

## AVALIAÇÃO DA DIFUSIVIDADE TÉRMICA DE UM SOLO NO NORTE DO PANTANAL

Victor Hugo de Moraes Danelichen, Marcelo Sacardi Biudes

PPG em Física Ambiental - UFMT; Cuiabá, MT  
e-mail: danelichen@fisica.ufmt.br

### Resumo

A dinâmica do comportamento térmico do solo condiciona diversos processos no sistema solo-planta-atmosfera. A difusividade térmica do solo é uma das propriedades térmicas do solo que variam em função das suas características físicas, variando temporalmente com o conteúdo de água no solo. Sendo assim, o objetivo deste trabalho foi a determinação da difusividade térmica em diferentes camadas de um solo com diferentes condições hídricas. O experimento foi conduzido em uma área de pastagem de *Brachiariahumidicola* localizada no município de Santo Antônio de Leverger, MT, considerado prolongamento natural do Pantanal. O solo local foi classificado como PLANOSSOLO HÁPLICO Eutróficogleissólico. A temperatura do solo foi medida a 1, 3, 7, 15 e 30 cm de profundidade e o conteúdo de água do solo foi medido entre as profundidades de 0 e 5 cm, 5 e 10 cm e 10 e 20 cm e 20 e 30 cm. A difusividade térmica do solo foi estimada entre as profundidades de 1 e 3 cm, 3 e 7 cm, 7 e 15 cm e 15 e 30 cm por meio dos métodos da amplitude, do arco tangente e do logarítmico. A amplitude da temperatura do solo, em média, diminuiu com a profundidade e variou significativamente no tempo, tendo como provável causa de variação o conteúdo de água no solo. Os

valores da difusividade térmica do solo estimados pelos três métodos foram diferentes significativamente entre si. Entretanto, as estimativas da difusividade térmica do solo pelos métodos do logaritmo e arco tangente apresentaram correlação significativa com as estimativas pelo método da amplitude, mas os valores foram superestimados entre as profundidades de 1 e 3 cm e 3 e 7 cm, e subestimados entre 7 e 15 cm e 15 e 30 cm.

**Palavras-chave:** temperatura do solo, propriedades térmicas do solo, conteúdo de água no solo.

## Abstract

The dynamics of soil thermal course affect various processes in the soil-plant-atmosphere system. The soil thermal diffusivity is one of the properties that vary due on their physical characteristics, varying temporally as function of the water content in the soil. Therefore, the objective of this study was to determine the soil thermal diffusivity in different layers of soil with different hydric conditions. The experiment was conducted in a *Brachiariahumidicola* pasture located in Santo Antonio de Leverger - MT, considered a natural extension of the Pantanal. The local soil was classified as PLANOSSOLO HÁPLICO Eutróficogleissólico. The soil temperature was measured at 1, 3, 7, 15 and 30 cm depth and soil water content was measured at layers 0 and 5 cm, 5 and 10 cm and 20 cm and 10 and 20 and 30 cm depths. The soil thermal diffusivity was estimated between 1 and 3 cm, 3 and 7 cm, 7 and 15 and 15 cm and 30 cm depths by the methods of the amplitude, arctangent and logarithmic. The soil temperature amplitude, on average, decreased with depth and varied significantly over time, with the probable cause of the variation in soil water content. The values of soil thermal diffusivity estimated by three methods were significantly different from each other. However, estimates of the soil thermal diffusivity by the methods of logarithm and arctangent significantly correlated with the estimates by the method of amplitude, but the values were overestimated between 1 and 3 cm and 3 and 7 cm depths, and underestimated between 7 and 15 cm and 15 and 30 cm depths.

**Keywords:** soil temperature, soil thermal properties, soil water content.

## 1. Introdução

A dinâmica da temperatura do solo é responsável por diversos processos na interação solo-planta-atmosfera. Ela é um dos principais condicionantes do solo à distribuição e ao processo de evaporação da água, ao desenvolvimento vegetal - como germinação de sementes, atividades radiculares e ocorrência de doenças em plantas - às reações químicas e disponibilidade de nutrientes (GASPARIM et al. 2005).

