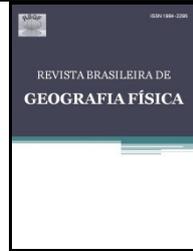




Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: www.ufpe.br/rbgfe



Caracterização Térmica de Solos no Agreste Meridional do Estado de Pernambuco, Brasil¹

José de Almeida Maciel Neto², Antonio Celso Dantas Antonino³, José Romualdo de Sousa Lima⁴, Eduardo Soares de Souza⁵, Willames de Albuquerque Soares⁶, Edevaldo Miguel Alves⁷, Carlos Alexandre Barros de Almeida⁸, José Angelim da Silva Neto²

¹ Parte da Dissertação de Mestrado do primeiro autor, orientado pelo segundo, no Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares (PROTEN) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Brasil. ² Doutorando do PROTEN, Dept. Energia Nuclear (DEN), UFPE. E-mail: profjosemaciel@gmail.com, E-mail: joseangelim@yahoo.com.br; ³ Prof. Associado do DEN-UFPE e Bolsista de Produtividade do CNPq; ⁴ Prof. Adjunto e Bolsista de Produtividade do CNPq, Unidade Acadêmica de Garanhuns, Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE). E-mail: romualdo@uag.ufpe.br; ⁵ Prof. Adjunto da UFRPE, Unidade Acadêmica de Serra Talhada e Bolsista de Produtividade do CNPq, E-mail: eduardosouza@uast.ufpe.br; ⁶ Prof. Escola Politécnica de Pernambuco, Universidade de Pernambuco. E-mail: willamess@yahoo.com.br; ⁷ Doutorando da Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFPE. E-mail: edevaldofisica@gmail.com; ⁸ DEN-UFPE. E-mail: almeidacarlos2003@yahoo.com.br.

Artigo recebido em 29/05/2015 e aceito em 08/10/2015.

RESUMO

A determinação das propriedades térmicas do solo é realizada a partir de sua caracterização térmica, pois elas ditam como é o armazenamento e a movimentação do calor nos solos e influenciam, como tal, a temperatura e o fluxo de calor em função do tempo e da profundidade. A habilidade de gerenciar essas propriedades térmicas é uma importante ferramenta na gestão do regime de temperatura para beneficiar a germinação das sementes e o crescimento das plantas no solo. Nesse trabalho foi feita a caracterização térmica em dois tipos de solos da região do Agreste Meridional do Estado de Pernambuco. Os solos utilizados foram classificados como Latossolo Amarelo e Neossolo Regolítico. Para determinação de suas propriedades térmicas, o modelo de De Vries foi utilizado para calcular a capacidade térmica volumétrica e para a difusividade térmica foram usados os métodos: harmônico e logarítmico. A condutividade térmica foi calculada a partir da capacidade térmica volumétrica e da difusividade térmica. Para os solos estudados, as diferenças entre os resultados obtidos e os determinados por outros pesquisadores foram muito pequenas. Os resultados mostraram que as propriedades térmicas variam com o teor de umidade e a textura do solo. A capacidade térmica volumétrica pode ser facilmente determinada usando a equação de De Vries, nos dois tipos de solos estudados.

Palavras-chave: Capacidade Térmica Volumétrica, Difusividade Térmica, Condutividade Térmica, Método Harmônico, Método Logarítmico.

Thermal Characterization of Soils in Southern Wasteland of the State of Pernambuco, Brazil

ABSTRACT

The determination of thermal properties of soil is made from its thermal characterization because it dictates how the storage and movement of heat in soils and influence, as such, the temperature and heat flux as a function of time and depth. The ability to manage these thermal properties is an important tool in managing the temperature regime to benefit seed germination and plant growth in soil. In this paper, the thermal characterization was made in two types of soils in the southern region of the Wasteland of the State of Pernambuco. The soils were classified as Yellow Latosol and Regolithic Neosol. To determine its thermal properties, the model of De Vries was used to calculate the volumetric heat capacity and for thermal diffusivity were used harmonic and logarithmic methods. The thermal conductivity was calculated from the volumetric heat capacity and thermal diffusivity. For soils, the differences between the results obtained and those determined by other researchers were very small. The results showed that the thermal properties vary with moisture content and soil texture. The volumetric heat capacity can be readily determined using the equation of Vries (1963), for both types of soils.

Keywords: Volumetric Heat Capacity, Thermal Diffusivity, Thermal Conductivity, Harmonic Method, Logarithmic Method.

Introdução

A densidade de fluxo de calor no solo, isto é, a

* E-mail para correspondência: acda@ufpe.br (Antonino, A.C.D.).

quantidade de calor fluindo no solo por unidade de área por unidade de tempo, determina o ambiente térmico do solo. Como um componente do balanço de energia da superfície do solo ele depende principalmente da

exposição da superfície à radiação solar e de suas propriedades radiativas (Fuchs, 1986).

O fluxo de calor no solo (G) é importante porque afeta o regime térmico do solo, que por sua vez, exerce uma substancial influência em várias atividades biológicas das plantas, tais como: germinação, emergência das mudas, crescimento inicial, maturação e produção (Poulovassilis et al., 1998). O fluxo de calor na superfície do solo é necessário para explicar o armazenamento, a transferência de calor dentro do solo e a troca entre o solo e a atmosfera (Kustas et al., 2000). Geralmente o fluxo de calor no solo não excede 10–15% do saldo de radiação (Lima et al., 2005; Lima et al., 2011; Lima et al., 2013; Gondim et al., 2015; Souza et al., 2015), contudo, ele pode ser uma porcentagem muito maior do balanço de energia numa escala horária, principalmente para solos secos de regiões áridas e desérticas (Hillel, 1998).

O fluxo de calor na superfície do solo é um componente muito importante do balanço de energia, sendo que a determinação deste balanço tem sua importância nos estudos de transferência de água e de energia no sistema solo-planta-atmosfera, nos estudos das mudanças climáticas, além de ser usado para estimar com grande precisão a evaporação e/ou evapotranspiração de áreas com ou sem vegetação (Franks et al., 1997).

Além do fluxo de calor no solo, a temperatura do solo é considerada um fator importante que está diretamente relacionado ao sistema solo-planta-atmosfera, afetando três funções importantes do solo: a biológica, a química e a física. Nas plantas, ela influencia grandemente o processo de germinação e emergência, bem como, o crescimento das raízes. Portanto, é capaz de controlar o poder produtivo, o desenvolvimento e a distribuição de plantas no solo (Conceição et al., 2000; Furlani et al., 2008; Knies, 2010).

A temperatura do solo varia em função das mudanças ocorridas nos processos de troca de energia, as quais ocorrem principalmente na superfície do solo. Os efeitos desses fenômenos são propagados dentro do perfil do solo por uma complexa série de processos de transporte, sendo que as taxas desses transportes são afetadas pelas propriedades do solo, as quais são variáveis no tempo e no espaço. Deste modo, a formulação quantitativa e a predição do regime térmico do solo assumem uma grande importância. Não só a simples predição, mas também as possibilidades de otimização do regime térmico do solo, são tarefas que necessitam do conhecimento dos processos e dos parâmetros ambientais e do solo envolvidos. Os parâmetros relativos ao solo incluem a capacidade térmica volumétrica, a condutividade térmica e a difusividade térmica (sendo que todos são afetados pela densidade e umidade do solo), bem como as fontes e sumidouros internos de calor operando a qualquer tempo (Hillel, 1998).

