

Recebido em 30 de Dezembro de 1992

# Aplicação do modelo sinusoidal à variação da temperatura do solo em condições de solo nu e sob coberto

por

JOSÉ A. ANDRADE

Assistente de Solos e Fertilidade do Departamento de Geociências  
Universidade de Évora

FRANCISCO G. ABREU

Professor Auxiliar do Departamento de Ciências do Ambiente  
Instituto Superior de Agronomia.

e

MANUEL V. MADEIRA

Professor Associado do Departamento de Ciências do Ambiente  
Instituto Superior de Agronomia

## RESUMO

Estuda-se o comportamento térmico dum solo de textura argilosa e dum solo de textura arenosa sob coberto de *Pinus Pinaster* Ait. com e sem camadas orgânicas superficiais, para avaliação da aplicabilidade do modelo sinusoidal de variação de temperatura.

A manta-morta desempenha um papel de isolante térmico, levando à redução das amplitudes e gradientes térmicos no solo e aumento da "profundidade de amortecimento" da onda térmica. Aparentemente, a precipitação e nebulosidade associada tendem a diluir o efeito da manta-morta.

O modelo sinusoidal, embora estatisticamente aplicável ao tipo de variação real da temperatura do solo, não exprime convenientemente tal variação durante todo o ciclo diário porque os períodos de aquecimento e arrefecimento reais têm diferentes durações. A sua aplicabilidade diminui no perfil com manta-morta devido ao atraso na ocorrência das temperaturas mínimas, diminuindo ainda mais a duração do período de aquecimento.

### RÉSUMÉ

On étudie les caractéristiques thermiques d'un sol argileux et d'un sol sableux sous un peuplement de *Pinus pinaster* Ait., avec et sans litière, pour évaluer l'application du modèle sinusoidal de variation de la température.

La litière agit comme isolateur thermique et conduit à une réduction des amplitudes et des gradients thermiques dans le sol et à un accroissement du "damping depth". Apparemment, l'effet de la litière est réduit par la précipitation et la nébulosité.

Malgré la bonne corrélation trouvée entre le modèle sinusoidal de variation de la température et la variation réelle, le modèle ne simule pas bien les différentes durations des périodes d'échauffement e de refroidissement du sol. Dans le profil avec horizon O la corrélation est encore plus préjudiciée par la durée plus petite de la période d'échauffement.

### SYNOPSIS

The thermal behaviour of a bare clay soil and of a sandy soil under a pine forest with or without O horizon were studied for evaluation of the goodness of fit of the sinusoidal model to the daily temperature regimes.

It was found that the litter layer acts as a thermal insulator, reducing soil temperature gradients and amplitudes and increasing the "damping depth". However, the litter layer effect was apparently reduced under rainy and cloudy conditions.

In spite of a good correlation between the sinusoidal model of temperature variation and the actual daily cycling of soil temperature, such model was not satisfactory for all the experimental conditions. It failed to represent well the actual durations of the cooling and warming up daily periods, and this inability was enhanced by the presence of the litter layer, which extended the duration of the cooling period.

## 1. INTRODUÇÃO

A temperatura e o fluxo de energia no solo influenciam processos de natureza física, química e biológica que nele ocorrem, tornando-se desta forma factores determinantes do crescimento, desenvolvimento e produção das comunidades vegetais.

Entre outras é reconhecida a influência da temperatura no movimento da água no solo (tanto na fase líquida como na de vapor), nas reacções químicas fundamentais na pedogénese (MACEDO, 1988), na composição da atmosfera do solo, nos processos de mineralização e humificação, na germinação e emergência das plantas (ABREU & CLARK, 1992), no crescimento e desenvolvimento dos sistemas radiculares (FABIÃO *et al.*, 1992), na actividade da fauna do solo (SERRALHEIRO & MADEIRA, 1989).

O perfil de temperatura do solo está intimamente ligado ao sentido das transferências de energia que ocorrem na interface solo-atmosfera e no interior do solo. As transferências de energia que ocorrem na interface solo-atmosfera dependem da energia aí disponível e da sua repartição pelos vários processos de transferência que constituem as parcelas do balanço energético à superfície do solo. Sendo esta um sistema bidimensional e sem massa (sem volume), uma expressão simplificada para o balanço será:

$$Rn = H + LE + G \quad (\text{W m}^{-2}) \quad (1)$$

onde  $Rn$  é a radiação líquida resultante do balanço de radiação,  $H$  é o fluxo de entalpia entre a superfície e a atmosfera,  $LE$  é o fluxo de calor latente associado à evaporação e transpiração e  $G$  representa o fluxo de energia através da superfície para o solo e vice-versa. Esta parcela não excede, em média, 10 a 15% da radiação líquida (HORTON & WIERENGA, 1983).

As transferências de energia que ocorrem no solo dependem das propriedades térmicas deste, as quais variam fundamentalmente com a textura, o teor em matéria orgânica e o teor de humidade, definindo para cada solo um regime térmico característico.

A propagação de energia através de uma camada homogénea e isotrópica de solo pode ser descrita pela Lei de Fourier, considerando a condução como modo único de transferência de energia. Assim, o fluxo unidireccional de energia  $G$  a uma dada profundi-

dade  $z$  é dado por:

$$G(z) = -\lambda(z) \left( \frac{dT}{dz} \right) \quad (\text{W m}^{-2}) \quad (2)$$

onde  $\frac{dT}{dz}$  representa o gradiente térmico vertical à profundidade  $z$  e  $\lambda(z)$  a condutividade térmica da camada considerada. A condutividade define a capacidade do solo para conduzir energia térmica. Em condições transientes, a aplicação do princípio de conservação de energia na forma da equação da continuidade permite obter a expressão de condução unidimensional de energia:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \chi(z) \left( \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (3)$$

onde  $\chi$  representa a difusividade térmica da camada de solo considerada. A difusividade é definida como

$$\chi(z) = \frac{\lambda(z)}{C(z)} \quad (\text{m}^2 \text{ s}^{-1}) \quad (4)$$

e constitui fisicamente uma medida do impacto do fluxo de energia sobre a temperatura do meio com uma capacidade calorífica  $C(z)$ .