A variação da temperatura no tempo e em profundidade pode ser reconstruída, e até mesmo prevista sua mudança futura, por meio do conhecimento da dinâmica das propriedades térmicas do solo (NICOLSKY et al. 2009). Considerando que cada tipo possui características específicas, é necessária uma avaliação de cada situação em particular para que sejam identificadas suas propriedades térmicas. Tais propriedades são resultantes de um conjunto de fatores, incluindo-se sua textura, estrutura, massa específica, composição química e o conteúdo de água (RAO et al. 2005; BEBER, 2006).

A difusividade térmica é uma das suas propriedades térmicas que fornece informação sobre a velocidade de avanço da frente de aquecimento do solo, parâmetro que relaciona a capacidade de condução (condutividade térmica) ao armazenamento de calor (capacidade térmica volumétrica) (SCHOFFEL & MENDEZ, 2005). Ela indica a rapidez, em uma determinada profundidade, da mudança de temperatura quando o solo é exposto às variações de temperatura externas. Quanto maior é o valor da difusividade térmica, mais rápida será a difusão da energia térmica no material (BEBER, 2006).

A difusividade térmica pode ser determinada diretamente no campo por diversos métodos, como o da amplitude, fase, arco tangente, logarítmico, numérico e harmônico, que utilizam medidas de temperatura em transição (HORTON et al., 1983). Esses métodos são baseados em soluções analíticas ou numéricas da equação de condução de calor descritas para meios uniformes e homogêneos. No entanto, solos reais são verticalmente não uniformes, variando sua composição, textura e conteúdo de água com a profundidade (HORTON & REN, 2001).

Nesse sentido, este trabalho objetivou a determinação da difusividade térmica de diferentes camadas de um solo com diferentes condições hídricas.

## 2. Materiais e métodos

### 2.1 Descrição da área experimental

O estudo foi conduzido entre junho e outubro de 2009 em uma pastagem de *Brachiaria humidicola* com coordenadas geográficas 15°47'11''S de latitude e 56°04'47''O de longitude, com altitude de 95,1 m acima do nível do mar, localizada na Fazenda Experimental da Universidade Federal de Mato Grosso, no município de Santo Antônio de Leverger-MT. O clima local é classificado como Aw segundo Köppen.

O solo local é classificado como PLANOSSOLO HÁPLICO eutrófico leossólico, textura média/argilosa a moderado, fase cerrado (com plantas xerófilas) e relevo plano. A composição granulométrica do horizonte A apresenta 56,6% de areia, 21,7% de silte e 21,7% de argila e do horizonte B apresenta 29,9% de areia, 23,4% de silte e 46,7% de argila.

A temperatura do solo foi medida a 1, 3, 7, 15 e 30 cm de profundidade por meio de cinco termistores (108-L, Campbell Scientific, Inc., Logan, Utah, USA). As diferenças de potenciais produzidas pelos termistores foram coletadas a cada 10 segundos e armazenadas em médias de 30 minutos por um datalogger (CR 10X, Campbell Scientific, Inc., Logan, Utah, USA).

### 2.2 Estimativa da difusividade térmica do solo

A condução de calor unidimensional no solo é dada pela equação (1).

$$C\left(\frac{\partial T}{\partial t}\right) = \left(\frac{\partial}{\partial z}\right)\left(KC\left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)\right) \quad (1)$$

em que  $T$  é a temperatura do solo,  $t$  é o tempo e  $z$  a profundidade. Devido ao particionamento de um solo não uniforme em camadas de composição e textura uniformes, a equação (1) pode ser reescrita na equação (2).

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

em que  $K_j = (k/C)_j$  é a difusividade térmica aparente na camada  $j$ , delimitada por  $z_{j-1}$  e  $z_{j+1}$ , sendo  $j = 1, 2, \dots, m$ , o número de camadas, não necessariamente de espessuras iguais.

A difusividade térmica aparente pode ser obtida pelo uso de medidas de temperatura substituídas na expressão de soluções analíticas da equação (2). Diversos métodos foram definidos para solucionar esta equação (HORTON et al., 1983). Neste trabalho, a difusividade térmica do solo foi estimada entre as profundidades de 1 e 3 cm, 3 e 7 cm, 7 e 15 cm e 15 e 30 cm por meio dos métodos da amplitude, do arco tangente e do logarítmico.