Por outro lado, a modelagem da temperatura da superfície do solo tem sido uma tarefa desafiadora para os pesquisadores há muito tempo. A maneira mais simples de estimar, aproximadamente, a temperatura do solo é obter uma equação modelo de uma função

senoidal, na qual ela varie com o tempo em torno de um valor médio. Uma vez que, as variações reais, na natureza, não são tão sequenciais, essa equação modelo pode não seguir a observação real em alguns momentos. Um pressuposto para este modelo é considerá-lo fundamentado na resolução de uma equação unidimensional vertical de difusão de calor, equação de Fourier, supondo-se o meio homogêneo e isotrópico, e considerando-se a difusividade térmica constante (Hillel, 2004; Tyagi e Satyanarayana, 2009).

As propriedades térmicas do solo tiveram sua importância reconhecida no início do século 19 (Forbes, 1849). Elas influenciam a distribuição de energia no solo, pois estão relacionadas com a temperatura, com a transferência do calor e da água através da superfície do mesmo. Por estas razões, são bastante estudadas pelos físicos do solo, os cientistas agrícolas, os biólogos e os micrometeorologistas (Hopmans et al., 2002; Nkongolo et al., 2010).

Assim, considerando-se que diferentes tipos de solo apresentam características peculiares, faz-se necessário que sejam identificadas, para cada situação particular, as suas propriedades térmicas, as quais são resultantes de um conjunto de fatores, incluindo sua textura e composição química. As observações regulares de temperatura e de umidade volumétrica, em diferentes profundidades de um solo, possibilitam o conhecimento do seu comportamento térmico e da obtenção de importantes propriedades térmicas, como: i) capacidade térmica volumétrica, que indica a habilidade do solo em armazenar calor, isto é, expressa a variação da temperatura resultante do ganho ou da perda de calor; ii) difusividade térmica, que representa a habilidade do solo em difundir calor, sendo esta uma medida do tempo necessário para as variações de temperatura se propagarem e iii) condutividade térmica, que representa a habilidade do solo em conduzir calor (Richardt e Timm, 2004).

A capacidade térmica volumétrica de um solo depende de vários fatores que podem ser organizados em dois grandes grupos, aqueles que são inerentes ao próprio solo e aqueles que podem ser dirigidos ou controlados até certo ponto. Os fatores ou as propriedades que são inerentes ao solo incluem a sua composição mineralógica e a sua matéria orgânica (De Vries, 1952; Wierenga et al., 1968; Yadav e Saxena, 1973).

Os fatores que podem ser gerenciados externamente, que influenciam a capacidade térmica do solo, incluem a umidade volumétrica e a densidade do solo. A umidade volumétrica desempenha um papel importante na capacidade térmica do solo, mas é o mais difícil de gerir. O manejo do solo, também, afeta a capacidade térmica porque as práticas que provocam a compactação do solo aumentam a densidade e diminuem a porosidade do solo, tendo um efeito significativo sobre a capacidade térmica dos solos (De Vries, 1952; Wierenga et al., 1968; Yadav e Saxena, 1973).

Um suporte experimental obrigatório, para os modelos físicos de um regime térmico, é a função da difusividade térmica do solo, ou seja, a difusividade térmica em função da umidade do solo, que depende da

composição e das propriedades dos horizontes do solo. O desafio é desenvolver um método simples, exato, rápido e cientificamente sólido para adquirir este essencial parâmetro termofísico (Mikayilov, 2007; Mikayilov e Shein, 2010).

A difusividade térmica, termo usado primeiramente por Lord Kelvin (Jackson e Taylor, 1986), determina com que velocidade as ondas de temperatura se movem no solo, o que significa dizer que ela determina a sua capacidade em transportar o calor para o seu interior. A uma difusividade baixa, por exemplo, podem-se associar uma temperatura máxima alta na superfície e pequena profundidade de penetração do calor (Alves et al., 2006).

Diversos métodos foram publicados na literatura para se determinar in loco a difusividade térmica do solo, utilizando dados de temperatura do solo em diferentes profundidades. Dentre eles, podem-se citar: i) método logarítmico (Horton et al., 1983; Antonino et al., 1997) e ii) método harmônico (Horton et al., 1983; Antonino et al., 1997; Passerat de Silans et al., 2006; Soares, 2009).

A condutividade térmica é considerada uma das mais importantes propriedades térmicas na agricultura, sendo apontada como a propriedade térmica que controla o fluxo de calor através dos materiais de diferentes tipos (Abu-Hamdeh et al., 2001).

Os testes em campo ou em laboratórios podem ser usados para medir a condutividade térmica do solo. No entanto, as medições em campo podem ser caras e demoradas. As técnicas de medição em laboratórios podem ser classificadas em duas categorias principais, a saber: métodos de estado estacionário e métodos de estado transitório. Os métodos de estado estacionário medem a condutividade térmica de uma amostra do solo quando ela está submetida a um gradiente de temperatura constante com o tempo, e atinge um nível de fluxo de calor constante através dela em qualquer ponto desse solo. A literatura tem referenciado o supramencionado método como o método de barra dividida (Midttømme et al., 1997; Coté e Konrad, 2005; Abuel-Naga et al., 2009).

Os métodos de estado transitório são os métodos preferidos, particularmente, para os materiais porosos e úmidos. Geralmente, empregam uma sonda de agulha que utiliza uma linha para introduzir uma fonte de energia térmica no solo (Laurent, 1989). Cada método tem suas próprias vantagens, limitações e suposições (Midttømme e Roaldset, 1999).

Neste contexto, predizer o transporte de massa e de calor no solo, certamente ajudaria a gerir os recursos do solo e da água na agricultura irrigada. As propriedades

térmicas são necessárias para uma modelagem do transporte de calor no solo (Abu-Hamdeh et al., 2001; Ekwue et al., 2006).

Desta forma, o objetivo deste trabalho foi realizar a caracterização térmica de dois tipos de solos do Agreste Meridional do Estado de Pernambuco, através dos métodos harmônico e logarítmico, a fim de facilitar o entendimento das relações solo-planta-atmosfera e fornecer subsídios para um estudo de técnicas de cultivo adequadas para esses solos.

Material e Métodos

As medidas para a avaliação do regime térmico da camada superficial do solo, o monitoramento da umidade e da temperatura do solo e a caracterização térmica do solo foram conduzidas em duas localidades na mesorregião do agreste meridional do Estado de Pernambuco, onde as atividades agrícolas e pecuárias são as maiores expressões econômicas na região, descritas a seguir:

Localidade I: município de Garanhuns (8° 53' S, 36° 29' O e altitude de 842 m). O clima na microrregião é mesotérmico, com temperatura média anual de 20°C. O solo da área é classificado como Latossolo Amarelo (EMBRAPA, 2006). A temperatura desse solo foi medida por meio de sensores, modelo Campbell 108, instalados nas profundidades de 2, 8, 20, 40, 60, 80 e 100 cm.

Localidade II: município de São João (8° 52' 30'' S, 36° 22' O e altitude de 705 m). O clima predominante na região é o As', que equivale a um clima quente e úmido, conforme classificação de Köppen. O solo da área é classificado como Neossolo Regolítico (EMBRAPA, 2006). A temperatura desse solo foi medida por meio de sensores, modelo Campbell 108, instalados nas profundidades de 2, 8, 10, 20, 30, 40 e 50 cm.

As umidades volumétricas, desses solos, nas duas áreas experimentais, foram medidas por um sensor TDR (Time Domain Reflectometry) - Reflectometria no Domínio do Tempo da Campbell Scientific Inc., devidamente calibrado, na profundidade de 5 cm.

