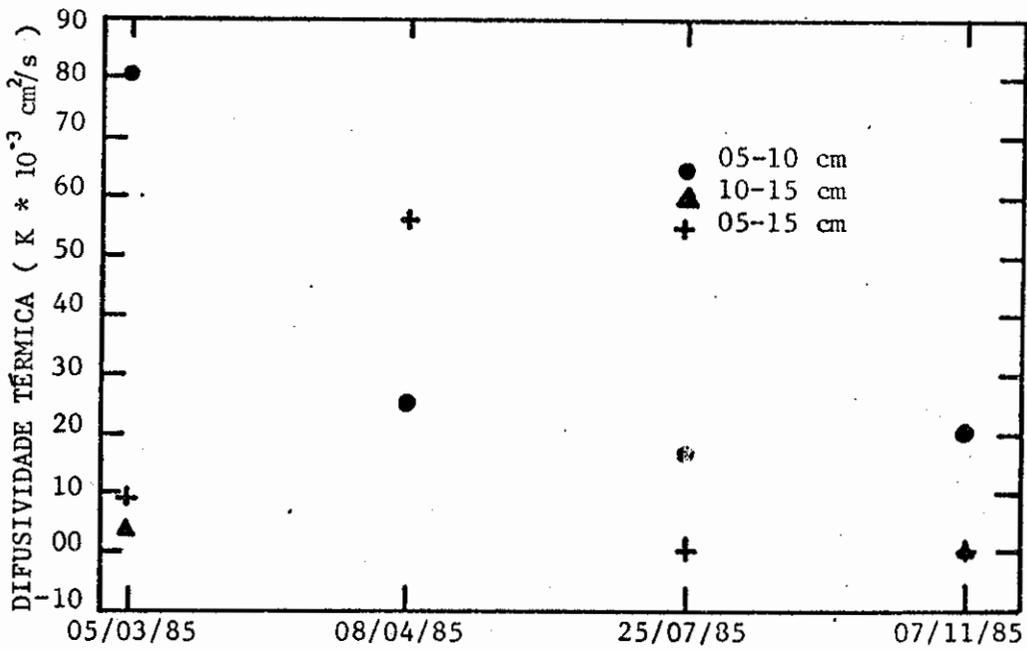


(b) Defasagem

Figura 5.10 - Valores da difusividade térmica para o ciclo diário em 05/03/85, 08/04/85, 25/07/85 e 07/11/85, através do " Range " e da Defasagem - Cachoeira Paulista - SP.



(c). Amplitude



(d) Fase

Figura 5.10 - Valores da difusividade térmica para o ciclo diário em 05/03/85, 08/04/85, 25/07/85 e 07/11/85, através da Amplitude e Fase do primeiro harmônico da Série de Fourier - Cachoeira Paulista - SP.

quando uma diferença unitária de temperatura é mantida entre as duas faces opostas da camada, definida como condutibilidade térmica do solo, pode ser obtida através da razão entre a difusividade térmica e o calor específico do solo.

De posse do calor específico médio do solo analisado, igual a 0,20 cal/g°C; da densidade, igual a 2,40 g/cm³ e das difusividades térmicas (média anual), na camada entre 05-15 cm para os dois anos estudados, estimou-se a condutibilidade térmica para a camada encontrando $1,384 * 10^3$ cal/cm °C s e $1,523 * 10^3$ cal / cm °C s , respectivamente (ou 0,579 watt / m °C e 0,637 watt / m °C , respectivamente).

Apesar de todas as possíveis incorreções incorporadas às estimativas da difusividade e da condutibilidade térmica, a média geral para seus valores correspondem àqueles esperados para tal tipo de solo.



CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

Dados contínuos de temperatura do solo, obtidos em Cachoeira Paulista, SP., às profundidades de 05, 10 e 15 cm, nos anos de 1984 e 1985, permitiram estudar a onda anual, sazonal e diária de temperatura, calcular os coeficientes da Série de Fourier, bem como estimar os valores das propriedades térmicas para um solo argiloso. Os estudos realizados permitiram concluir que:

- Os totais anuais de precipitação para os dois anos, considerados como ano seco e ano chuvoso foram 877,2mm e 1523,6 mm, respectivamente;

- As ondas anual, sazonal e diária de temperatura mostram uma diminuição da amplitude e um aumento da fase com a profundidade em todas as situações consideradas, embora as variáveis precipitação e nebulosidade tenham apresentado sensível influência sobre as ondas de temperatura;

- Os valores máximos da temperatura média diária do solo às profundidades de 05, 10 e 15 cm foram encontrados no mês de fevereiro nos dois anos estudados. No nível de 05 cm a diferença entre as temperaturas máximas de 1984 para 1985 atingiu 4,6°C e para os outros níveis estas diferenças diminuem e são 2,0°C e 2,5°C, respectivamente;

- Os valores mínimos, em todas as profundidades, ocorreram durante o mês de julho para os dois anos, exceto em 1984, no nível de 10 cm, onde o valor mínimo foi atingido em agosto. A maior diferença foi verificada no nível de 05 cm e atingiu 2,9°C;

- A análise de Fourier mostrou valores maiores das amplitudes para o primeiro harmônico, mostrando ainda a defasagem com a profundidade. A variância para o primeiro harmônico atinge valores acima de 90% quando se considera o ciclo sazonal e diminui quando analisamos o ciclo diário em dias com precipitação e cobertura de nuvens. A variância acumulada para os três primeiros harmônicos atinge valores superiores à 90% em todos os ciclos, representando assim a onda de temperatura observada satisfatoriamente;

- A representação da temperatura média anual, a partir da análise de Fourier, para o ano de 1984 às profundidades estudadas são:

$$T_{05} = 26,1^{\circ} + 6,09 \cos (x-14^{\circ}) + 0,97 \cos 2(x-62^{\circ}) + 1,28 \cos 3(x-30^{\circ})$$

$$T_{10} = 21,2^{\circ} + 5,32 \cos (x-12^{\circ}) + 0,75 \cos 2(x-81^{\circ}) + 1,11 \cos 3(x-32^{\circ})$$

$$T_{15} = 20,9^{\circ} + 4,81 \cos (x-15^{\circ}) + 0,84 \cos 2(x-82^{\circ}) + 1,17 \cos 3(x-31^{\circ})$$

Para o ano de 1985 as temperaturas a partir da análise de Fourier são:

$$T_{05} = 25,0^{\circ} + 5,43 \cos (x-05^{\circ}) + 1,70 \cos 2(x-78^{\circ}) + 0,44 \cos 3(x-76^{\circ})$$

$$T_{10} = 20,4^{\circ} + 5,16 \cos (x-03^{\circ}) + 1,80 \cos 2(x-78^{\circ}) + 0,32 \cos 3(x-83^{\circ})$$

$$T_{15} = 20,8^{\circ} + 4,65 \cos (x-00^{\circ}) + 1,43 \cos 2(x-87^{\circ}) + 0,26 \cos 3(x-94^{\circ})$$

- O calor específico médio do solo estudado é de 0,20 cal/g^oC ou 836,76 W s / kg ^oC

- Os valores da difusividade térmica do solo para o ciclo anual, obtidos pelos vários métodos, apresentam pequenas discrepâncias entre si, correlacionando-se mais estreitamente na camada mais profunda, entre 10-15 cm, através do método do "range" e da fase do primeiro harmônico da Série de Fourier. Os valores médios para a difusividade, obtidos pelo método do "range" para as camadas entre 05-10, 05-15 e 10-15, são $15,522 * 10^3 \text{ cm}^2/\text{s}$; $2,884 * 10^3 \text{ cm}^2/\text{s}$ e $1,255 * 10^3 \text{ cm}^2/\text{s}$, respectivamente para o ano de 1984 e $20,325 * 10^3 \text{ cm}^2/\text{s}$; $3,172 * 10^3 \text{ cm}^2/\text{s}$ e $1,288 * 10^3 \text{ cm}^2/\text{s}$, respectivamente para o ano de 1985;