### 2.2.1 Método da Amplitude

A difusividade térmica  $K$  durante o ciclo diário estimada pelo método da amplitude (HORTON et al., 1983) é demonstrada na equação (3).

$$K = \left( \frac{\omega}{2} \right) \left[ \frac{(Z_2 - Z_1)}{\ln \left( \frac{A_1}{A_2} \right)} \right]^2 \quad (3)$$

em que  $\omega$  é a velocidade angular da terra,  $A_1$  e  $A_2$  são as amplitudes nas profundidades  $Z_1$  e  $Z_2$ , respectivamente, e são obtidas a partir das temperaturas de cada uma das profundidades  $Z_1$  e  $Z_2$ .

### 2.2.2 Método do Arco Tangente

A temperatura do solo ao nível da superfície pode ser descrita por uma série de senos. Os valores da temperatura medida a uma profundidade específica podem ser ajustados à série de Fourier (DRAPPER & SMITH, 1966), dada pela equação (4).

$$T(t) = \bar{T} + \sum_{n=1}^M [A_n \cos(n\omega t) + B_n \sin(n\omega t)] \quad (4)$$

em que  $\bar{T}$  é o valor médio da temperatura no intervalo de tempo considerado,  $M$  é o número de harmônicos,  $A_n$  e  $B_n$  são as suas amplitudes,  $n$  é o número de observações,  $\omega$  é a frequência angular e  $t$  é o tempo. Se os dois primeiros harmônicos são suficientes para descrever uma condição de contorno superior ao nível de  $Z = Z_1$  ( $Z_1 = 0$ , a nível da superfície),  $K$  poderá ser calculado usando-se a equação (5) do método do arco tangente.

$$K = \frac{\omega(Z_2 - Z_1)^2}{2 \left[ \arctan \frac{(T_1 - T_3)(T'_2 - T'_4) - (T_2 - T_4)(T'_1 - T'_3)}{(T_1 - T_3)(T'_1 - T'_3) + (T_2 - T_4)(T'_2 - T'_4)} \right]^2} \quad (5)$$

em que  $T_1, T_2, T_3$  e  $T_4$  são as temperaturas registradas na profundidade  $Z_1$  e  $T'_1, T'_2, T'_3$  e  $T'_4$  são as temperaturas registradas na profundidade  $Z_2$ , às 0, 6, 12 e 18 horas (NERPIN & CHUDNOVSKII, 1967).

### 2.2.3 Método Logarítmico

Usando a mesma metodologia do método do arco tangente, Seemann (1979) demonstrou que  $K$  também pode ser calculado pela equação (6).

$$K = \left[ \frac{0,121(Z_2 - Z_1)}{\ln \left\{ \frac{(T_1 - T_3)^2 + (T_2 - T_4)^2}{(T'_1 - T'_3) + (T'_2 - T'_4)^2} \right\}} \right]^2 \quad (6)$$

Os métodos Arco Tangente e Logarítmico são análogos aos métodos da Amplitude, mas necessitam de um número maior de observações para aproximar o comportamento essencialmente não-senoidal (RAO et al. 2005).

## 2.3 Determinação do conteúdo de água no solo

O conteúdo de água no solo foi determinado inicialmente utilizando amostras indeformadas de solo, quando também se determinou a densidade aparente do solo. Posteriormente, o conteúdo de água no solo foi determinado quinzenalmente por meio de amostras deformadas de solo representativas das profundidades 0 a 5 cm, 5 a 10 cm e 10 a 20 cm e 20 a 30 cm, as quais foram levadas à estufa de secagem a 105°C por 24 horas. O conteúdo de água no solo ( $m^3 m^{-3}$ ) foi determinado pelo produto entre a umidade do solo (massa de água por massa de solo) e a sua densidade aparente (massa de solo por unidade de volume), determinada na mesma profundidade.

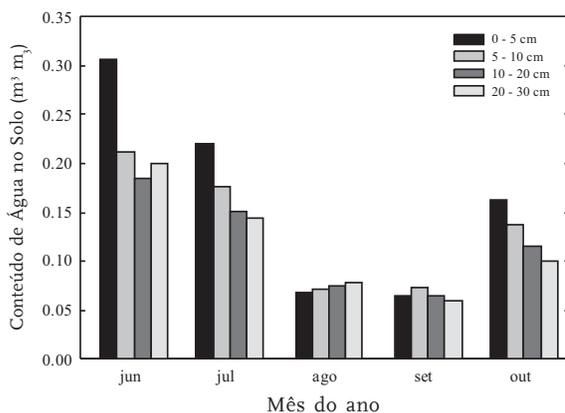
## 2.4 Análises estatísticas

A existência de diferenças entre as amplitudes médias da temperatura do solo e das estimativas da difusividade térmica do solo pelos três métodos em cada profundidade foi conhecida usando o teste ANOVA de medidas repetidas e, para a verificação de quais médias foram diferentes, foi utilizado o teste de Tukey, ambos a 5% de probabilidade.

