



Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: www.ufpe.br/rbgfe



Estimativas da Difusividade Térmica e do Fluxo de Calor de um Solo no Agreste Pernambucano

Diogo Botelho Correa de Oliveira¹, Nelson Aquino de Albuquerque Neto² e Willames de Albuquerque Soares³

¹Graduando em Engenharia Civil pela Escola Politécnica de Pernambuco – UPE. Autor correspondente: e-mail: diogo_botelho12@hotmail.com

²Graduando em Engenharia de Telecomunicações pela Escola Politécnica de Pernambuco – UPE. E-mail: nelsonneto2311@hotmail.com

³Prof. Adjunto da Escola Politécnica de Pernambuco – UPE. E-mail: was@poli.br

Artigo recebido em 29/03/2015 e aceite em 28/12/2015

RESUMO

Conhecer as características térmicas do solo é de fundamental importância para entendimento de seus processos físicos. Este trabalho objetivou estimar o fluxo de calor do solo através da lei de Fourier para o transporte de calor e a difusividade térmica do solo utilizando seis métodos (fase, amplitude, logaritmo, condução-convecção, arco tangente e diferenças finitas) em um solo do agreste Pernambucano. Para isto, foram medidas temperaturas nas profundidades de 0,02; 0,08; 0,10; 0,20; 0,30; 0,40; 0,50 m por meio de termopares ao longo dos primeiros dez dias do ano. A eficácia dos métodos foi comprovada por meio de simulações do perfil de temperatura do solo onde os algoritmos arco tangente e condução-convecção apresentaram os melhores resultados e parâmetros estatísticos, enquanto o método das diferenças finitas destoou dos demais. Estimativas do fluxo de calor foram realizadas a partir das condições de fronteira dos dados medidos. Os melhores resultados ocorreram nas camadas superficiais, enquanto que os valores estimados não apresentaram resultados satisfatórios nas camadas mais profundas.

Palavras-chave: temperatura do solo, capacidade térmica do solo, condutividade térmica no solo.

Estimates of Thermal Diffusivity and Heat Flow of a Soil in Agreste Pernambucano

ABSTRACT

Knowing the thermal characteristics of the soil is of fundamental importance for understanding their physical processes. This study aimed to determine soil heat flux through the Fourier's law for the transport of heat and thermal diffusivity of the soil using six methods (phase, amplitude logarithm conduction-convection, and finite differences arctangent) in a soil wild Pernambucano. For this, temperatures were measured at depths of 0.02; 0.08; 0.10; 0.20; 0.30; 0.40; 0.50 m by means of thermocouples during the first ten days of the year. The effectiveness of the methods has been proven through the soil temperature profile simulations where the algorithms arc tangent and driving-convection showed the best results and statistical parameters, while the finite difference method disagreed when compared the other. Heat flux estimates were made from the boundary conditions of the measured data. The best results observed in the surface layers, while the estimated values did not show satisfactory results in deeper layers.

Keywords: soil temperature, soil heat capacity, thermal conductivity in the soil.

Introdução

A temperatura é um fator de fundamental importância para o entendimento dos processos termodinâmicos e físicos que ocorrem no solo. Estes são de grande interesse, principalmente para a agricultura, visto que, aquela tem grande influência no desenvolvimento das plantas; transferências de água, gases e solutos; na intensidade das reações químicas; nos processos

biológicos; nas taxas de aeração e evaporação de água do solo, Gasparim et al., 2005.

Considerando que cada tipo de solo apresenta 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. Observações regulares de sua temperatura em diferentes profundidades possibilitam o

conhecimento do seu comportamento térmico e a extração de importantes propriedades, tais como a difusividade térmica (Bellaver, 2009).

Neste contexto, percebe-se que o comportamento termodinâmico da vegetação e do solo apresenta grande importância. A difusividade térmica do solo reflete a capacidade em transportar o calor para suas camadas mais distantes da superfície. A uma difusividade baixa, por exemplo, podem-se associar uma temperatura máxima alta na superfície e pequena profundidade de penetração do calor.