Todos os sensores (de umidade e de temperatura do solo) foram conectados a um *Datalogger* CR 10X da Campbell Scientific Inc., com medidas realizadas a cada 60 segundos, sendo em média 48 leituras armazenadas por dia.

A granulometria dos solos, nas duas localidades, foi realizada pelo Laboratório de Física dos Solos do Departamento de Energia Nuclear, da Universidade Federal de Pernambuco, detalhada na Tabela 1.

Tabela 1. Granulometria, densidade do solo (ρ) e matéria orgânica (M.O.) da camada superficial (0-10 cm) do Latossolo Amarelo (Garanhuns, PE) e do Neossolo Regolítico (São João, PE).

Tipo de Solo	Areia	Silte	Argila	ρ	M.O.	Classe textural
	-----%-----			g cm ⁻³	%	
Latossolo Amarelo	75,6	7,2	17,2	1,57	1,58	Franco Arenosa
Neossolo Regolítico	86,4	10,9	2,7	1,32	0,99	Areia Franca

A porosidade para o Latossolo Amarelo foi de 0,410 cm³.cm⁻³ e para o Neossolo Regolítico foi de 0,500 cm³.cm⁻³. Os teores volumétricos em minerais, para esses dois tipos de solos, foram 57,42% e 49,10%, respectivamente. Estes dados subsidiaram as análises dos dados medidos das propriedades térmicas.

Muitos pesquisadores para estimar a capacidade térmica do solo têm usado o fato da mesma ser a soma das capacidades térmicas dos constituintes do solo (De Vries, 1963; Abu-Hamdeh, 2003). Em seguida, medindo-se a difusividade térmica, a propriedade térmica restante, ou seja, a condutividade térmica pode ser estimada (Abuel-Naga et al., 2009).

Determinação da capacidade térmica

Ponderando-se os diferentes constituintes do solo por seus teores volumétricos e adotando-se os valores numéricos das capacidades caloríficas dados por De Vries (1963), obtém-se:

$$C_T = 1,92f_{mt} + 2,51f_{org} + 4,18\theta \quad (1)$$

em que CT é a capacidade térmica volumétrica do solo, em MJ m⁻³.°C⁻¹, f_{mt}, a fração de volume dos minerais, f_{org}, a fração de volume da matéria orgânica e θ é a umidade volumétrica do solo.

Determinação da difusividade térmica

A difusividade térmica (αT) foi obtida com base nos métodos matemáticos, descritos a seguir.

1) Método Logarítmico – Seemann et al. (1979) mostraram que αT pode ser calculado por:

$$\alpha_T = \left[\frac{0,0121(z_k - z_i)}{\ln B} \right]^2 \text{ com}$$

$$B = \left[\frac{(T_{i1} - T_{i3})^2 + (T_{i2} - T_{i4})^2}{(T_{k1} - T_{k3})^2 + (T_{k2} - T_{k4})^2} \right] \quad (2)$$

sendo que Tin e Tkn (n = 1, 2, 3, 4) representam as temperaturas nas profundidades zi e zk a cada intervalo de seis horas, medidas durante um dia.

2) Método Harmônico – esse método tem como base a solução analítica da equação de difusão de calor, equação de Fourier, considerando-se a condutividade térmica (λT) e a capacidade térmica (CT) constantes, submetida às seguintes condições:

$$T(0,t) = \bar{T}_t + \sum_n^N = 1A_{on} \cdot \text{sen}(n\omega t + \Phi_{on})$$

e $\lim_{n \rightarrow \infty} T(z,t) = \bar{T}_t$ (3)

que fornece (Carslaw e Jaeger, 1959):

$$T(z,t) = \bar{T}_t + \sum_n^N = 1A_{on} \exp\left(-\frac{z}{D_n}\right) \text{sen}\left(n\omega t + \Phi_{on} - \frac{z}{Dn}\right)$$

com $D_n = \sqrt{2\alpha_T / n\omega}$ (4)

sendo que \bar{T}_t representa a temperatura média do perfil do solo no período fundamental do ciclo térmico P (igual a 24 h, neste trabalho) no solo; n, a ordem da harmônica considerada; N, o número total de harmônicas; z, a profundidade; A_{On} e Φ_{On} representam, respectivamente, a amplitude e a fase da harmônica n; ω, representa a pulsação ou frequência angular igual a 2π/P e Dn a profundidade de amortecimento da n-ésima harmônica.

A difusividade térmica (αT) é identificada a cada dia por meio de uma técnica de ajuste, procurando minimizar uma função critério. A função critério escolhida geralmente corresponde ao erro quadrático médio entre os valores observados em determinada profundidade z e o valor calculado pela equação (4) (Passerat de Silans et al., 2006).

Para determinação da difusividade térmica, no modelo harmônico, foram utilizadas as medidas de temperatura e da umidade do solo. O modelo logarítmico determina a difusividade térmica apenas em função das medidas de temperatura, mas para uma boa analogia, fez-se uma relação com a umidade do solo na hora em que foram realizadas essas aferições.

Determinação da condutividade térmica

Sendo a difusividade térmica do solo a razão entre a condutividade térmica (λT) e a capacidade térmica volumétrica (CT), também é uma função da umidade. Reichardt e Timm (2004) definem a difusividade térmica do solo pela seguinte equação:

$$\alpha_T = \frac{\lambda_T}{C_T} \quad (5)$$

Como a capacidade térmica volumétrica pode ser facilmente obtida usando-se as medições da umidade volumétrica e da densidade do solo, a determinação da condutividade térmica fica condicionada à determinação da difusividade térmica.

Resultados e Discussão

Sendo a transferência de calor, nas camadas da superfície do solo, uma função do gradiente de temperatura e de suas propriedades térmicas, a evolução das medidas de temperatura em função do tempo, em diferentes profundidades, mostrou-se para os solos em estudo, que o período fundamental P é de 24 horas (Figura 1).