As soluções da equação de condução de energia térmica permitem modelar no espaço e no tempo o comportamento térmico do solo, tendo uma aplicação prática considerável na avaliação das suas propriedades térmicas e na estimativa dos fluxos de energia transferidos através do mesmo. Estas soluções são obtidas por métodos numéricos (HANKS *et al.*, 1971; WIERENGA & WIT, 1970) ou analíticos (CARSON, 1963). Os primeiros transformam a equação diferencial num conjunto de equações algébricas correspondentes a cada camada de solo considerada. Os segundos compreendem dois tipos de variação temporal: periódica (modelo sinusoidal, análise de Fourier, ...) e não periódica (transformação de Laplace, ...).

A aproximação sinusoidal parece ter vantagem pela sua maior simplicidade, além de considerar como condições-fronteira as variações de temperatura ( $T$ ) na interface solo-atmosfera, sendo por isso frequentemente utilizada em vários modelos de comportamento térmico. Como exemplo, citam-se os trabalhos de FLUKER (1958), DE VRIES & PHILIP (1986) e JANSSON (1991).

O objectivo deste trabalho consiste numa abordagem preliminar para avaliação da aplicabilidade do modelo sinusoidal ao comportamento térmico dum solo de textura argilosa e dum solo de textura arenosa sob coberto arbóreo com e sem camadas orgânicas superficiais (manta-morta).

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1. MODELO SINUSOIDAL

A temperatura à superfície do solo oscila de uma forma aproximadamente cíclica e regular, em resposta às variações diárias e estacionais das trocas energéticas nela ocorridas, as quais resultam dos regimes meteorológicos e de factores climáticos globais.

A representação matemática mais simples desta variação é uma função harmónica (sinusoidal) pura, do tipo:

$$T(0, t) = \bar{T} + A(0) \operatorname{sen} \omega t \quad (^\circ\text{C}) \quad (5)$$

onde  $T$  é a temperatura no instante  $t$ ,  $\bar{T}$  é o valor médio de  $T$  durante o ciclo considerado,  $A(0)$  é a amplitude térmica à superfície [temperatura máxima é  $\bar{T} + A(0)$  e a mínima é  $\bar{T} - A(0)$ ] e  $\omega$  é a frequência angular da oscilação (24 horas para o ciclo diário, 365 dias para o ciclo anual). Se a esta condição juntarmos uma outra restrição,

$$\lim_{z \rightarrow \infty} T(z, t) = \bar{T} \quad (6)$$

para a espessura normalmente ocupada pelo *solum*, a solução final da equação (3) virá (CARSLAW & JAEGER, 1959):

$$T(z, t) = \bar{T} + A(z) \operatorname{sen} \left( \omega t - \frac{z}{D} \right) \quad (7)$$

onde  $A(z)$  é a amplitude térmica à profundidade  $z$  e  $D$  é a profundidade de amortecimento da onda térmica ("Damping depth") (VAN WULK & DE VRIES, 1963), definidas, respectivamente, da seguinte forma:

$$A(z) = A(0) \exp \left( -\frac{z}{D} \right) \quad (8)$$

e

$$D = \left( \frac{2\chi}{\omega} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{m}) \quad (9)$$

A grandeza  $D$  especifica o comportamento térmico de cada tipo de solo, caracterizando a profundidade de penetração das "ondas térmicas". À profundidade  $z = D$  a amplitude da onda é de  $e^{-1}$ , ou seja, 0,37 vezes a amplitude à superfície.  $D$  varia com a textura do solo e, uma vez que depende da difusividade térmica, varia também com o teor de humidade. Em solos orgânicos o seu valor é sensivelmente menor que em solos minerais.

## 2.2. EXPERIMENTAÇÃO

Os ensaios foram realizados na Tapada da Ajuda (Lisboa), durante o ano de 1989, num solo Barro Castanho-Avermelhado, sem qualquer tipo de cobertura vegetal, e na Quinta do Furadouro (Óbidos), no ano 1991, num Solo Podzolizado Não Hidromórfico sob povoamento de *Pinus pinaster* Ait.. Este povoamento foi instalado há 24 anos, numa parcela de 50×50 m e plantado num compasso 2×2 m. À época das medições a sua densidade correspondia a 1520 árvores/ha e a altura média das árvores era de 17 metros.

As temperaturas médias mensais durante o período experimental na Tapada foram, para Junho, Julho, Agosto e Setembro, de 1989, respectivamente de 20,9, 23,8, 22,8 e 20,5°C. A precipitação foi de 7,5 mm em 30 de Agosto (total de 9,4 mm em Agosto) e de 11 mm e 8,6 mm a 2 e 17 de Setembro, respectivamente. Não choveu em Junho e em Julho.

Na Quinta do Furadouro foram registados 3 mm de precipitação em 28 e 29 de Julho de 1991, e apenas 1 mm no início de Junho e cerca de 3 mm nos fins de Agosto. As temperaturas máximas oscilaram, para o mesmo período, entre 20 e 33°C, e as mínimas entre 11 e 16°C.

As principais características do solo da Tapada da Ajuda consistem num teor bastante elevado de argila (60% no horizonte superficial, atingindo cerca de 80% em horizontes subjacentes), a qual é constituída, quase exclusivamente, por minerais de argila do grupo da montmorilonite; num teor de matéria orgânica da ordem de 3% na espessura até 45 cm de profundidade (MEDINA, 1973).

O Solo Podzolizado caracteriza-se por ter uma textura arenosa com cerca de 96% de areia na análise mecânica do horizonte *Ah* (0-30/40 cm) e do horizonte *Bsh* (30/40 a 60/70 cm) e uma densidade aparente de 1,36. O teor em matéria orgânica é de 2,05% na espessura até 15 cm e 1,60% entre 15 e 30 cm; no horizonte *B* aquele teor eleva-se a 2,81%. A quantidade da manta-morta é de  $4268,3 \pm 1155 \text{ gr m}^{-2}$ ; o peso correspondente à camada menos decomposta (Horizontes *Oi* e *Oe*) é de  $1067,0 \pm 237,4 \text{ gr m}^{-2}$  e para a camada subjacente (Horizonte *Oa*), de  $3201,3 \pm 1007,8 \text{ gr m}^{-2}$  (BERG *et al.*, 1992). A espessura total daqueles horizontes varia entre 2 e 5 cm em todo o povoamento, sendo de 2 cm no local das medições.