- Quanto ao ciclo sazonal, os valores de K, obtidos pelos vários métodos, tanto para o ano seco quanto para o ano chuvoso estão compatíveis, difrindo somente daqueles obtidos pelo método da defasagem. Neste método, como as temperaturas médias mensais foram obtidas para cada duas horas, há coincidência nos tempos de máximas e consequentemente nos valores de K em vários meses;

- Valores duvidosos de K foram encontrados no ciclo diário em 05/03/85 e 08/04/85, dias de alta precipitação e nebulosidade, o que conduziu a imprecisões nos valores das temperaturas registrados nas várias profundidades;

- Os resultados do estudo da difusividade térmica, tomadas em sua totalidade, mostram que os valores de K obtidos indiretamente a partir de medidas dos perfis de temperatura do solo dependem do método de estimativa;

- A condutibilidade térmica para a camada entre 05-15 cm, determinada em função da capacidade calorífica e da difusividade térmica, foi de $0,579 \text{ W / m } ^\circ\text{C}$ e $0,637 \text{ W / m } ^\circ\text{C}$ para os anos seco e chuvoso, respectivamente. Estes valores estão compatíveis entre si e com aqueles obtidos por outros autores, face à predominância de quartzo no solo em questão;

- Diante dos resultados obtidos, é necessário registrar continuamente as temperaturas desde a zero hora até as 24 horas, com precisão até a primeira casa decimal, para se obter melhores resultados para a Série de Fourier e conseqüentemente melhores valores de K.

- Verifica-se através das análises que o conteúdo de umidade no solo atua de forma singular nos perfis de temperatura e nas propriedades térmicas e, conseqüentemente nos fenômenos agrometeorológicos relevantes.

- Finalmente, este estudo mostra que as temperaturas do solo podem variar sensivelmente a cada ano e por sua vez induzir a modificações no microclima local.

SUGESTÕES

Face ao exposto e aos resultados encontrados as seguintes sugestões podem ser indicadas:

- A determinação acurada da temperatura da superfície é um problema difícil em meteorologia. A obtenção de registros contínuos da temperatura do solo à superfície possibilitará o cálculo de K e sua inclusão nos modelos de circulação atmosférica;

- Embora muitos cientistas tenham encontrado boa concordância entre os valores das propriedades térmicas, estimadas a partir de registros de temperaturas, entre eles, Persaud e Chang (1985); Ghuman e Lal (1981); Sandanielo (1983) e Schneider (1979), o ideal seria avaliar experimentalmente os métodos discutidos para determinar qual é o mais consistente com medidas diretas de K;

- A extensão destes estudos para outros tipos de solo e a realização de pesquisas semelhantes para diversificadas condições de inclinação do solo permitirá melhor caracterização regional além de aplicações para práticas agrícolas;

- As deficiências encontradas para a determinação das constantes térmicas do solo, leva a recomendar que os laboratórios de solo se capacitem no sentido de poderem medir: o calor específico sem o efeito do calor de umedecimento, a capacidade calorífica, a condutividade térmica e a difusividade térmica.