As relações entre os valores da difusividade térmica do solo, estimados pelos métodos da Amplitude e do Logaritmo e da Amplitude e do Arco Tangente em cada profundidade, foram determinadas por meio de regressões lineares, forçando-as a passar pela origem.

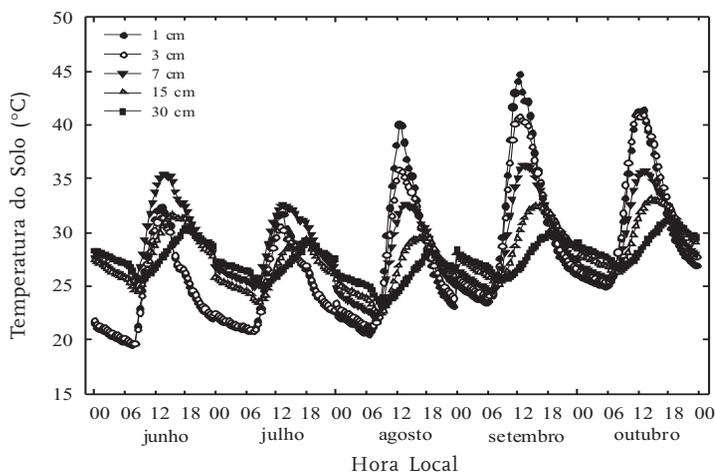
## 3. Resultados e discussão

O conteúdo de água no solo diminuiu entre junho e agosto e aumentou de setembro a outubro (Figura 1). A diminuição e elevação do conteúdo de água no solo estão relacionadas com o período de secagem e de umedecimento do solo, respectivamente, em função da precipitação local. Utilizando uma série histórica da precipitação entre 1912 e 2006 do município de Santo Antônio de Leverger, DINIZ et al. (2008) obtiveram que, em média, os meses de junho, julho, agosto e setembro representam 1, 0,5, 1 e 3% do total da precipitação anual, e o mês de outubro caracteriza o início do período chuvoso.



**Figura 1.** Conteúdo de água no solo entre as profundidades de 0 a 5 cm, 5 a 10 m, 10 a 20 cm e 20 a 30 cm em uma área de pastagem, entre junho e outubro de 2009.

Em média, a temperatura do solo medida a 1 e 3 cm apresentaram valores máximos inferiores à medida a 7 cm em junho e julho e, em outubro, os valores máximos da temperatura medida a 1 e 3 cm foram os mesmos (Figura 2). Esse comportamento, provavelmente foi devido ao maior conteúdo de água no solo entre as profundidades de 0 a 5 cm (Figura 1). O maior conteúdo de água na superfície do solo protege-o contra aquecimento excessivo, pois modifica o microclima local em função da alteração do balanço de energia do local. O balanço de radiação é alterado pelo aumento do coeficiente de reflexão, o que causa redução da evaporação e amortecimento das oscilações de temperatura (PEZZOPANE et al., 1996). Com conteúdos de água no solo semelhantes em todas as camadas (Figura 1), os máximos da temperatura do solo e o atraso de suas ocorrências diminuiriam com a profundidade (Figura 2).



**Figura 2.** Média horária mensal da temperatura do solo medida a 1, 3, 7, 15 e 30 cm de profundidade em uma área de pastagem, entre junho e outubro de 2009.

As médias mensais da amplitude da temperatura do solo diminuiram com a profundidade (Tabela 1). As maiores médias mensais da amplitude da temperatura do solo a 1 e 3 cm foram observadas de agosto a outubro (Tabela 1), relacionando com o menor conteúdo de água no solo durante esse período (Figura 1).