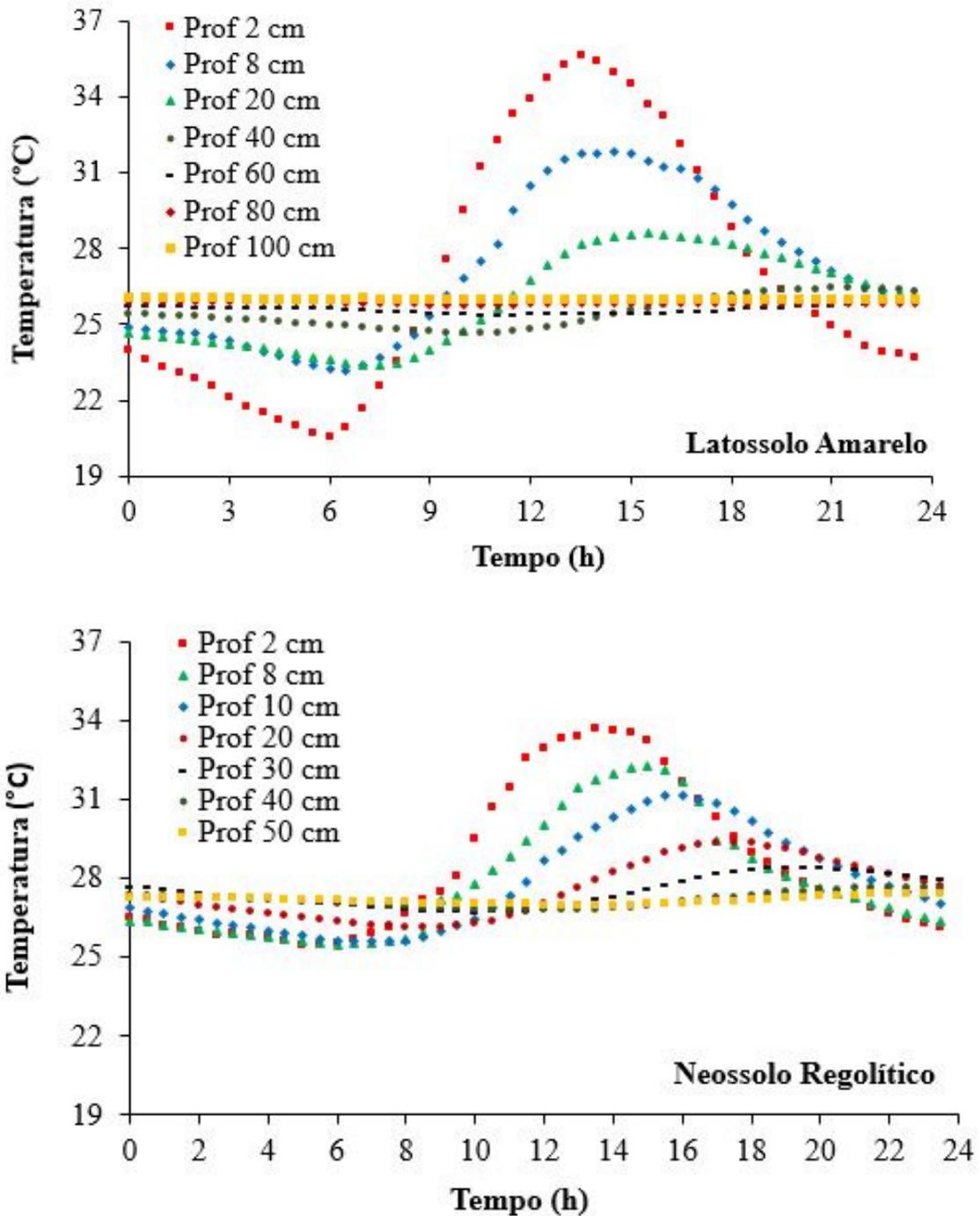


Figura 1. Evolução da temperatura do solo em função do tempo, nos dois tipos de solos analisados (Latossolo Amarelo e Neossolo Regolítico), em diferentes profundidades.

Esse período fundamental de 24 horas também foi obtido por Antonino et al. (1997), ao avaliarem o efeito do posicionamento de sensores de temperatura do solo.

Pode-se, também, notar que as variações de temperaturas decrescem com o aumento da profundidade, sendo essas variações inexistentes, praticamente, nesses solos, a partir de 40 cm e como o aquecimento do solo ocorre a partir da superfície, essas variações ocorrem com atraso proporcional à profundidade.

Através dos sensores de temperaturas mais próximos da superfície, nos dois tipos de solo, percebeu-se que, nas primeiras seis horas do dia, aproximadamente, houve uma propagação de calor no

sentido do interior do solo para superfície. Depois desse intervalo de tempo, esse fluxo de calor inverteu e manteve-se assim até às quinze horas, aproximadamente. Entretanto, a partir desse instante até o fim do dia, ocorreu uma nova inversão no sentido desse fluxo.

Tendo em vista o comportamento do perfil de temperatura nos solos em estudo (Figura 1), ficou caracterizada a evolução das temperaturas em função das profundidades desse solo em diferentes instantes. Assim, nas duas primeiras profundidades do solo, em que foram instalados os sensores, a temperatura apresentou-se bastante variável. No entanto, à medida que as camadas tornaram-se mais profundas, a

temperatura começou a se estabilizar. A evolução de temperatura no solo, em função do tempo, tem sua amplitude reduzida com a profundidade e o seu máximo sofre um atraso em relação à superfície. Por isso, a temperatura para profundidades maiores, e na escala diária, é praticamente constante, pois a amplitude se anula.

A variação da amplitude térmica pode ser mais bem visualizada pela disposição das tautócronas que adquirem a forma de uma “taça”. Verifica-se que a temperatura média em torno da qual a temperatura oscila senoidalmente é, aproximadamente, igual a 27 °C, no Neossolo Regolítico e, aproximadamente, igual a 25 °C, no Latossolo Amarelo (Figura 2).

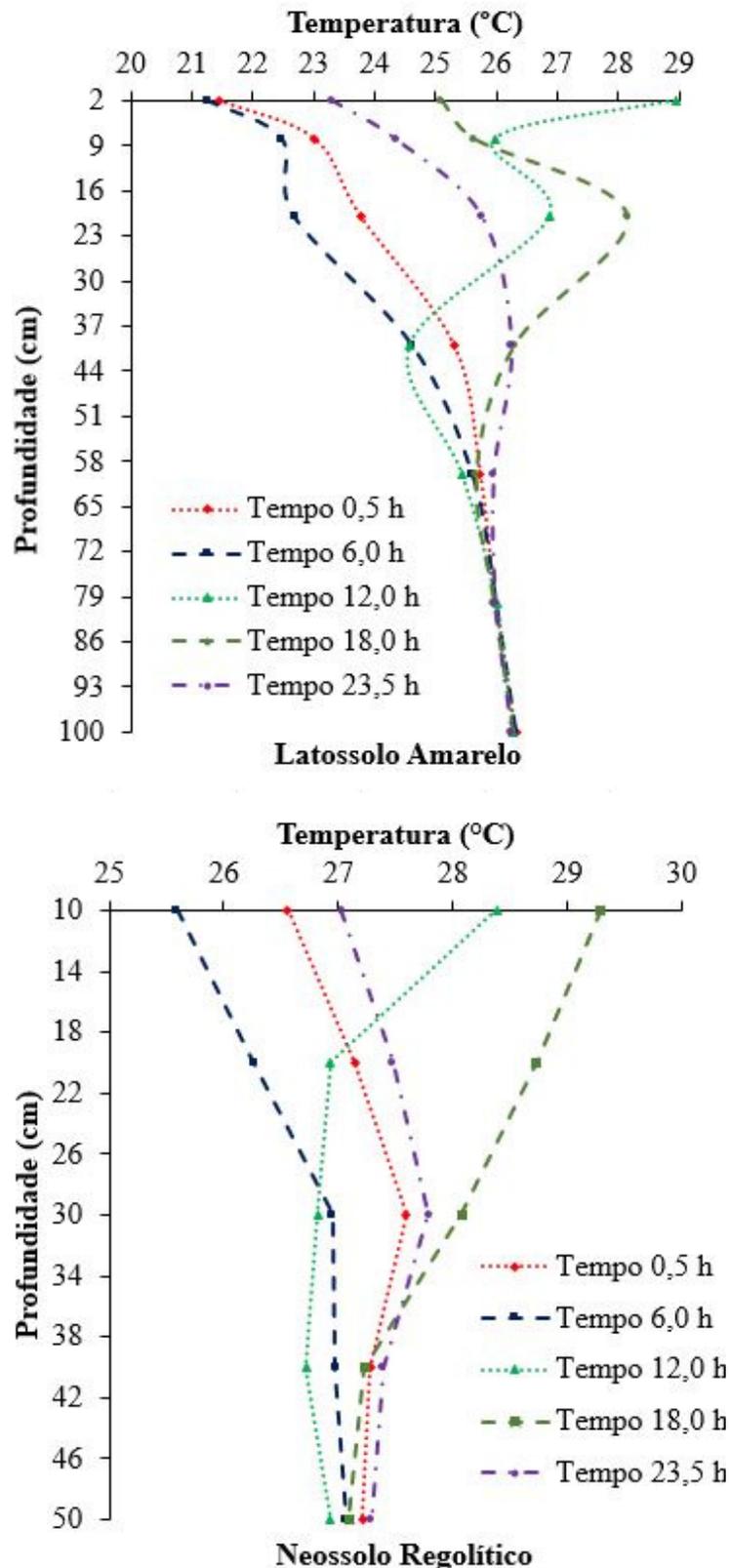


Figura 2. Perfis de temperatura em diferentes horários em solos Neossolo Regolítico e Latossolo Amarelo.