A difusividade térmica do solo varia com o tempo e espaço. Ela depende, dentre outros fatores, da constituição, granulometria, densidade e estrutura do solo, propriedades estas que, na escala de tempo do experimento ou dos processos hidrológicos, não variam com o tempo, mas podem variar com a profundidade, e da umidade volumétrica do solo que varia rapidamente com o tempo, sobretudo nas camadas superficiais. Diversos métodos foram publicados na literatura para determinar *in loco* a difusividade térmica do solo (Passerat et al., 2006).

A difusividade térmica aparente pode ser determinada sob condições de campo pela variação da temperatura do solo a certas profundidades (Horton et al., 1983). Esses métodos são muito atrativos uma vez que apenas medidas de temperaturas são necessárias. Entretanto, eles são limitados para camadas uniformes de solo. Os valores de difusividade térmica aparente também podem ser determinados pela razão entre a condutividade térmica e a capacidade térmica volumétrica (Soares et al., 2014).

O fluxo de calor no solo é um dos importantes componentes do balanço de energia na superfície. Ele pode ser medido diretamente utilizando sensores de fluxo de calor. Entretanto este sensor deve ser instalado a certa profundidade do solo, e ainda assim também deve ser medida a temperatura nesta mesma profundidade para que

se possa calcular o calor armazenado nesta profundidade.

Além disso, a necessidade de instalação de sensores de fluxo e sensores de temperatura do solo em diversas profundidades, pelos métodos convencionais, faz com que os projetos e experimentos de monitoramento para grandes áreas sejam inviabilizados, especialmente pelo custo dos vários sensores envolvidos. Supondo que a temperatura da superfície varie senoidalmente, então se tem uma solução analítica para a equação de difusão de calor unidimensional para cálculo do fluxo de calor no solo é a partir de medidas de temperatura do solo em uma única camada (Santos et al., 2013).

O objetivo deste trabalho é analisar a difusividade térmica a partir de seis algoritmos (Amplitude, Arco tangente, Condução-convecção, Diferenças finitas, Fase e Logaritmo) e com estes resultados, estimar as temperaturas neste mesmo solo partindo das condições de contorno para comprovar a eficácia dos algoritmos e determinar o fluxo de calor através da lei de Fourier para o transporte de calor para os valores medidos e os estimados através de cada método, analisando a correspondência entre os resultados obtidos para estes parâmetros da difusividade e do fluxo de calor do solo.

Material e métodos

Os dados utilizados no estudo foram obtidos no ano de 2011 em uma área localizada no município de São João, a 220 km de Recife, que faz parte da microrregião de Garanhuns, no Agreste Meridional Pernambucano. O local possui as seguintes coordenadas geográficas: ao Sul, Latitude - 08° 52' 32" e ao Oeste, Longitude -36° 22' 00", com altitude de 716 m. Apresenta as seguintes características climáticas: precipitação pluviométrica média anual 579,1 mm, temperatura média anual em torno de 21°C, clima do tipo tropical chuvoso com verão seco (Rodrigues, 2003 e Beltrão et al., 2005).



Figura 1. Localização do município de São João, na Região Agreste do estado de Pernambuco.

A temperatura no solo foi medida nas profundidades de 0,02; 0,08; 0,10; 0,20; 0,30; 0,40; 0,50 m e os dados coletados compreendem ao período dos dias 01/01/2011 até 10/01/2011.

As medidas foram realizadas por meio de termopares (108-L, *Campbell Scientific, Inc.*, Logan, Utah, USA). Sendo que estas foram coletadas em uma frequência de minuto em minuto e armazenadas numa frequência de 30 minutos pelo datalogger (CR 10x, *Campbell Scientific, Inc.*, Logan, Utah, USA) Para minimizar o erro gerado por fatores naturais que interferem na aferição correta dos valores.

O processo de calibração do termopar consistiu em medições da força eletromotriz gerada pelos metais distintos, para diversos valores conhecidos de temperatura que já estão previamente tabelados pelo fabricante.

Teoria

Sendo K o coeficiente de difusividade térmica, μ a condutividade térmica, ρ a massa específica, c_p o calor específico e ainda T a temperatura, t o tempo e z a profundidade e considerando que as camadas estudadas são homogêneas e possuem sua densidade, umidade, composição, granulometria e estrutura constantes. Assim, a equação (1), Silans et al., 2006, pode representar a condução do calor para este solo estudado.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = K \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (1)$$

Nesta equação, o K não varia com o tempo nem com a profundidade, e pode ser determinada por diversas metodologias, Akai, 1994. Na Tabela 1, apresentamos seis metodologias para a sua determinação e que serão analisadas neste estudo.