**Tabela 1. Média das amplitudes (Amp.) mensais da temperatura do solo (°C) ± desvio padrão nas profundidades de 1, 3, 7, 15 e 30 cm em uma área de pastagem, entre junho e outubro de 2009.**

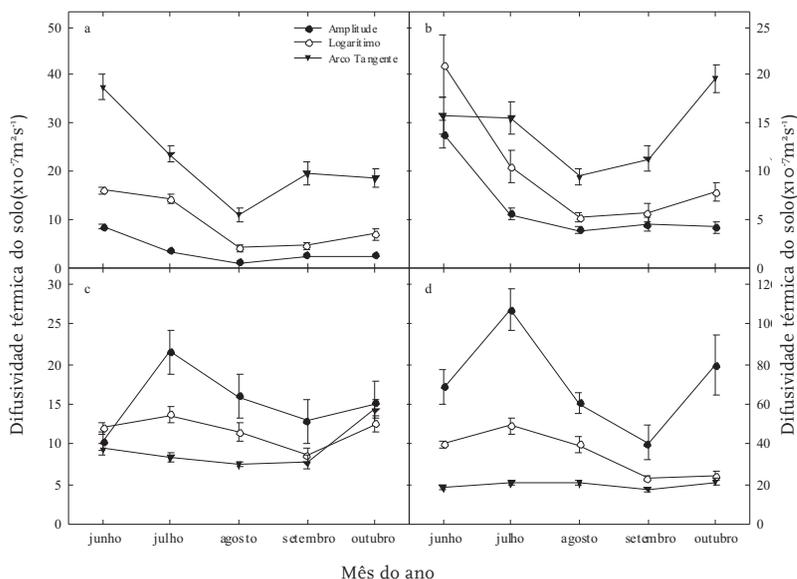
Meses	Amp. (1 cm)	Amp. (3 cm)	Amp. (7 cm)	Amp. (15 cm)	Amp. (30 cm)
Junho	8,16±0,77ffi	7,15±0,56ffi	5,92±0,32ffi	3,60±0,18ffi	2,44±0,13ffi
Julho	7,32±0,71ffi	6,07±0,52ffi	4,42±0,30b	3,06±0,17b	2,31±0,13ffi
Agosto	13,42±0,69b	9,24±0,50b	6,01±0,29ffi	3,88±0,16b	2,61±0,12
Setembro	14,55±0,82b	11,16±0,59b	7,14±0,34ffi	4,27±0,19b	2,50±0,14ffi
Outubro	13,36±0,90b	10,37±0,65b	6,91±0,38ffi	4,52±0,21b	2,87±0,16ffi

\* Os índices de mesma letra indicam que não houve diferença significativa ( $p < 0,001$ ) das amplitudes entre os meses.

As médias mensais da amplitude da temperatura do solo a 30 cm não variaram com o tempo. Entretanto, durante um período de dez anos no campus da Universidade do Amazonas, na cidade de Manaus (AM), ARAÚJO (1999) demonstrou que variações diurnas da temperatura não são desprezíveis a 1,0 m de profundidade e que as variações térmicas sazonais atingem profundidades superiores a 100 m. Tais variações são diretamente influenciadas pelo grau de cobertura vegetal e pelo regime hídrico.

As difusividades térmicas do solo calculadas pelos métodos da Amplitude do Logaritmo e do Arco Tangente diferiram entre si ( $p < 0,05$ ) e variaram ao longo do tempo ( $p < 0,05$ ) (Figura 3). Os valores da difusividade térmica do solo estiveram na mesma ordem de grandeza, entre 5,9 a 80,7  $10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ , de estimativas pelo método da amplitude em Campina Grande – PB (OLIVEIRA et al., 2010), entre 1,45 a 6,74  $10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  em área de floresta e pastagem na Amazônia (SOUZA et al., 2006) e entre 4,7 a 7,5  $10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  em Salvador (RAO et al., 2005).