Estimando valores das temperaturas, nos dois solos analisados, o método harmônico mostrou uma boa sensibilidade em relação à umidade do solo (Figura 3).

A Figura 4 mostra um crescimento contínuo da capacidade térmica com o aumento da umidade volumétrica do solo.

Em geral, a difusividade térmica é pequena no solo com baixa umidade volumétrica, mas com o aumento da umidade no solo, inicialmente se produz um aumento da difusividade térmica, pois se formam

películas de água ao redor de suas partículas expelindo o ar do solo e aumentando a área de contato térmico entre as elas, o que causa um aumento rápido da condutividade térmica. Entretanto, segundo Oke (1987), a difusividade térmica só aumenta até atingir um valor máximo, na maioria dos solos, com valores superiores a 20% de umidade por volume do solo, o que corrobora com nossos resultados (Figura 5).

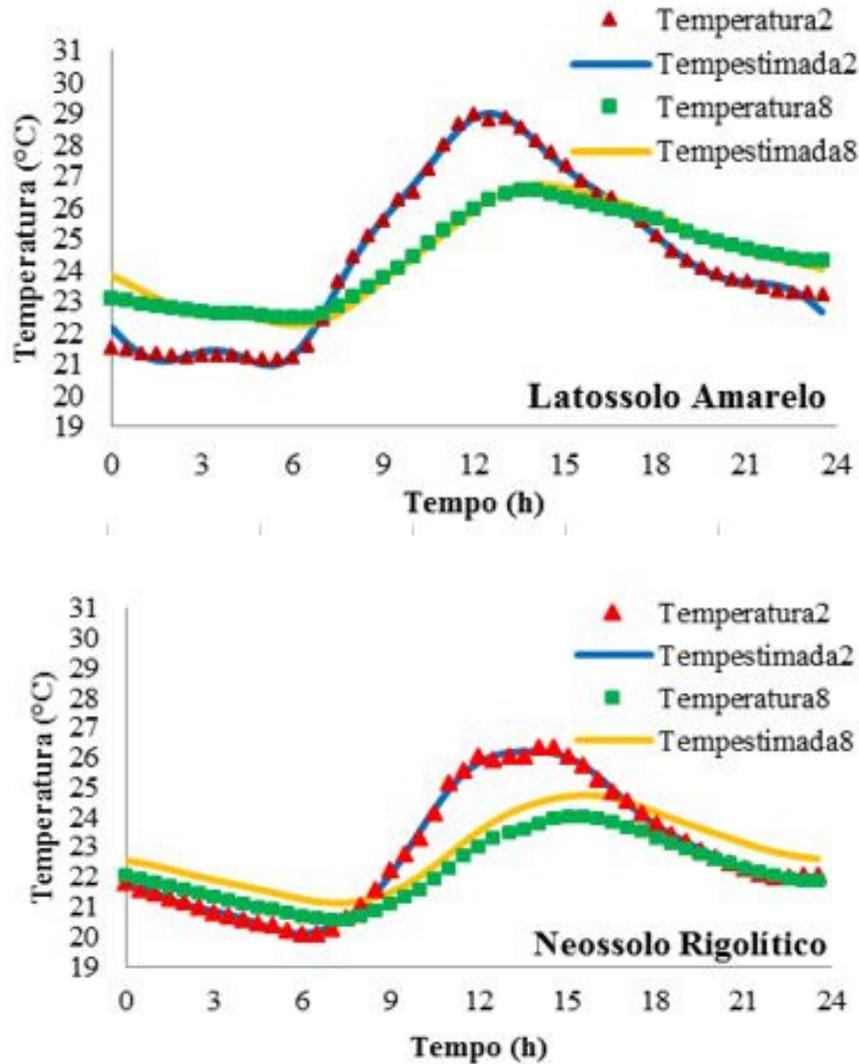


Figura 3. Temperaturas obtidas e estimadas pelo modelo harmônico nas profundidades de 2 e 8 cm para o Latossolo Amarelo e o Neossolo Regolítico.

Passerat de Silans et al. (1996) utilizaram o método harmônico e outros 02 (dois) métodos: transformada de Laplace e transformada de Laplace modificado, para a determinação da difusividade térmica do solo em dois conjuntos de dados de temperatura do solo, um que cumpria a hipótese da periodicidade estável e outro que não cumpria. Esses autores encontraram que quando a hipótese da periodicidade estável é cumprida, o método harmônico e o da transformada de Laplace corrigido levaram a resultados idênticos, sendo que eles

recomendaram o método harmônico, já que ele é mais simples de programar e consome menos tempo de execução do que o método da transformada de Laplace modificado. Já quando a hipótese da periodicidade estável não é cumprida, o método harmônico leva a erros na estimativa da difusividade térmica, sendo que nessas condições o método da transformada de Laplace modificado é o mais viável.

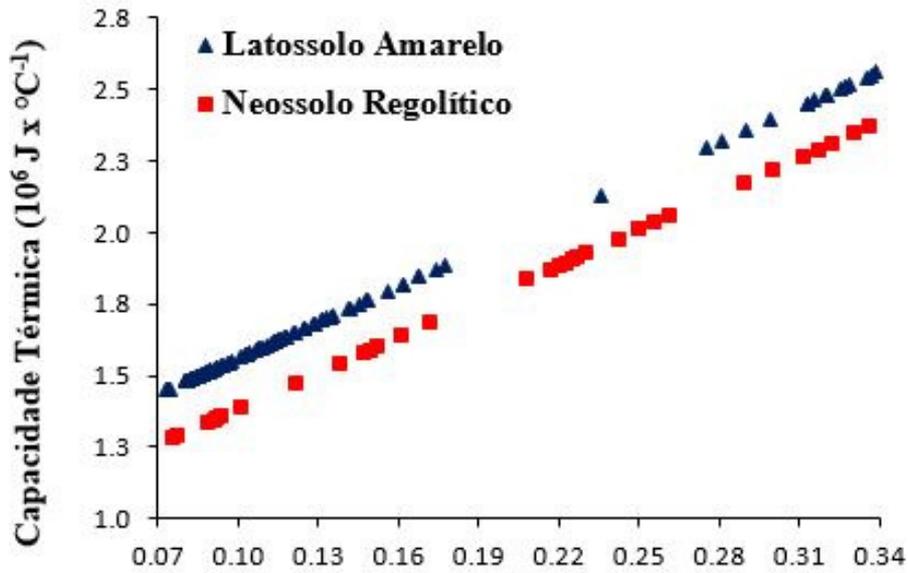


Figura 4. Capacidade térmica em função da umidade para o Latossolo Amarelo e o Neossolo Regolítico.