O perfil térmico no solo sem vegetação ( $\alpha$ ) na Tapada da Ajuda foi medido com sensores do tipo termistores instalados a seis profundidades (2, 5, 10, 25, 40 e 60 cm) e ligados a um aparelho com registo automático.

Na Quinta do Furadouro os perfis de temperatura foram medidos em dois locais ( $\beta$  e  $\gamma$ ), tendo num deles ( $\beta$ ) sido retirada a manta-morta numa área de  $2 \times 2 \text{ m}$ . Em cada local instalaram-se termopares às profundidades de 2, 4, 6, 10 e 20 cm a partir do topo do primeiro horizonte mineral. No local em que a manta-morta não foi removida (perfil  $\gamma$ ) também foi colocado um termopar na transição entre a manta-morta e o horizonte mineral para além dos mencionados. Na referida transição, foram colocados nas imediações mais 5 termopares, para análise da variabilidade espacial das medições de temperatura.

Em qualquer dos casos, a humidade do solo foi determinada pelo método gravimétrico.

### 3. RESULTADOS

Os resultados das medições dos perfis térmicos em cada local são apresentados para um período representativo de dez dias consecutivos, considerado com base na uniformidade das condições meteorológicas e do teor de humidade no solo. Este período decorre de 4 a 13 de Setembro de 1989 na Tapada e de 25 de Julho a 3 de Agosto de 1991 na Quinta do Furadouro. Na Tapada, alguns dos resultados estendem-se até 18 de Setembro de forma a poder ser avaliado o efeito da precipitação, em quantidade apreciável, sobre a profundidade de amortecimento.

Para os perfis  $\beta$  e  $\gamma$  não foi possível incluir as medições feitas a 20 cm devido a deficiências nos termopares correspondentes.

Durante o período em causa, o teor de água no solo de textura argilosa da Tapada era relativamente elevado, cerca de  $0,45 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ . No solo de textura arenosa, no Furadouro, medições efectuadas a meados de Julho forneceram o valor de  $0,03 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ , indicando que o solo se encontrava próximo do coeficiente de emurchecimento ( $0,024 \pm 0,0052 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ).

#### A) VARIABILIDADE ESPACIAL DAS MEDIÇÕES

No Quadro 1 são apresentados os valores médios e respectivos desvios-padrão das temperaturas registadas sob o horizonte O em seis locais diferentes, sendo o primeiro o que faz parte do perfil  $\gamma$ .

QUADRO 1 - *Temperatura (média de 10 dias) medida entre a manta-morta e o solo mineral, em seis locais distintos.*

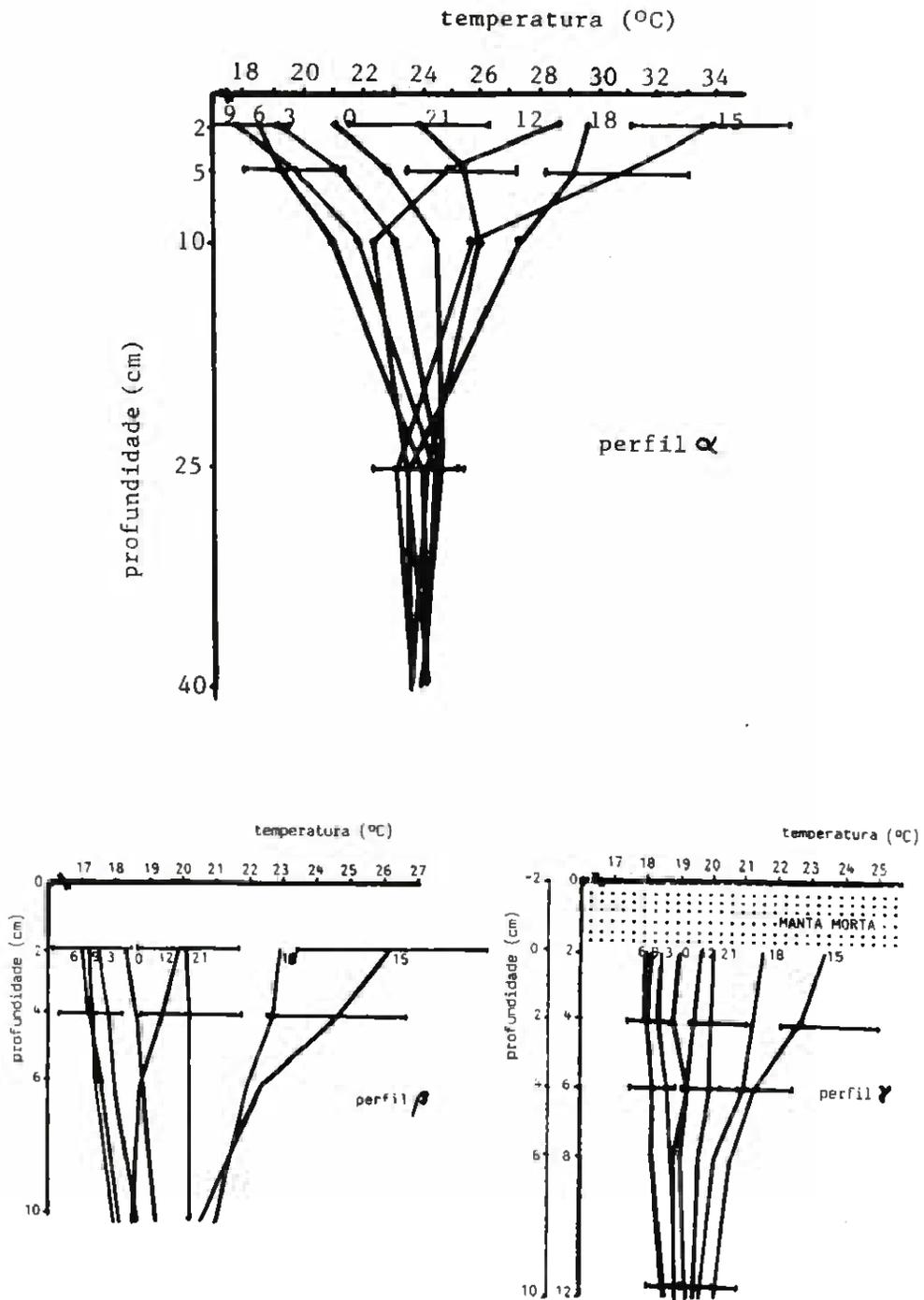
	TEMPERATURAS					
	1	2	3	4	5	6
Média	19,5	18,9	19,2	19,6	19,5	20,2
Desvio Padrão	0,47	0,39	0,60	0,55	0,55	0,65