As metodologias observadas na Tabela 1, utilizadas para a determinação teórica da difusividade térmica aparente, também foram utilizadas por Rao (2005) e por Soares (2013), descritas a seguir:

a) No algoritmo Amplitude α é a velocidade angular de rotação da terra, z_1 e z_2 são profundidades distintas e A é a amplitude de oscilação. A temperatura da superfície do solo pode ser representada por um senóide, descrito em:

$$T(0, t) = \bar{T} + A \text{sen}(\alpha t + \beta) \quad (2)$$

T é a temperatura, \bar{T} é a temperatura média, α é a velocidade angular de rotação da terra, t é o tempo e β é a fase da função senóide.

b) O método fase utiliza os picos e vales de duas profundidades distintas (z_1 e z_2) e os intervalos de tempo entre estas profundidades para ocorrência dos extremos das temperaturas.

c) O método proposto estima o transporte de calor do solo através da condução e da convecção, utilizando a amplitude A referente ao z (profundidade), β a fase referente e \bar{T} a temperatura média de cada profundidade.

d) Considerando que a temperatura do solo em sua superfície pode ser representada por uma série de *Fourrier*, o algoritmo Arco Tangente considera-a com duas harmônicas e assim determinando a difusividade térmica através de 4 temperaturas

distintas, para cada profundidade, igualmente intervaladas em um período de 6h.

e) Assumindo as mesmas condições do item anterior, o método logaritmo estima a difusividade através de duas profundidades, com 4 temperaturas distintas cada.

Tabela 1. Metodologias para a determinação da difusividade térmica do solo

Método	Equação
a) Amplitude	$K = \frac{\alpha(z_2 - z_1)^2}{2 \left[\ln \left(\frac{A(z_1)}{A(z_2)} \right) \right]^2}$
b) Fase	$K = \frac{1}{2\alpha} \left(\frac{z_2 - z_1}{t_2 - t_1} \right)^2$
c) Condução- Convecção	$K = \frac{(z_1 - z_2)^2 \alpha \ln \left(\frac{A_1}{A_2} \right)}{(\beta_1 - \beta_2) \left[(\beta_1 - \beta_2)^2 + \ln^2 \left(\frac{A_1}{A_2} \right) \right]}$
d) Arco Tangente	$K = \frac{\alpha(z_1 - z_2)^2}{2 \left\{ \text{Arctg} \left[\frac{(T_1 - T_3)(T_2' - T_4') - (T_2 - T_4)(T_1' - T_3')}{(T_1 - T_3)(T_1' - T_3') + (T_2 - T_4)(T_2' - T_4')} \right] \right\}^2}$
e) Logaritmo	$K = \left[\frac{0,0121(z_1 - z_2)}{\ln \left[\frac{(T_1 - T_3)^2 + (T_2 - T_4)^2}{(T_1' - T_3')^2 + (T_2' - T_4')^2} \right]} \right]^2$
f) Diferenças Finitas	$K = \frac{\left(\frac{T_{j+1}^i - T_{j-1}^i}{\Delta t} \right)}{\frac{T_j^{i-1} - 2T_j^i + T_j^{i+1}}{\Delta z^2}}$

f) O método numérico das diferenças finitas estima a difusividade térmica a partir de temperaturas distintas em relação à profundidade e ao tempo, que são representados pelos índices *j* e *i* respectivamente. A estabilidade deste método é garantida por Richtmeyer e Morton, 1967:

$$\frac{K\Delta t}{(\Delta z)^2} < \frac{1}{2} \tag{3}$$

O fluxo de calor (*G*) é estimado a partir da equação (Santos et al., 2013):

$$G = -\mu \frac{\partial T}{\partial z} \tag{4}$$

De acordo com Gnatowski (2009) a capacidade térmica μ ($Jm^{-3}C^{-1}$) é expressa por:

$$\mu = \mu_m \varepsilon + \mu_w \varepsilon_w \theta \tag{5}$$

Em que μ_m é o calor específico de material orgânico igual a 1,7 ($Jg^{-1}C^{-1}$); ε é a densidade do solo (gcm^{-3}); μ_w é o calor específico da água ($Jg^{-1}C^{-1}$); ε_w é a densidade da água (gcm^{-3}) e

θ é a umidade do solo, está também foi utilizada por Wang et al., 2010.