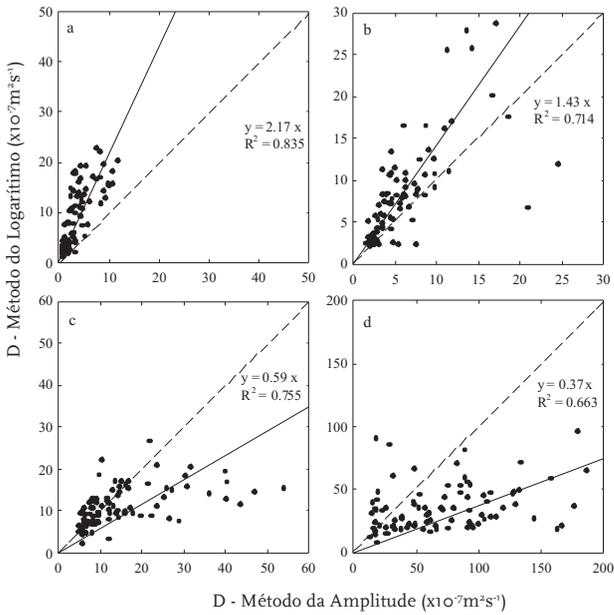
De um modo geral, as difusividades térmicas do solo foram influenciadas pela umidade do solo, decrescendo de junho a setembro e aumentando em outubro (Figura 3). Esses resultados estão de acordo com o trabalho de SILANS et al. (2006), os quais descreveram a variação da difusividade térmica do solo em função de uma equação polinomial de terceira ordem, encontrando bom nível de ajuste, evidenciado pelo baixo erro quadrado médio (EQM).



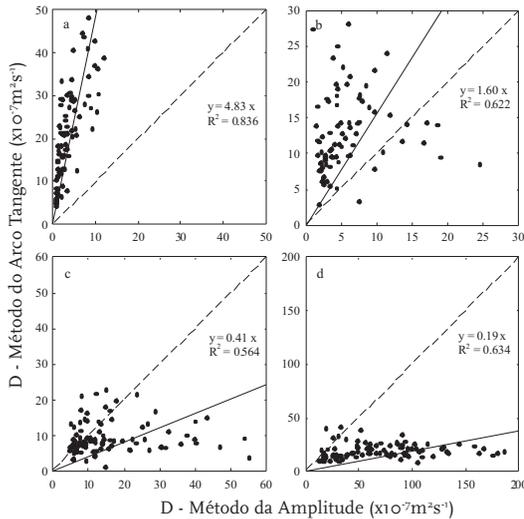
**Figura 3.** Difusividade térmica mensal do solo estimada pelos métodos da Amplitude, do Logarítmico e do Arco Tangente entre as profundidades de 1 a 3 cm (a), 3 a 7 cm (b), 7 a 15 cm (c) e 15 a 30 cm (d).

Mesmo que as estimativas da difusividade térmica do solo pelos três métodos sejam significativamente diferentes entre si, as estimativas pelo método da Amplitude apresentaram correlação significativa com as obtidas pelos métodos do Logaritmo e Arco Tangente (Figuras 4 e 5). Todas as regressões realizadas foram significativas e satisfizeram à condição de normalidade e distribuição aleatória dos resíduos.

Tendo como referência o método da Amplitude, os métodos do Logaritmo (Figura 4) e do Arco Tangente (Figura 5) superestimaram entre 1,43 e 4,83 vezes os valores de difusividade térmica do solo entre as profundidades de 1 a 3 cm e 3 a 7 cm, e subestimaram entre 41 a 81% entre as profundidades de 7 a 15 cm e 15 a 30 cm.



**Figura 4.** Relação entre as estimativas da difusividade térmica obtidas pelos métodos da Amplitude e do Logaritmo entre as profundidades de 1 a 3 cm (a), 3 a 7 cm (b), 7 a 15 cm (c) e 15 a 30 cm (d). Nota: a linha contínua é a da regressão e a pontilhada indica a relação 1:1.



**Figura 5.** Relação entre as estimativas da difusividade térmica obtidas pelos métodos da Amplitude e do Arco Tangente entre as profundidades de 1 a 3 cm (a), 3 a 7 cm (b), 7 a 15 cm (c) e 15 a 30 cm (d). Nota: a linha contínua é a da regressão e a pontilhada indica a relação 1:1.

#### 4. Conclusão

Os valores da difusividade térmica do solo estimados pelos três métodos foram diferentes significativamente e variaram ao longo de todo o período de estudo em função da variação da umidade do solo. Mesmo assim, as estimativas da difusividade térmica do solo pelos métodos do Logaritmo e Arco Tangente apresentaram correlação significativa com as estimativas pelo método da Amplitude, superestimando as profundidades entre 1 a 3 cm e 3 a 7 cm, e subestimando entre 7 a 15 cm e 15 a 30 cm.