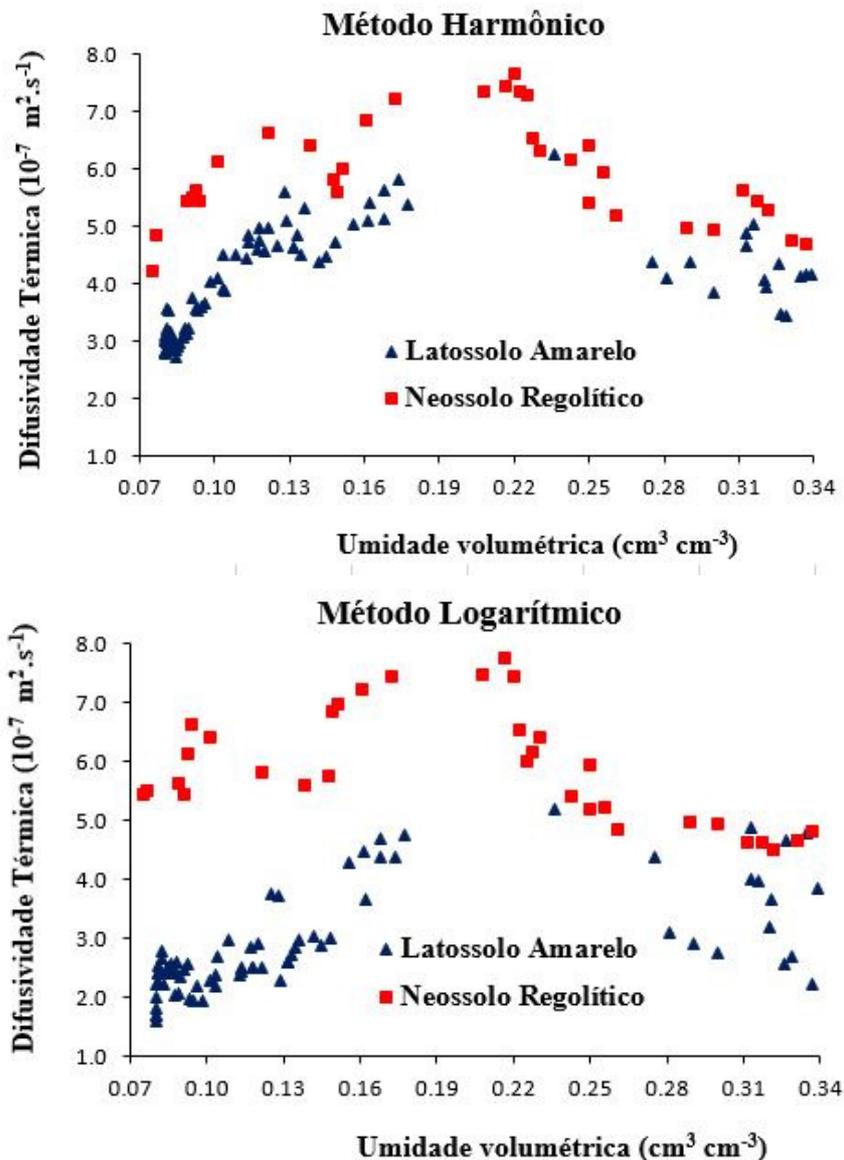


Figura 5. Difusividade térmica em função da umidade, estimada através dos métodos: harmônico e logarítmico, para o Latossolo Amarelo e o Neossolo Regolítico.

O pico da difusividade térmica é causado pelas mudanças na relação da condutividade térmica e da capacidade térmica volumétrica do solo. Antes do valor de pico da difusividade térmica, observa-se que o aumento na condutividade térmica com o aumento do teor de umidade é relativamente maior do que na capacidade térmica volumétrica. No entanto, após o pico, o aumento relativo da condutividade térmica do solo é menor do que o constante aumento da

capacidade térmica volumétrica. Como resultado, a difusividade térmica diminui após o valor de pico (Alvalá et al., 2002; Flora, 2006).

A Tabela 2 apresenta, para esses dois tipos de solos, os valores mínimos, máximos, médios e os respectivos desvios-padrão dos valores das propriedades térmicas medidos, eles foram bastante consistentes entre si e apresentados dentro de uma faixa estabelecida na literatura.

Tabela 2. Comparação dos valores das propriedades térmicas para o Latossolo Amarelo e Neossolo Regolítico.

Solos	Propriedades Térmicas	Mínima	Máxima	Média	Desvio Padrão	
Latossolo Amarelo	Capacidade (MJ.K ⁻¹ .m ⁻³)	1,45	1,79	1,57	0,09	
	Difusividade (x 10 ⁻⁷ .m ² .s ⁻¹)	Método Harmônico	2,94	7,40	4,67	1,29
		Método Logarítmico	1,01	5,20	2,86	0,88
	Condutividade (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	Método Harmônico	0,43	1,32	0,75	0,24
		Método Logarítmico	0,15	0,93	0,53	0,24
	Neossolo Regolítico	Capacidade (MJ.K ⁻¹ .m ⁻³)	1,28	2,39	1,86	0,37
Difusividade (x 10 ⁻⁷ .m ² .s ⁻¹)		Método Harmônico	4,68	7,44	6,07	0,78
		Método Logarítmico	3,79	7,74	5,54	1,10
Condutividade (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)		Método Harmônico	0,60	1,78	1,39	0,23
		Método Logarítmico	0,49	1,85	1,04	0,18

Normalmente, a difusividade térmica dos solos está entre 1 e 10 x 10⁻⁷ m².s⁻¹. Os valores médios encontrados da difusividade térmica, nas duas localidades, situam-se dentro da faixa de valores obtidos por outros estudos (Horton et al., 1983; Antonino et al., 1987; Passerat de Silans et al., 1996; Verhoef, 2004; Rao et al., 2005).

Diante desses resultados, também, pode-se afirmar que o Latossolo Amarelo foi caracterizado por ter uma baixa difusividade térmica, pois apresentou uma defasagem muito grande e um forte amortecimento entre as ondas de temperatura nas camadas mais próximas da superfície.

Como os valores da condutividade térmica têm uma variabilidade similar aos valores da difusividade

térmica, visto que são calculados em função dela, tem-se, portanto, para a condutividade térmica, um comportamento gráfico com oscilações semelhantes, mas com amplitude menor (Figura 6).

O aumento da condutividade térmica com o teor de areia no solo é um resultado consistente. O Neossolo Regolítico, um solo que apresentou o maior percentual de areia e silte, mostrou maiores resultados para a condutividade térmica através dos dois métodos utilizados nesse estudo. A condutividade térmica dos solos é maior em cascalho e areia, intermediário no franco e menor na argila (Ekwue et al., 2006).

Nusier e Abu-Hamdeh (2003), trabalharam com dois tipos de solos, classificados como arenoso e franco. Utilizando o método de sonda única, a

condutividade térmica medida variou de 0,95-2,11 $W.m^{-1}.K^{-1}$ para o solo arenoso e de 0,49-0,76 $W.m^{-1}.K^{-1}$ para o solo franco. Utilizando o método de sonda dupla, a condutividade térmica medida variou de 0,98-2,17 $W.m^{-1}.K^{-1}$ para o solo arenoso e de 0,51-0,78

$W.m^{-1}.K^{-1}$ para o solo franco. Ou seja, esses autores verificaram que o solo arenoso apresentou valores mais elevados de condutividade térmica do que o solo franco, para todas as condições dos solos estudados.