Parâmetros Estatísticos

Para avaliar a concordância entre os valores calculados e os observados, foram avaliados diferentes critérios estatísticos: i) O Erro quadrático Médio (EQM), que indica o grau de desvio entre as determinações experimentais e os valores calculados pelo modelo teórico correspondente. É expresso em porcentagem, e tende para zero quando os valores estimados e teóricos tendem a ser iguais. Este teste fornece informações de fácil entendimento no desempenho dos modelos, além de permitir uma comparação termo a termo do desvio real entre o valor calculado e o valor medido; ii) A razão dos desvios (RD) que descreve a razão entre o espalhamento das determinações experimentais e o espalhamento dos valores calculados pelo modelo teórico correspondente, tendendo para 1

(um) quando os valores estimados, e aqueles do modelo teórico são consistentes; iii) A eficiência da modelagem (EM) que indica se o modelo teórico fornece uma estimativa melhor das determinações experimentais que o valor médio dessas determinações, tendendo para 1(um).

$$EQM = \left[\frac{\sum_{i=0}^N (T_i - M_i)^2}{N} \right] * \frac{100}{\bar{M}} \quad (6)$$

$$RD = \frac{\sum_{i=0}^N (M_i - \bar{M})^2}{\sum_{i=0}^N (T_i - \bar{M})^2} \quad (7)$$

$$EM = \frac{\sum_{i=0}^N (M_i - \bar{M})^2 - \sum_{i=0}^N (T_i - M_i)^2}{\sum_{i=0}^N (M_i - \bar{M})^2} \quad (8)$$

Sendo T_i os valores calculados pelo modelo, M_i os valores experimentais e \bar{M} média dos valores experimentais, e N o número de determinações (Antonino et al., 2004).

Resultados e discussão

Os valores médios da umidade, densidade e capacidade térmica do solo medidos nas camadas do solo estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Valores dos parâmetros do solo utilizados: Umidade, Densidade e Capacidade Térmicas médias para as camadas do solo dentro do período estudado.

Parâmetros do solo	Valores
Umidade Média do Solo (gcm ⁻³)	0,75
Capacidade Térmica (Jm ⁻³ °C ⁻¹)	2,49
Densidade Média do Solo (gcm ⁻³)	1,28

Como observado na Tabela 2, os valores da umidade, da densidade e da capacidade térmica médias do solo são apresentados como característicos para a região estudada do agreste Pernambucano (Santos, 2011).

Os valores médios das difusividades estimadas podem ser vistos na Tabela 3. Os métodos apresentaram valores próximos aos obtidos por Soares et al. (2014), convergindo para

um valor de difusividade em ordem de grandeza de 10⁻⁷. Apesar de serem menores em seus valores máximos, resultando em uma média numericamente inferior, considerando ainda que os solos têm características semelhantes, tais como densidade, para as estratificações mais superficiais do solo.

Tabela 3. Valores obtidos para coeficiente de difusividade para os métodos Condução-Convecção, Amplitude, Fase, Arco-Tangente, Logaritmo e Diferenças Finitas, onde \bar{K} é a difusividade média.

Método	\bar{K} (m ² s ⁻¹)
Condução-Convecção	6,98E-07
Amplitude	2,43E-07
Fase	4,73E-07
Arco-tangente	8,59E-07
Logaritmo	4,05E-07
Diferenças finitas	2,06E-07

Os valores tendem a convergir a resultados semelhantes, onde o método arco-tangente foi

numericamente a maior medida e os amplitude e fase resultaram nos menores valores.