Os valores obtidos denotam pequenas diferenças na distribuição espacial da temperatura a este nível. A média dos registos referentes ao primeiro termopar é muito próxima da média geral, pelo que o perfil no qual se integra pode ser considerado representativo do local.

#### B) PERFIS TÉRMICOS

A Fig. 1 mostra-nos as tautócronas médias para várias horas do dia elaboradas a partir dos valores da temperatura para o conjunto de 10 dias de cada período. Verifica-se que em qualquer dos perfis os gradientes térmicos são mais pronunciados nas tautócronas referentes ao período diurno, quando comparadas com as do período nocturno.

FIGURA 1 - Perfis térmicos para várias horas do dia, elaborados a partir de valores médios de 10 dias. Os desvios-padrão das medições são indicados para alguns casos.



A diversidade dos perfis estudados implica naturais diferenças nos perfis térmicos. No perfil do solo de textura argilosa, sem cobertura vegetal, observam-se as maiores variações térmicas superficiais e os mais pronunciados gradientes ao longo do dia. Nos perfis arenosos, sob coberto florestal, as variações são bastante menores e os gradientes térmicos muito mais atenuados, em particular no perfil  $\gamma$ . As temperaturas registadas no período nocturno, no perfil com manta-morta, são maiores que no perfil  $\beta$ , passando-se o contrário no período diurno. A amplitude térmica diária e média sob a manta-morta no perfil  $\gamma$  é cerca de metade da verificada a 2 cm de profundidade no perfil  $\beta$ .

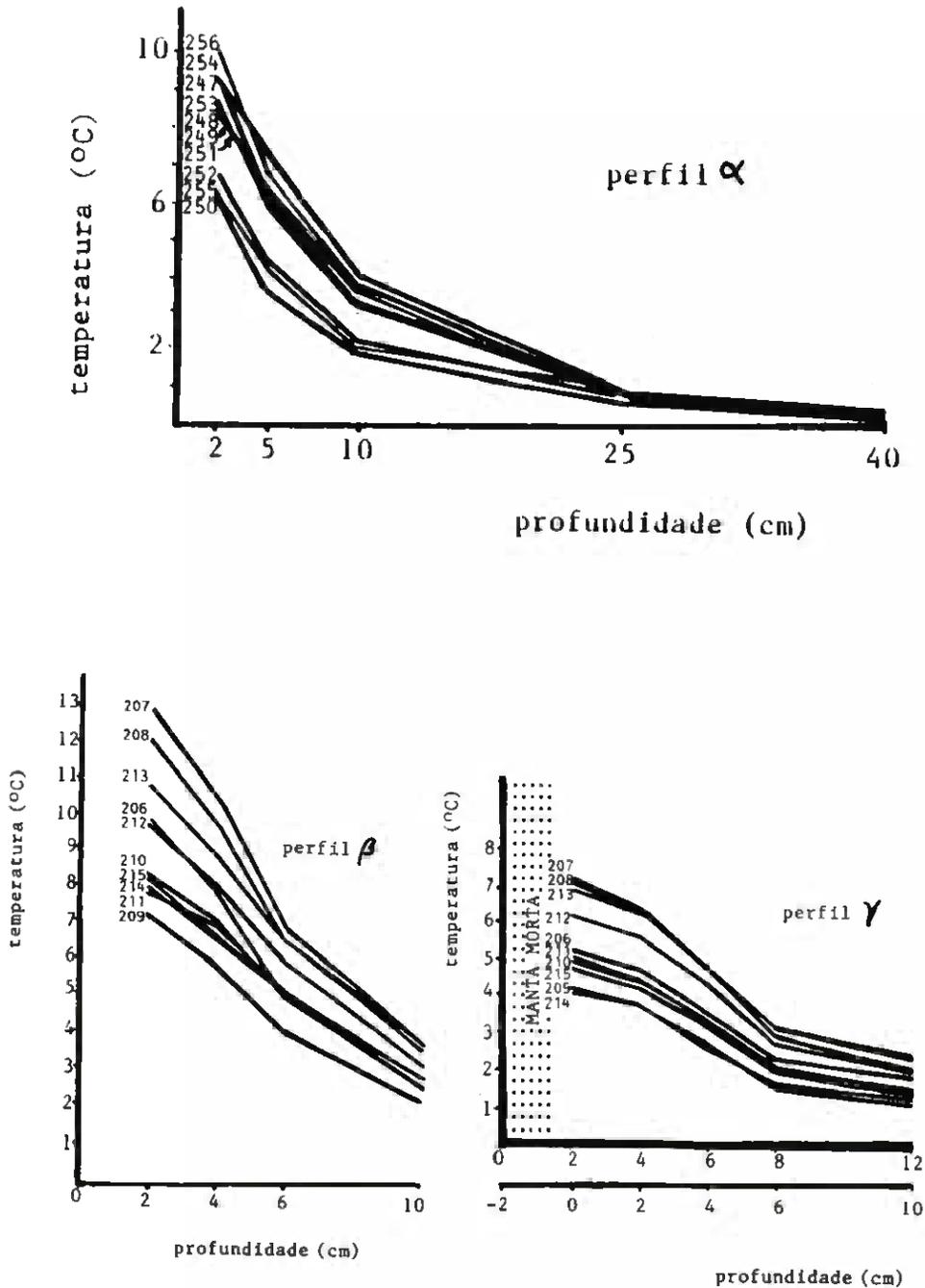
A Fig. 2 apresenta a variação das amplitudes térmicas com a profundidade, para as várias situações estudadas. As amplitudes no solo argiloso, sem qualquer cobertura, são grandes. Os dois valores mais baixos referem-se aos dois dias com percentagens de insolação bastante baixas (dia 7: 22,6%; dia 12: 10,3%). Em solo sob coberto vegetal, a existência do horizonte O (perfil  $\gamma$ ) reduz consideravelmente as amplitudes a qualquer profundidade e atenua de uma forma marcada o seu decréscimo com a profundidade. A 10 cm de profundidade em solo mineral as amplitudes térmicas são pequenas (de 1 a 2,5°C em solo com hor. O e de 2 a 3,5°C em solo sem manta-morta).