Apesar de os valores da difusividade térmica do solo obtidos neste trabalho estarem na mesma ordem de grandeza a obtidos em outros estudos, a diferença entre as estimativas pelos diferentes métodos evidencia a necessidade de mais estudos sobre o real valor da difusividade térmica do solo e sua relação com o conteúdo de água no solo.

#### 5. Referências

ARAÚJO, R.L.C. **A contribuição da geotermia rasa aos estudos ambientais**. Manaus: Editora da Universidade do Amazonas, 1999. 88p.

BEBER, C.C.L. **Determinação da difusividade térmica de solos do tipo latossolo vermelho em função do teor de umidade**. Dissertação de Mestrado, UERNERS, DeFEM. Ijuí, RS – Brasil. 2006.

DINIZ, G.L.; FONSECA, M.; CAMPELO JUNIOR, J.H. Análise harmônica do regime de precipitação em duas localidades da baixada cuiabana. **Biomatemática**, v.18, p.37-48, 2008.

DRAPER, N.R.; SMITH, H. **Applied regression analysis**. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1966. 407p.

GAO.Z.; WANG, L.; HORTON, R. Comparison of six algorithms to determine the soil thermal diffusivity at a site in the Loess Plateau of China. **Journal Hydrology and Earth System Sciences**, v.6, p.2247–2274, 2009.

GASPARIM, E.; RICIERI, P.R.; LIMA, S.S.; DALLACORT, R.;

GNOATTO, E. Temperatura no perfil do solo utilizando duas densidades de cobertura e solo nu. **ActaScientiarum.Agronomy**, v.27, n.1, p.107-115, 2005.

HORTON, R.; TYSON, E.O.; REN, T.A New Perspective on Soil Thermal Properties.**Soil Science Society of American Journal**, v.65, p.1641-1647, 2001.

HORTON, R.; WIERENGA, P.J.; NIELSEN, D.R. Evaluation of methods for determining apparent thermal diffusivity of soils near the surface.**Soil Science Society of American Journal**,v.47, p.25-32, 1983.

LETTAU, H.Improved models of thermal diffusion in the soil. **Transitional American Geophysics Union**, v.35, p.121-132, 1954.

NERPIN, S.V.; CHUDNOVSKII, F. **Physics of the soil**. Jerusalem: Keter Press. 1967. 466p.

NICOLSKY, D.J.; ROMANOVSKY, V.E.; PANTELLEV, G.G. Estimation of soil thermal properties using in-situ temperature measurements in the active layer and permafrost.**Cold Regions Science and Technology**, v.55, p.120-129, 2009.

OLIVEIRA, S.S.; FIDELES FILHO, J.; OLIVEIRA, S.V.; ARAÚJO, T.S. Difusividade térmica do solo de Campina Grande para dois períodos do ano. **Revista de Geografia**, v.27, n.2, 2010.

PEZZOPANE, J.E.M.; CUNHA, G.M.; ARNSHOLZ, E.; COSTALONGA, M. Temperatura do solo em função da cobertura morta por palha de café. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.4, n.2, p.7-10, 1996.

RAO, T.V.R.; SILVA, B.B.; MOREIRA, A.A. Características térmicas do solo em Salvador, BA. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.9, n.4, p.554-559, 2005.

SCHÖFFEL, E.R.; MENDES, M.E.G. **Influência da cobertura sobre o perfil vertical de temperatura do solo**. XIV Congresso Brasileiro de Agrometeorologia – Piracicaba. São Paulo, 2005.

SEEMANN, J. Measuring technology.In: SEEMANN, J.; CHIRKOV, Y.I.; LOMAS, J.; PRIMAULT, B. (eds) **Agrometeorology**. Berlin:

Springer-Verlag, p.40-45, 1979.

SILANS, A.P.; SILVA, F.M.; BARBOSA, F.A.R. Determinação *in loco* da difusividade térmica num solo da região de caatinga (PB), **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.30, p.41-48, 2006.

SOUZA, J.R.S.; MAKINO, M.; ARAÚJO, R.L.C.; COHEN, J.C.P.; PINHEIRO, F.M.A. Thermal properties and heat fluxes in soils under forest and pasture, in Marabá, PA, Brazil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.21, n.3a, p.89-103, 2006.

Submetido em: 26/06/2011

Aceito em: 05/10/2011

Revisão do *Abstract*: CCAA-Sul (Santa Maria, RS)