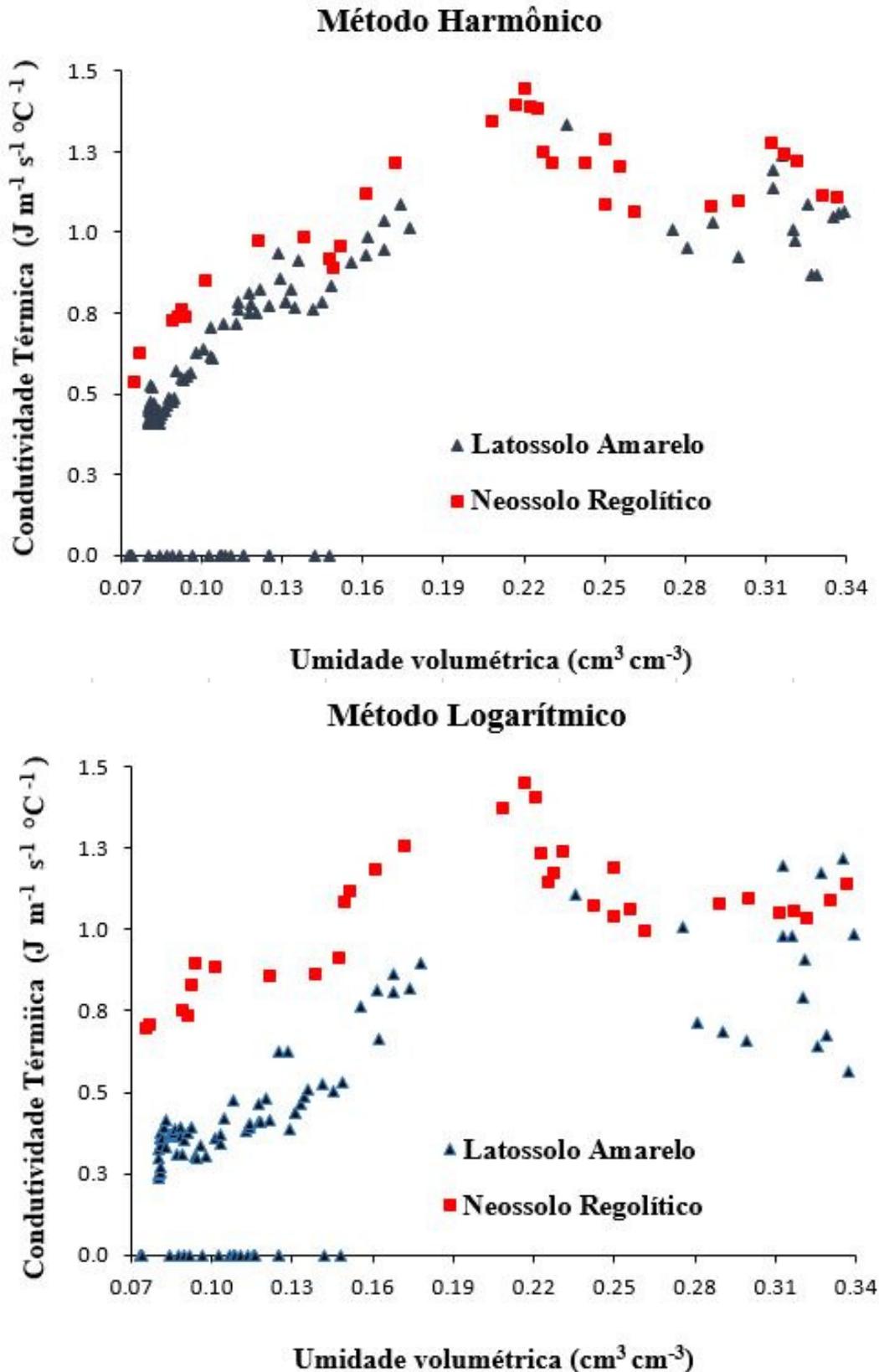


Figura 6. Condutividade térmica em função da umidade, determinada através da capacidade térmica e dos métodos harmônico e logarítmico, para o Latossolo Amarelo e o Neossolo Regolítico.

Ghuman e Lal (1985), para um solo argiloso, encontraram valores dentro da faixa de 0,15-0,79 $W.m^{-1}.K^{-1}$ e Van Wijk (1963), para um solo arenoso, encontrou valores que variaram de 0,50-2,25 $W.m^{-1}.K^{-1}$.

Conclusões

A capacidade térmica volumétrica pode ser facilmente determinada usando a equação de De Vries (1963) em solos do tipo Latossolo Amarelo e Neossolo Regolítico.

Os valores da difusividade térmica, fornecidos pelos diferentes métodos adotados, encontraram-se dentro da faixa estabelecida na literatura, mostrando a eficiência desses métodos.

Agradecimentos

Ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares (PROTEN) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). O segundo e terceiro autores agradecem ao CNPq pela Bolsa de Produtividade em Pesquisa e à Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia de Pernambuco (FACEPE), pelo apoio financeiro à pesquisa, respectivamente (Processos N° 307641/2013-9 e 1178-301/2010).

Referências

- Abuel-Naga, H.M., Bergado, D.T., Bouazza, A., Pender, M.J., 2009. Thermal conductivity of soft Bangkok clay from laboratory and field measurements. *Engineering Geology* v.105, p.211-219.
- Abu-Hamdeh, N.H., 2003. Thermal properties of soils as affected by density and water content. *Biosystems Engineering* v.86, p.97-102.
- Abu-Hamdeh, N.H., Khedair, A.I., Reeder, R.C., 2001. A comparison of two methods used to evaluate thermal conductivity for some soils. *International Journal of Heat and Mass Transfer* v.44, p.1073-1078.
- Alvalá, R.C.S., Arlino, P.R.A., Gielow, R., Manzi, A.O., Souza, A., 2002. Medidas das Propriedades Térmicas do solo no Pantanal Sul Mato Grossossense durante o período de transição seco-úmido de 2001-2002. in.: Congresso Brasileiro de Meteorologia. Anais do Congresso Brasileiro de Meteorologia. Foz de Iguaçu-PR.
- Alves, C.B., Biral, P.M., Carra, T.A., 2006. Difusividade Térmica de um Solo Incorporado com Resíduo de E.T.A. Sorocaba: Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho.
- Antonino, A.C.D., Lira, C.A.B.O., Dall'Olio, A., Audry, P., Pinto, A.X.M., 1997. Influência do Posicionamento de Sondas Térmicas na Determinação da Difusividade Térmica e do Fluxo de Calor no Solo em Condições de Campo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* v.21, p.165-72.
- Carslaw, H.S., Jaeger, J.C., 1959. *Conduction Heat in Solids*, 2 ed. Oxford Science Publications, Oxford.
- Conceição, M.J., Wohlenberg, E.V., Zimmermann, F.L., Carlesso, R., Reichert, J.M., 2000. Temperatura, Umidade do Solo e Emergência de Milho em Diferentes Sistemas de Manejo. in.: Reunião Brasileira de Manejo e Conservação do Solo e da Água, Ilhéus-BA.
- Coté, J., Konrad, J.M., 2005. A generalized thermal conductivity model for soils and construction materials. *Canadian Geotechnical Journal* v.42, p.443-458.
- De Vries, D.A., 1963. Thermal Properties of Soil, in: van Wijk, W.R. (Org.), *Physics of Plant Environment*. 1 ed. North Holland, Amsterdam, pp. 210-235.
- Ekwue, E.I., Stone, R.J., Bhagwat, D., 2006. Thermal Conductivity of Some Compacted Trinidadian Soils as affected by Peat Content. *Biosystems Engineering* v.94, p.461-469.
- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2006. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Rio de Janeiro.
- Flora, L.C.D., 2006. Influência da massa específica na difusividade térmica do solo em diferentes umidades. Dissertação (Mestrado). Ijuí, Unijuí.
- Forbes, J.D., 1849. Account of some experiments on the temperature of the Earth at different depths, and in different soils, near Edinburgh. *Transactions of Royal Society of Edinburgh* v.16, p.189-236.
- Franks, S.W., Beven, K.J., Quinn, P.F., Wright, I.R., 1997. On the sensitivity of soil-vegetation-atmosphere transfer (SVAT) schemes: equifinality and the problem of robust calibration. *Agricultural and Forest Meteorology* v.86, p.63-75.
- Fucks, M., 1986. Heat flux, in: Klute, A. *Method of soil analysis*, Part 1. 2 ed. ASA and SSSA, Madison, pp. 957-968.
- Furlani, C.E.A., Gamero, C.A., Levien, R., Silva, R.P., Cortez, J.W., 2008. Temperatura do solo em função do preparo do solo e do manejo da cobertura de inverno. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* v.32, p.375-380.
- Gondim, P.S.S., Lima, J.R.S., Antonino, A.C.D., Hammecker, C., Silva, R.A.B., Gomes, C.A., 2015. Environmental control on water vapor and energy exchanges over grasslands in semiarid region of Brazil. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* v.19, p.3-8.
- Hillel, D., 1998. *Environmental Soil Physics*. Academic Press, San Diego.
- Hillel, D., 2004. *Introduction to Environmental Soil Physics*. Elsevier Academic Press, Oxford.
- Hopmans, J.W., Simunek, J., Bristow, K.L., 2002. Indirect estimation of soil thermal properties and water flux using heat pulse probe measurements: Geometry and effects. *Water Resources Research* 38, 33-45.
- Horton, R., Wierenga, P.J., Nielsen, D.R., 1983. Evaluation of methods for determining apparent thermal diffusivity of soil near the surface. *Soil Science of America Journal* v.47, p.25-32.
- Jackson, R.D., Taylor, S.A., 1986. Thermal Conductivity and Diffusivity, in: Klute, A. (Org.), *Method of Soil Analysis, Part 1 Physical and Mineralogical Methods*. 2 ed. Soil Science Society of America, Madison. pp. 945-955.