Para testar o decréscimo exponencial das amplitudes térmicas com a profundidade estabeleceu-se, para cada dia e cada perfil, a seguinte regressão linear:

$$\ln A(z) = \left(-\frac{1}{D}\right)z + \ln A(0) \quad (10)$$

Os resultados sobre a validade estatística destas regressões constam do Quadro 2, sendo os coeficientes de correlação significativos a um nível de 1%, o que permite considerar que o decréscimo exponencial das amplitudes térmicas é uma hipótese razoável. No entanto, os coeficientes de correlação são sistematicamente mais elevados no perfil  $\beta$  que no perfil com manta-morta.

FIGURA 2 - *Varição das amplitudes térmicas com a profundidade, para o período de dias (julianos) indicado.*



QUADRO 2 - Valores do coeficiente de correlação  $r$  da regressão linear entre  $A(z)$  e  $z$  (eq. 8).

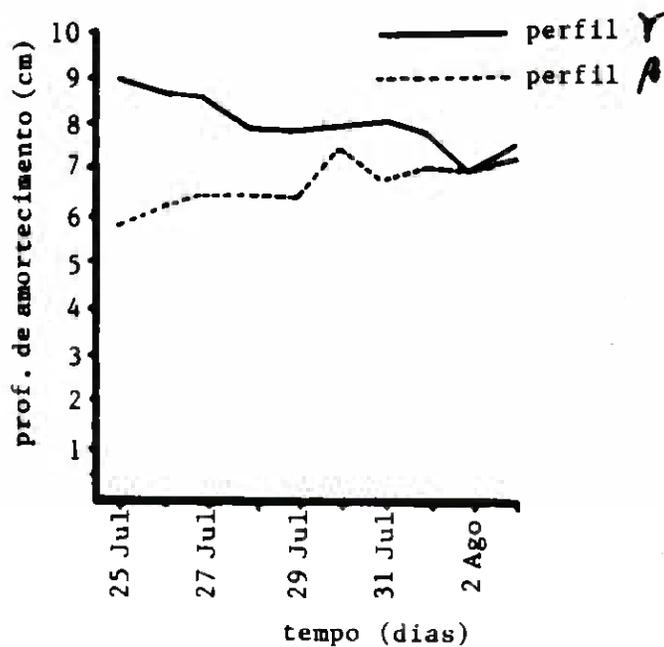
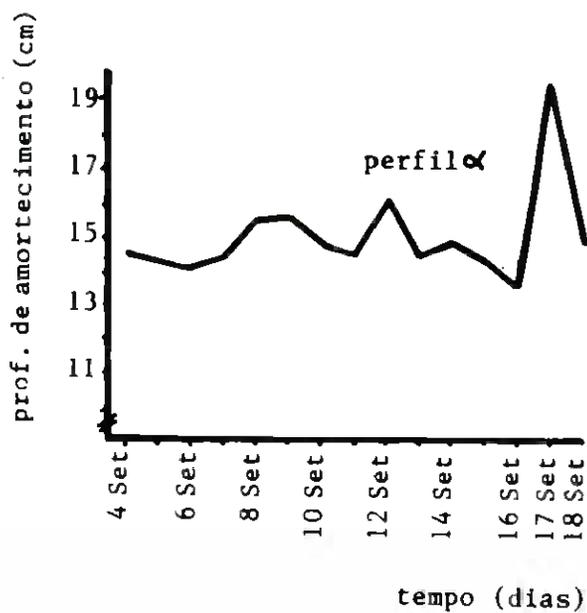
SOLO ARGILOSO		SOLO ARENOSO		
DIAS	(perfil $\alpha$ )	DIAS	(perfil $\beta$ )	(perfil $\gamma$ )
4 SET	0,978	25 JUL	0,997	0,978
5 SET	0,956	26 JUL	0,996	0,978
6 SET	0,945	27 JUL	0,996	0,983
7 SET	0,927	28 JUL	0,997	0,978
8 SET	0,951	29 JUL	0,993	0,984
9 SET	0,947	30 JUL	0,990	0,980
10 SET	0,963	31 JUL	0,996	0,978
11 SET	0,952	1 AGO	0,998	0,979
12 SET	0,986	2 AGO	0,996	0,980
13 SET	0,967	3 AGO	0,998	0,984

### C) PROFUNDIDADE DE AMORTECIMENTO

A profundidade de amortecimento ( $D$ ), para cada dia e cada perfil, foi calculada a partir do declive das regressões representadas pela equação (10), apresentando-se na Fig. 3 os valores assim obtidos. São de realçar os valores mais elevados em solo argiloso, com uma média de  $14,8 \pm 0,66$  cm, para o período de 10 dias (4 a 13 de Setembro). O pico registado no dia 17 ( $D = 19,5$  cm) está associado a um dia onde ocorreu precipitação apreciável (8,6 mm).

Nos perfis referentes ao solo arenoso os valores são de  $6,71 \pm 0,52$  cm no perfil sem manta-morta e de  $8,06 \pm 0,58$  cm no perfil com manta-morta. Ao longo do período estudado, os valores de  $D$  nos dois perfis tendem a aproximar-se, sendo a diferença na segunda metade quase inexistente. Este tipo de comportamento parece estar associado à ocorrência de precipitação nos dias 28 e 29 de Julho.