Tabela 4. Parâmetros estatísticos (EQM, RD, EM) obtidos pela comparação entre os valores medidos e estimados das temperaturas no solo na profundidade de a) 8 cm e b) 40 cm.

a)Parâmetros Estatísticos	Condução-Convecção	Amplitude	Fase	Arco-Tangente	Logaritmo	Diferenças Finitas
EQM (%)	2,246	2,244	2,060	2,428	2,068	2,698
RD	0,543	0,757	0,627	0,506	0,667	0,888
EM	0,795	0,795	0,827	0,761	0,826	0,700

b)Parâmetros Estatísticos	Condução-Convecção	Amplitude	Fase	Arco-Tangente	Logaritmo	Diferenças Finitas
EQM (%)	11,246	37,993	23,600	3,998	28,068	42,879
RD	0,446	0,177	0,227	0,556	0,321	0,170
EM	0,445	0,153	0,291	0,662	0,254	0,120

Em relação às análises estatísticas para a profundidade de 8 cm calculadas na Tabela 4a entre os valores estimados pelos métodos medidos, no parâmetro da EQM, todos os métodos apresentaram percentuais menores que 2,7%, sendo que a fase e logaritmo obtiveram uma porcentagem muito próxima a 2%, mostrando-se mais eficientes neste aspecto. A razão dos desvios RD resultou no índice menos adequado aos métodos, exceto pelo das diferenças finitas, apesar desta metodologia obter o maior EQM, o seu valor de RD foi o mais próximo de um. A eficiência de modelagem EM mostrou-se adequada como parâmetro, onde os métodos tendem a um resultado mais parcimonioso, já que os seus resultados não possuem grandes disparidades entre si. A Tabela 4b mostra que as simulações foram mais eficientes para a profundidade anterior, onde os melhores resultados foram calculados para os métodos do arco-tangente e da condução-convecção. Aquele apresentou um EQM abaixo de 4%, sendo tão eficiente quanto sua simulação anterior. Isto ocorre porque o método considera as temperaturas

máximas em profundidades diferentes, onde estas não têm grande diferença entre os picos de seus valores numéricos ao longo deste solo. Para as temperaturas serem estimadas, a difusividade térmica foi considerada constante em relação ao tempo e à profundidade, e seus cálculos foram realizados para a primeira camada do solo, justificando os melhores resultados da tabela 4^a em relação aos da 4b. Como observado na figura 2, as curvas de simulação são mais apropriadas à da medida de acordo com a aproximação aos extremos, neste caso, as camadas mais superficial e mais profunda. Ainda analisando a figura 2, é possível observar que o método do arco-tangente realiza meio ciclo senoidal (o ciclo senoidal é formado por harmônicas, justificando sua complexidade, Silans et al., 2006) enquanto os outros métodos realizam um ciclo completo, justificando os melhores resultados estatísticos obtidos pelo algoritmo nas duas profundidades distintas. O fato observado pelas diferentes maneiras de comportamento de acordo com o ciclo senoidal é causado pelas equações que regem cada um dos métodos.