- Knies, A.E., 2010. Temperatura e umidade de um solo franco arenoso cultivado com milho. Dissertação (Mestrado). Santa Maria, UFSM.
- Kustas, W.P., Prueger, J.H., Hatfield, J.L., Ramalingam, K., Hippias, L.E., 2000. Variability in soil heat flux from a mesquite dune. *Agricultural and Forest Meteorology* v.103, p.249-264.
- Laurent, J.P., 1989. Evaluation des paramètres thermiques d'un milieu poreux, optimization d'outils de mesure in-situ. *International Journal of Heat and Mass Transfer* v.32, p.1247-1259.
- Lima, J.R.S., Antonino, A.C.D., Lira, C.A.B.O., Souza, E.S., Silva, I.F., 2011. Balanço de energia e evapotranspiração de feijão caupi sob condições de sequeiro. *Revista Ciência Agronômica* v.42, p.65-74.
- Lima, J.R.S., Antonino, A.C.D., Soares, W.A., Borges, E., Silva, I.F., Lira, C.A.B.O., 2005. Balanço de energia em um solo cultivado com feijão caupi no brejo paraibano. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* v.9, p.527-534.
- Lima, J.R.S., Antonino, A.C.D., Souza, E.S., Lira, C.A.B.O., Silva, I.F., 2013. Seasonal and interannual variations of evapotranspiration, energy exchange, yield and water use efficiency of castor grown under rainfed conditions in northeastern Brazil. *Industrial Crops and Products* v.50, p.203-211.
- Midtømme, K., Roaldset, E., 1999. Thermal conductivity of sedimentary rocks: uncertainties in measurement and modeling. *Engineering Geology Special Publications* v.158, p.45-60.
- Midtømme, K.; Roaldset, E.; Aagaard, P., 1997. Thermal Conductivities of Argillaceous Sediments. *Engineering Geology Special Publications* v.12, p.355-363.
- Nkongolo, N.V., Johnson, S., Schmidt, K., Eivazi, F., 2010. Greenhouse gases fluxes and soil thermal properties in a pasture in central Missouri. *Journal of Environmental Science* v.22, p.1029-1039.
- Nusier, O.K., Abu-Hamdeh, N.H., 2003. Laboratory techniques to evaluate thermal conductivity for some soils. *International Journal of Heat and Mass Transfer* v.39, p.119-123.
- Oke, T.R., 1987. *Boundary Layer Climates*. 1 ed. Routledge, London.
- Passerat de Silans, A.M.B., Monteny, B.A., Lhomme, J.P., 1996. Apparent soil thermal diffusivity, a case study: HAPEX-Sahel experiment. *Agricultural and Forest Meteorology* v.81, p.201-216.
- Passerat de Silans, A.M.B., Monteny, B.A., Lhomme, J.P., 1996. Apparent soil thermal diffusivity, a case study: HAPEX - Sahel experiment. *Agricultural and Forest Meteorology* 81, 201-216.
- Passerat de Silans, A.M.B., Silva, F.M., Barbosa, F.A.R., 2006. Determinação in loco da Difusividade Térmica num Solo da Região de Caatinga (PB). *Revista Brasileira de Ciência do Solo* v.30, p.41-48.
- Poulovassilis, A., Kerkides, P., Alexandris, S., Rizos, S., 1998. A contribution to the study of the water and energy balances of an irrigated soil profile A. Heat flux estimates. *Soil and Tillage Research* v.45, p.189-198.
- Rao, T.V.R., Silva, B.B., Moreira, A.A., 2005. Características Térmicas do Solo em Salvador, BA. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* v.9, p.554-559.
- Reichardt, K., Timm, L.C., 2004. *Solo, Planta e Atmosfera: Conceitos, Processos e Aplicações*. 1 ed. Manole, Barueri.
- Seemann, J., 1979. Measuring Technology, in: Seemann, J., Chirkov, Y.I., Lomas, J., Primault, B. (Org.), *Agrometeorology*. 1 ed. Springer-Verlag, Berlin, pp. 40-45.
- Soares, W.A., 2009. Fluxos de Água e de Energia em Feijão Macassar e Mamona no Nordeste do Brasil. Tese (Doutorado). Recife, UFPE.
- Souza, L.S.B., Moura, M.S.B., Sedyama, G.C., Silva, T.G.F., 2015. Energy balance and evapotranspiration biophysical control in Caatinga under intense drought conditions. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* v.50, p.627-636.
- Tyagi, B., Satyanarayana, A.N.V., 2009. Modeling of soil surface temperature and heat flux during pre-monsoon season at two tropical stations. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* v.72, p.224-233.
- Van Wijk, W.R., 1963. *Physics of plant environment*. 1 ed. North-Holland, Amsterdam.
- Verhoef, A., 2004. Remote estimation of thermal inertia and soil heat flux for bare soil. *Agricultural and Forest Meteorology* v.123, p.221-236.
- Wierenga, P.J., Nielsen, D.R., Hagan, R.M., 1968. Thermal properties of soil based upon field and laboratory measurements. *Soil Science Society of America Journal* v.33, p.354-360.
- Yadav, M.R., Saxena, G.S., 1973. Effect of compaction and moisture content on specific heat and thermal capacity of soils. *Journal Indian Society of Soil Science* v.21, p.129-132.