FIGURA 3 - Profundidade de amortecimento ( $D$ ) da onda térmica para as três situações estudadas.



A partir dos valores médios de  $D$  para as várias situações estudadas, e usando a equação (9), os valores da difusividade térmica são, para os perfis  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$ , respectivamente de  $0,8 \times 10^{-6}$ ,  $0,16 \times 10^{-6}$  e  $0,24 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ . Os valores anuais de  $D$  correspondentes aos valores médios diários calculados são, para os perfis  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$ , respectivamente de 2,86 m, 1,28 m e 1,54 m.

#### D) VARIAÇÃO SINUSOIDAL DA TEMPERATURA

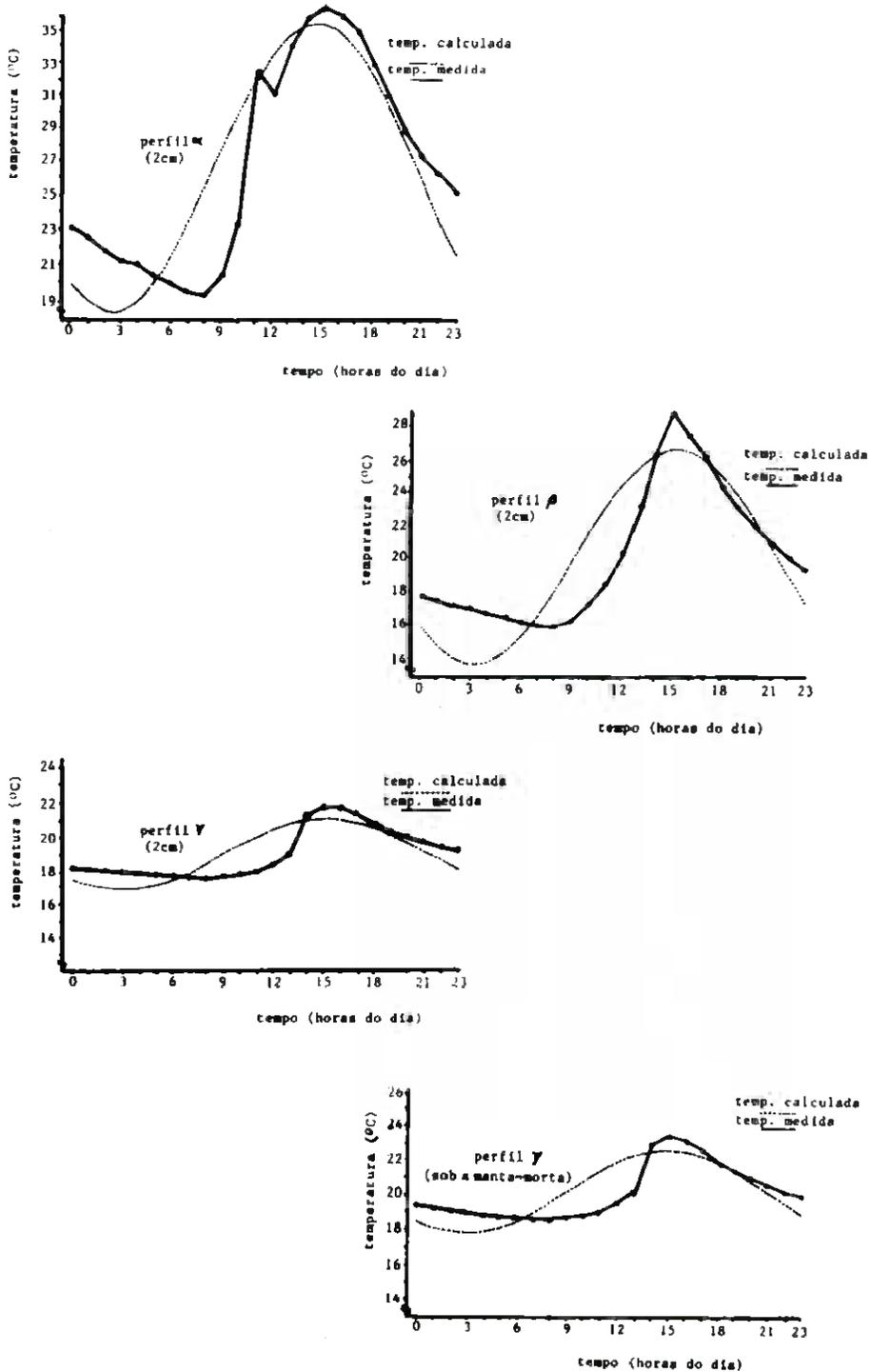
O modelo sinusoidal de variação térmica foi testado para a profundidade de 2 cm em solo mineral em todos os perfis e entre a manta-morta e o solo mineral no perfil  $\gamma$ . Isto permite comparar entre si as várias situações estudadas e, desta forma, destacar a influência do coberto florestal e do horizonte O no carácter sinusoidal da curva diária.

Para cada uma das situações, a curva de variação horária da temperatura medida em cada dia do período considerado foi comparada com a curva calculada a partir da equação (7) onde o parâmetro  $A(z)$  utilizado foi obtido a partir das medições. As curvas medida e calculada foram alinhadas pelas temperaturas máximas, pelo que ao argumento da função seno na equação (7) se teve de adicionar a fase correspondente.

Os resultados obtidos para um dia representativo de cada situação estão representados na Fig. 4. Os coeficientes de correlação calculados, por comparação das curvas medidas e estimadas para todos os dias dos períodos considerados, são significativos a um nível de 0,1% para a maioria dos casos, com excepção dos referentes aos dias 25 e 28 de Julho no perfil  $\gamma$  onde o nível de significância é de 1% (Quadro 3).

À profundidade de 2 cm, os valores mais elevados de  $r$  foram obtidos nos perfis  $\alpha$  e  $\beta$ , enquanto que os mais baixos se registaram no perfil  $\gamma$ . Neste último perfil, a comparação entre as correlações obtidas a 2 cm e sob a manta-morta revela uma melhoria da correlação ao nível da base da manta-morta (0 cm).