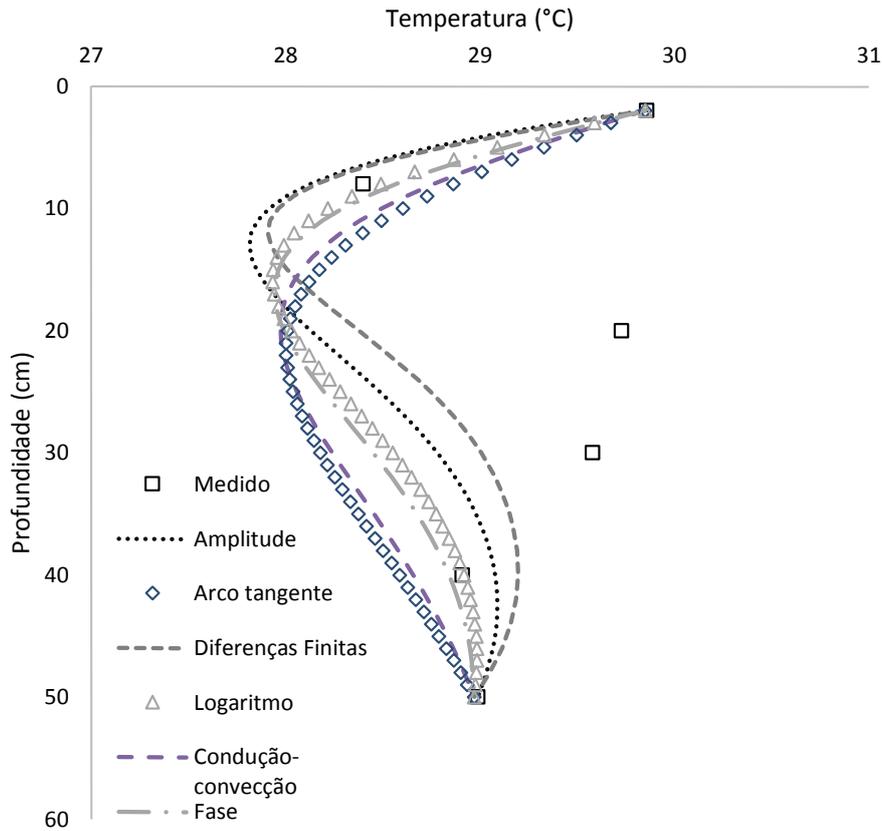


Figura 2. Valores medidos e estimados pelos seis métodos no dia 06/01/2011 às 14h00min ao longo das profundidades do solo.

Foram analisadas as temperaturas ao longo da profundidade no dia 06/01/2011 às 14h00min. Os resultados obtidos concluem que os métodos estimaram valores próximos entre si, tendo diferenças de valores menores que 1°C. As estimativas foram menos coerentes quando se distanciavam das fronteiras (2 cm e 50 cm), isto porque a difusividade térmica foi considerada uniforme ao longo destas profundidades., o maior erro encontrado teve uma amplitude menor que 2°C, na profundidade de 20 cm, entre o método da condução-convecção e o medido. Os algoritmos Fase e logaritmo simularam com mais eficiência, já que os seus valores médios de difusividade são numericamente próximos. Nas diferenças finitas observa-se uma amplitude maior em relação aos demais, e no arco tangente a menor entre os

métodos. Isto pelo valor calculado do \bar{K} obtido foi numericamente o menor e o maior respectivamente.

Segundo Rao (2005), as temperaturas nas camadas mais próximas à superfície (entre 2 cm e 10 cm) variam mais facilmente em relação as demais, tendendo a serem mais amenas nos momentos em que o solo tem menos influência do calor oriundo da radiação e o oposto, onde há maiores temperaturas nas ocasiões em que existe maior influência deste calor. Já as aferições nas camadas mais profundas (entre 40 cm e 1 m) mostram amplitudes bem menores, com comportamentos mais lineares, e temperatura média definida, esta dependendo do tipo do solo, da localidade e do momento do estudo.

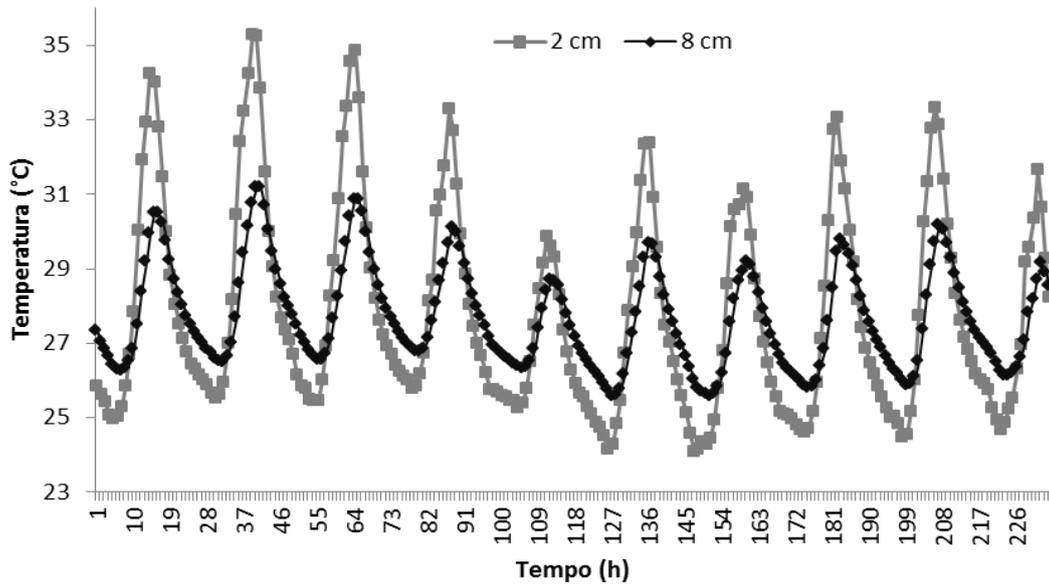


Figura 3. Medidas das temperaturas nas profundidades de 2 cm e 8 cm, caracterizando a primeira camada do solo estudado.