THE UNIVERSITY OF CHICAGO

PHILOSOPHY DEPARTMENT

1100 EAST 58TH STREET

CHICAGO, ILLINOIS 60637

TEL: 773-936-3300

FAX: 773-936-3300

WWW.PHIL.DEP.UCHICAGO.EDU

ADMISSIONS OFFICE

1100 EAST 58TH STREET

CHICAGO, ILLINOIS 60637

TEL: 773-936-3300

FAX: 773-936-3300

WWW.PHIL.DEP.UCHICAGO.EDU

ADMISSIONS OFFICE

1100 EAST 58TH STREET

CHICAGO, ILLINOIS 60637

TEL: 773-936-3300

FAX: 773-936-3300

WWW.PHIL.DEP.UCHICAGO.EDU

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS. Philadelphia, American Society for Testing and Materials, 1979, 1344 p.
- BAVER, L.D. Soil physics. 3. ed. New York, John Wiley, 1956, 489 p.
- BOCOCK, K.L.; JEFFERS, J.N.R.; LINDLEY, D.K.; ADAMSON, J.K.; GILL, C.A. Estimating woodland soil temperature from air temperature and other climatic variables. Agricultural Meteorology, 18:351-372, 1977.
- BUSINGER, J.A.; BUETTNER, J.K. Thermal contact coefficient (A term proposed for use in heat transfer). Journal of Meteorology, 18,422, 1960.
- CARSLAW, H.S.; JAEGER, J.C. Conduction of heat in solids. Oxford, Clarendon Press, 1959, 510 p.
- CARSON, J.E. Analysis of soil and air temperatures by Fourier Techniques. Journal of Geophysical Research, 68(8):2217-2232, Apr. 1963.
- CARSON, J.E.; MOSES, H. The annual and diurnal heat:exchange cycles in upper layers of soil. Journal of Applied Meteorology, 2:397-406, Jun. 1963.
- CAUTENET, G.; COULIBALY, Y.; BOUTIN, C.H. Calculation of ground temperature and fluxes by surface models: a comparison with experimental data in the African savannah. Tellus, 37B:64-71, Feb. 1985.
- CONRAD, V.; POLLAK, L.W. Methods in Climatology. Cambridge, MA, Harvard University Press, 1962, 460 p.
- CRUSE, R.M.; LINDEN, D.R.; RADKE, J.K.; LARSON, W.E.; LARNTZ, K. A model to predict tillage effects on soil temperature. Soil Science Society of American Journal, 44:378-383, 1980.
- DEARDORF, J.W. Efficient prediction of ground surface temperature and moisture, with inclusion of a layer of vegetation. Journal of Geophysical Research, 83(C4):1889-1903, Apr. 1978.

DELAGÉ, Y. Surface temperature calculation in atmospheric circulation models with coarse resolution of the boundary layer. Monthly Weather Review, 114:442-451, Feb. 1986.

DE VRIES, D.A.; AFGAN, N.H. Heat and mass transfer in the biosphere. Washington, DC, Halsted Press Book, 1975, 594 p.

GHUMAN, B.S.; LAL, R. Temperature regime of a tropical soil in relation to surface condition and air temperature and its Fourier Analysis. Soil Science, 134(2):133-140, Aug. 1982.

GUPTA, S.C.; RADKE, J.K.; LARSON, W.E. Predicting temperatures of bare and residue covered soils with and without a corn crop. Soil Science Society America Journal, 45:405-412, 1981.

GUPTA, S.C.; RADKE, J.K.; LARSON, W.E.; SHAFFER, M.J. Predicting temperatures of bare - and residue - covered soils from daily maximum and minimum air temperatures. Soil Science Society America Journal, 46:372:376, 1982.

GUPTA, S.C.; LARSON, W.E., ALLMARAS, R.R. Predicting soil temperature and soil heat flux under different tillage - Surface residue conditions. Soil Science Society America Journal, 48(2):223-232, 1984.

HANDBOOK OF METEOROLOGICAL INSTRUMENTS; Part I - Instruments for Surface Observations. London, Her Majesty's Stationary Office, 1969, 458 p.

HORTON, R.; WIERENGA, P.J. Determination of the mean soil temperature for evaluation of heat flux in soil, Agricultural Meteorology, 28:309-319, 1983.

Estimating the soil heat flux from observations of soil temperature near the surface. Soil Science Society America Journal, 47:17-20, 1983.

HORTON, R.; WIERENGA, P.J.; NIELSEN, D.R. Evaluation of methods for determining the apparent thermal diffusivity of soil near the surface. Soil Science Society America Journal, 47:25-32, 1983.

KHATRY, A.K.; SODHA, M.S.; MAIK, M.A.S. Periodic variation of ground temperature with depth. Solar Energy, 20:425-427, 1978.

LONQVIVIST, O. On the diurnal variation of surface temperature. Tellus, 14:96-101, 1962.

MEIKLE, R.W.; TREADWAY, T.R. A mathematical method for estimating soil temperatures. Soil Science, 128(4):226-242, Oct., 1979.

_____ A mathematical method for estimating soil temperatures in Canada. Soil Science, 131(5):320-326, May 1981.

MIDDLETON, W.E.K.; SPILHAUS, A.F. Meteorological Instruments. Canada, University of Toronto Press, 1953, 286 p.