FIGURA 4 – Curvas das temperaturas médias horárias medidas e estimadas para um dia representativo de cada uma das situações estudadas: perfil  $\alpha$  (6 SET); perfil  $\beta$  (26 JUL); perfil  $\gamma$  a 2 cm (3 AGO); perfil  $\gamma$  sob a manta-morta (3 AGO).



## QUADRO 3

*Coefficientes de correlação entre as temperaturas horárias medidas às profundidades indicadas e as calculadas pelo modelo sinusoidal (eq. 7).*

SOLO ARGILOSO		SOLO ARENOSO			
DIAS	(perfil $\alpha$ ) -2 cm-	DIAS	(perfil $\beta$ ) -2 cm-	(perfil $\gamma$ ) -2 cm-    -0 cm-	
4 SET	0,946	25 JUL	0,842	0,588	0,644
5 SET	0,722	26 JUL	0,853	0,777	0,808
6 SET	0,861	27 JUL	0,879	0,817	0,722
7 SET	0,720	28 JUL	0,808	0,526	0,564
8 SET	0,939	29 JUL	0,790	0,702	0,711
9 SET	0,884	30 JUL	0,941	0,708	0,754
10 SET	0,872	31 JUL	0,836	0,789	0,822
11 SET	0,870	1 AGO	0,868	0,819	0,842
12 SET	0,878	2 AGO	0,889	0,831	0,853
13 SET	0,878	3 AGO	0,875	0,738	0,757

## 4. DISCUSSÃO

No perfil térmico do solo sob coberto vegetal e com manta-morta os gradientes térmicos são consideravelmente menores e as amplitudes mais reduzidas, em comparação com os outros perfis. Por exemplo, durante o período noturno a estabilidade térmica neste perfil é facilmente verificável pela quase ausência de gradientes térmicos (Fig. 1), com particular evidência para os centímetros iniciais. Este comportamento parece indicar que à atenuação normal das amplitudes e gradientes térmicos num solo sob coberto florestal se adiciona o papel de isolante térmico desempenhado pela manta-morta.

A camada de ar essencialmente estacionária que constitui a porosidade da manta-morta quando seca é responsável por uma forte diminuição da condutividade térmica, funcionando como sumidouro de energia durante o dia, não permitindo por isso maior aquecimento do solo. Pelo contrário, durante a noite, a manta-morta funciona como uma fonte aparente de energia relativamente ao solo mineral, por baixar o tecto de trocas radiativas, evitando um excessivo arrefecimento do solo.

O efeito da manta-morta do solo parece ser semelhante ao das coberturas opacas à radiação solar e utilizadas como mulches para a modificação do regime térmico em solos agrícolas.

Os valores obtidos para a profundidade de amortecimento em qualquer dos solos analisados concordam com os valores referidos por MONTEITH & UNSWORTH (1990), se considerarmos os teores de água no solo e a precipitação entretanto ocorrida. Os valores mais elevados obtidos no perfil  $\alpha$  resultam do alto teor de humidade que apresenta. O efeito anteriormente referido da manta-morta reflecte-se nos maiores valores da profundidade de amortecimento calculados para o perfil  $\gamma$ , quando comparados com os referentes ao perfil  $\beta$ , durante a primeira metade do período representado.

A ocorrência de precipitação e nebulosidade associada poderá ser responsável pelas oscilações de  $D$  observáveis na Fig. 3, tanto para o solo nu como para o solo sob coberto vegetal. No primeiro caso, o aumento brusco de  $D$  no dia em que a precipitação foi de 8,6mm poderá resultar mais da baixa insolação do que da água, pois a condutividade térmica do solo varia pouco pela adição de água a solos já húmidos, situação em que se encontrava o solo de textura argilosa antes da chuvada. No caso dos perfis em solo de textura arenosa, a convergência dos valores de  $D$  na segunda metade do período de observações em causa resulta não só dum aumento de  $D$  no perfil  $\beta$  mas também do seu decréscimo no perfil  $\gamma$ . De facto, a nebulosidade, ao reduzir os níveis de radiação e implicitamente o efeito isolante da manta-morta, poderá ter aqui um papel importante. Uma questão a investigar nos próximos trabalhos é a do efeito conjugado dos dois factores (humidade e nebulosidade) sobre a diluição da influência da manta-morta no comportamento térmico do solo.

Uma das vantagens mais facilmente reconhecidas ao modelo sinusoidal consiste em serem somente necessárias poucas medições de temperatura para o cálculo das propriedades térmicas do solo. A

medição simultânea do teor de humidade do solo permite também a determinação do parâmetro  $G$  do balanço energético (ANDRADE, 1991).

Os resultados expressos na Fig. 4 e Quadro 3 permitem considerar a hipótese sinusoidal como estatisticamente aplicável ao tipo de variação real da temperatura do solo no ciclo diário. No entanto, os dados também indicam que o modelo sinusoidal não exprime convenientemente a variação da temperatura durante todo o ciclo diário, principalmente no perfil  $\gamma$ . De facto, uma dificuldade fundamental do modelo reside nas diferentes durações dos períodos de aquecimento e arrefecimento ocorridas na realidade. Enquanto que na curva sinusoidal teórica tanto o aquecimento como o arrefecimento duram 12 horas, a duração do período de aquecimento nos casos estudados varia entre 6 e 10 horas. Isto leva a que as formas das curvas de aquecimento e de arrefecimento reais sejam diferentes das teóricas. A um aquecimento rápido do solo durante a manhã, quase exponencial, segue-se um arrefecimento lento durante a tarde que se aproxima, analiticamente, da forma sinusoidal. Durante a noite o declínio da temperatura torna-se mais lento, governado pelo balanço radiativo de grande comprimento de onda e pelo fluxo predominantemente ascendente de energia do solo, passando a diferir de novo da curva sinusoidal.

A dificuldade no ajuste da curva sinusoidal teórica às variações térmicas medidas é ainda mais notória no perfil  $\gamma$ , para as duas profundidades analisadas, e reflecte-se nos menores coeficientes de correlação aqui obtidos. De facto, a manta-morta encurta ainda mais o período de aquecimento, por atrasar a ocorrência das temperaturas mínimas. Níveis de correlação semelhantes foram obtidos por ANDRADE (1991) no estudo da variação térmica à superfície de um solo argiloso cultivado (trigo).