A Figura 3, mostra as temperaturas nas profundidades de 2 cm e 8 cm. O fluxo de calor foi calculado para esta primeira camada do solo, onde a mais superficial apresentou uma abrangência maior em relação à de 8 cm. A tendência do calor é penetrar as camadas mais

internas quando a superfície estiver mais quente, ou seja, durante o dia, e se comportar de maneira contrária durante a noite, mantendo uma correlação entre as figuras de temperaturas nas duas profundidades.

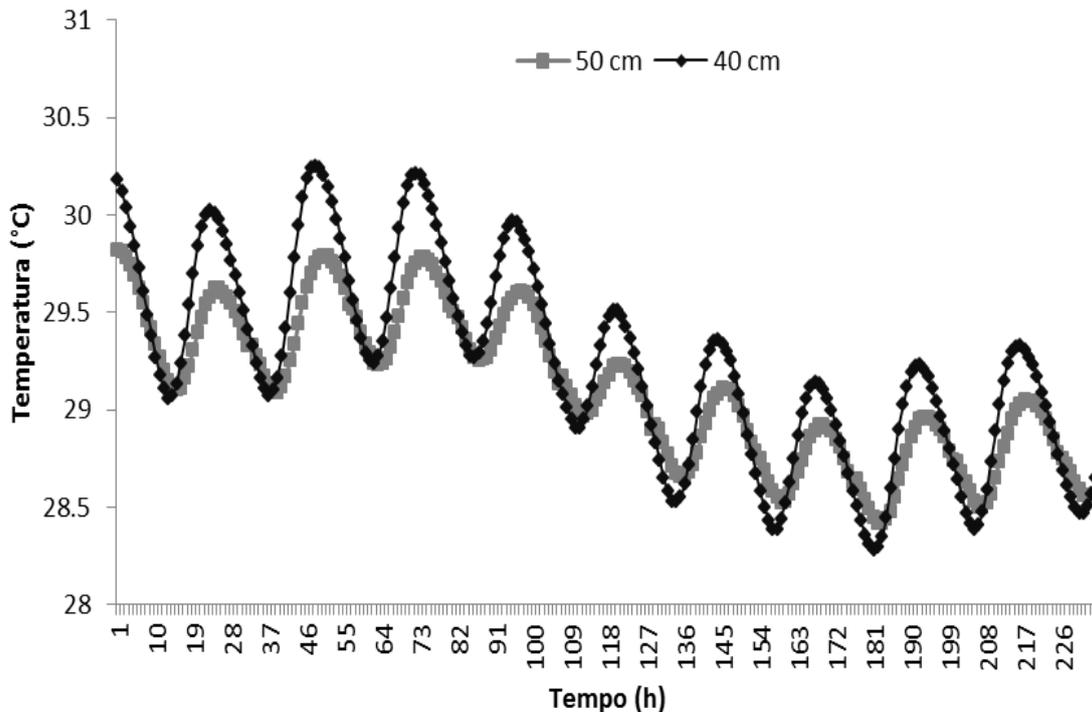


Figura 4. Medidas das temperaturas nas profundidades de 40 cm e 50 cm, caracterizando a última camada do solo estudado.

A representação gráfica das temperaturas da última estratificação do solo pode ser observada na Figura 4. A análise dos seus valores difere dos da Figura 3, consideravelmente acerca da amplitude da variação destas temperaturas. A camada mostra-se mais homogênea, com uma

variação próxima a 2,3 °C entre seus valores mínimos e máximos diários. A radiação solar tem menos influência nesta profundidade do que nas áreas mais superficiais e conseqüentemente o fluxo de calor terá uma amplitude bastante inferior ao da Figura 8, mesmo com as diferenças

observadas entre os resultados obtidos pelas estimativas dos métodos de determinação da difusividade.