MOHANA RAO, N.J.; TOMMASELLI, J.T.G. Comportamento térmico do solo de Presidente Prudente - SP, em relação às temperaturas mínimas - ciclo anual - 1981. Presidente Prudente, Universidade Paulista Júlio de Mesquita Filho, Mar. 1982, 88 p.

NORDEMANN, L.M.M.; LUCHT, L.A.M.; MUNIZ, R.P.A. Photoacoustic spectroscopy and surface temperature measurements of tropical soils. Soil Science, 136(6):538-546, Jun. 1985.

PEARCE, D.C.; GOLD, L.W. Observations of ground temperature and heat flow at Ottawa, Canada. Journal of Geophysical Research, 64(9):1293:1298, Sept. 1959.

PERSAUD, N.; CHANG, A.C. Computing mean apparent soil thermal diffusivity from daily observations of soil temperature at two depths. Soil Science, 139(4):297-304, Apr. 1985.

PARTON, W.J. Predicting soil temperatures in a shortgrass steppe. Soil Science, 138(2):93-101, Aug. 1984.

PARTON, W.J.; LOGAN, J.A. A model for diurnal variation in soil and air temperature. Agricultural Meteorology, 23:205-216, 1981.

RAMANA RAO, T.V.; VIANELLO, R.L. Características térmicas do solo de Cachoeira Paulista - SP. São José dos Campos, INPE, 1977. (INPE-1106-PE/080).

RAMANADHAM, R.; VISWANADHAN, Y. The heat exchange in the upper layers of soil in Waltair. In: INTERNATIONAL QUITE SUN YEAR (IQSY) SYMPOSIUM. New Dalhi, Índia, 1966, p. 677-690.

- SANDANIELO, A. Estudo do ciclo diário do regime térmico do solo de Viçosa - MG, sob três condições de cobertura. Tese de Mestrado, Viçosa, MG, Dez. 1983, 79 p.
- SASAMORI, T. A numerical of atmospheric and soil boundary layers. Journal of the Atmospheric Sciences, 27:1122-1137, Nov. 1970.
- SCHIELDGE, J.P.; KAHLE, A.B.; ALLEY, R.E. A numerical simulation of soil temperature and moisture variations fora bare field. Soil Science, 133(4):197-207, Apr. 1982.
- SCHNEIDER, F.M. Comportamento e propriedades térmicas do solo Santa Maria. Tese de Mestrado. Piracicaba, SP, Dez. 1979, 67 p.
- SELLERS, W.D. Physical Climatology. Chicago, University of Chicago Press, 1965, 272 p.
- TAYLOR, S.E. Measured emissivity of soils in the southeast United States. Remote Sensing Environment, 8:359-364, 1979.
- TOY, T.T.; KUHAIDA, A.J.; MUNSON, B.E. The prediction of mean monthly soil temperature from mean monthly air temperature. Soil Science, 126(3):181-189, 1978.
- VAN WIJK, W.R. Physics of plant environment. Amsterdam, North Holand Publishing, 1963, 382 p.
- _____ Soil microclimate, its creation, observation and modification. Meteorological Monographys, 6(28):59-73, Jul. 1965.
- VIANELLO, R.L.; ANDRÉ, R.G.B.; MARQUES, V.S. Comportamento térmico do solo de Jaboticabal, SP, sob três diferentes coberturas, SJC, SP. Revista CERES, 29(161):73-88, 1982.
- VISWANADHAN, Y.; MOHANA RAO, N.J. The thermal diffusivity of soil at tropical stations in southern hemisphere. Pure and Applied Geophysics, (Pageoph), 101(9):247-265, 1972.
- VISWANADHAN, Y.; RAMANADHAM, R. Temperature changes in the upper layers on soil at a tropical station, I.E. (I), Journal IDGE, (50):147-150, May 1970.
- WEBER, R.L.; WHITE, M.W.; MANNING, K.V. Practical Physics. New York, McGraw-Hill, 1955, 484 p.