Assim, afigura-se-nos necessária uma análise separada para os períodos diurno e nocturno. PARTON & LOGAN (1981) chegaram a conclusão semelhante ao proporem o uso duma onda sinusoidal para prever as variações térmicas de uma parte do dia e uma função exponencial para a outra parte. Outra alternativa pode ser tentada através da análise das Séries de Fourier com utilização de várias harmónicas. BUCHAN (1982) e KIMBALL *et al.* (1976) referem, para variações diárias simples, a necessidade de pelo menos 6 harmónicas. Para o ciclo anual, onde as assimetrias na curva são menores (MILLER, 1981), duas harmónicas são suficientes (VAN WIJK & DE VRIES, 1963).

A variação no tempo e no espaço das propriedades térmicas do solo assim como o efeito da transferência de energia térmica por transporte de água, levaram LETTAU (1954), VAN WIJK & DE VRIES (1963) e VAN WIJK & DERKSEN (1963) a propor outras teorias de transferência de energia no solo, considerando características não sinusoidais da onda térmica superficial.

Na continuidade deste trabalho pretende-se detalhar o estudo da profundidade de amortecimento ( $D$ ) e dos factores responsáveis pela sua variação, assim como testar outras soluções analíticas para as curvas térmicas diárias dos solos.

### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Professor Doutor J. Pinto Peixoto o apoio dado na elaboração deste trabalho e os comentários que o permitiram tornar menos entrópico. O Engenheiro José Paulo Melo e Abreu e o Sr. Agostinho Gonçalves Mendes prestaram também uma ajuda apreciável, assim como a Sra. D. Isabel Gaspar na elaboração das figuras.

### BIBLIOGRAFIA

- ABREU, F.G & CLARK, J.A. (1988-1992) — Groundnut seedling emergence in relation to thermal-time and soil water, *Anais do Instituto Superior de Agronomia*, 43: 219-232.
- ANDRADE, J. (1991) — *Fluxo de energia e temperatura do solo. Estimativa e medição*, Tema apresentado ao abrigo das P.A.P. e C.C., Universidade de Évora, Évora.
- BERG, B., BERG, M., CORTINA, J., ESCUDERO, A., GALLARDO, A., JOHANSSON, M. & MADEIRA, M. (1992) — Soil organic in some European coniferous forests, *Proceedings from scope Seminar Geography of Carbon Budget Processes in Terrestrial Ecosystems*, Szymbark, Aug 17-23 (em publicação).
- BUCHAN, G.D. (1982) — Predicting bare soil temperature. I. Theory and model for the multi-day mean diurnal variation, *Journ. of Soil Science*, 33: 185-197.

- CARSLAW, H.S. & JAEGER, J.C. (1959) — *Conduction of heat in solids*, Clarendon Press, Oxford.
- CARSON, J.E. (1963) — Analysis of soil and air temperatures by Fourier techniques, *J. Geophys. Res.*, 68: 2217-2232.
- DE VRIES, D.A. & PHILIP, J.R. (1986) — Soil heat flux, thermal conductivity and the null-alignment method, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 50: 12-18.
- FABIÃO, A., MADEIRA, M., STEEN, E., KÄTTERER, T. & RIBEIRO, C. (1992) — Growth dynamics and spatial distributions of root mass in *Eucalyptus globulus* plantation in Portugal, *Proceedings of the workshop "Eucalyptus for biomass production. The State-of-the-art"*, 10-13 February, 1992, Lisbon, Portugal (em publicação).
- FLUKER, B.J. (1958) — Soil temperatures, *Soil Sci.*, 86: 35-46.
- HANKS, R.J., AUSTIN, D.D. & ONDRECHEN, W.T. (1971) — Soil temperature estimation by a numerical method, *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 35: 665-667.
- HORTON, R. & WIERENGA, P.J. (1983) — Estimating the soil heat flux from observations of soil temperatures near the surface, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 47: 14-20.
- JANSSON, P.E. (1991) — *Simulation model for soil water and heat conditions. Description of the soil model*, Swedish Univ. of Agric. Sciences, Uppsala.
- KIMBALL, B.A., JACKSON, R.D., REGINATO, R.J., NAKAYAMA, F.S. & IDSO, S.B. (1976) — Comparison of field-measured and calculated soil heat fluxes, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 40: 18-25.
- LETTAU, H.H. (1954) — Improved models of thermal diffusion in the soil, *Trans. Am. Geophys. Union*, 35: 121-132.
- MACEDO, J.M.M.B. (1988) — *Meteorização das rochas - processos, produtos e o solo*, Instituto Superior de Agronomia, Lisboa.
- MEDINA, J.M.B. (1973) — *Relatório de Actividade do Aluno Estagiário do Curso de Engenheiro Agrónomo*, ISA, Lisboa.
- MILLER, D.H. (1981) — *Energy at the surface of the Earth*, Academic Press, New York.
- MONTEITH, J.L. & UNSWORTH, M.H. (1990) — *Principles of Environmental Physics*, Chapman and Hall Inc., New York.

- 
- PARTON, W.J. & LOGAN, J.A. (1981) — A model for diurnal variation in soil and air temperature, *Agriculture Meteorology*, 23: 205-216.
- SERRALHEIRO, F. & MADEIRA, M. (1989) — Changes in arthropod soil fauna due to afforestation with *Eucalyptus globulus* Labill, *Agrochemistry and Soil Science*, 39: 602-606.
- VAN WIJK, W.R. & DERKSEN, W.J. (1963) — Sinusoidal temperature variation in a layered soil. In "*Physics of Plant Environment*" (W.R. van Wijk, ed.), North Holland Publishing Co., Amsterdam, 171-209.
- VAN WIJK, W.R. & DE VRIES, D.A. (1963) — Periodic temperature variations in a homogeneous soil. In "*Physics of Plant Environment*" (W.R. van Wijk, ed.), North Holland Publishing Co., Amsterdam, 102-143.
- WIERENGA, P.V. & WIT, C.T. (1970) — Simulation of heat transfer in soils, *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 34: 845-848.