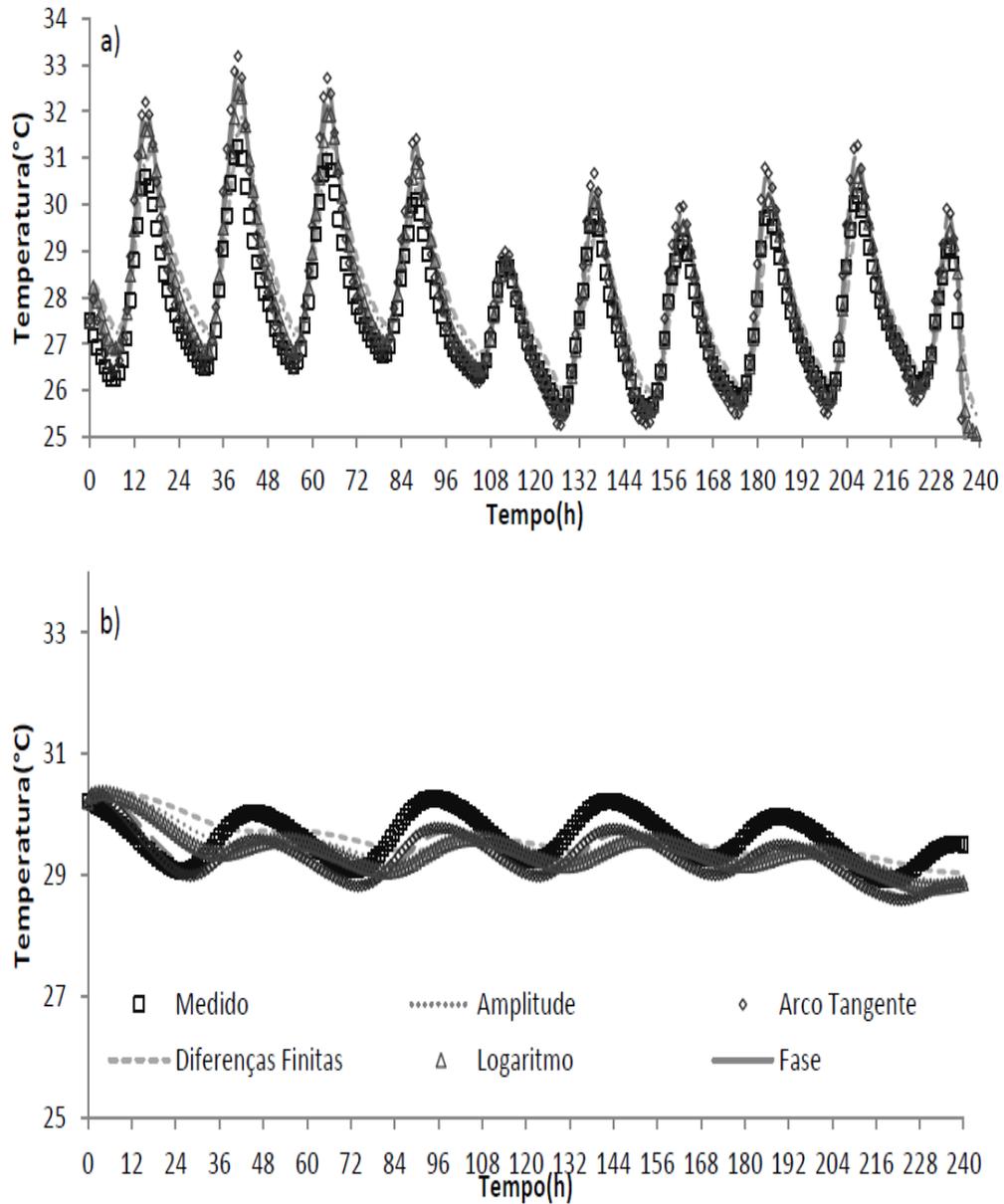


Figura 5. Comparação entre os valores medidos e estimados pelos métodos: diferenças finitas, condução-convecção, fase, logaritmo, amplitude e arco-tangente nas profundidades de a) 8 cm e b) 40 cm.

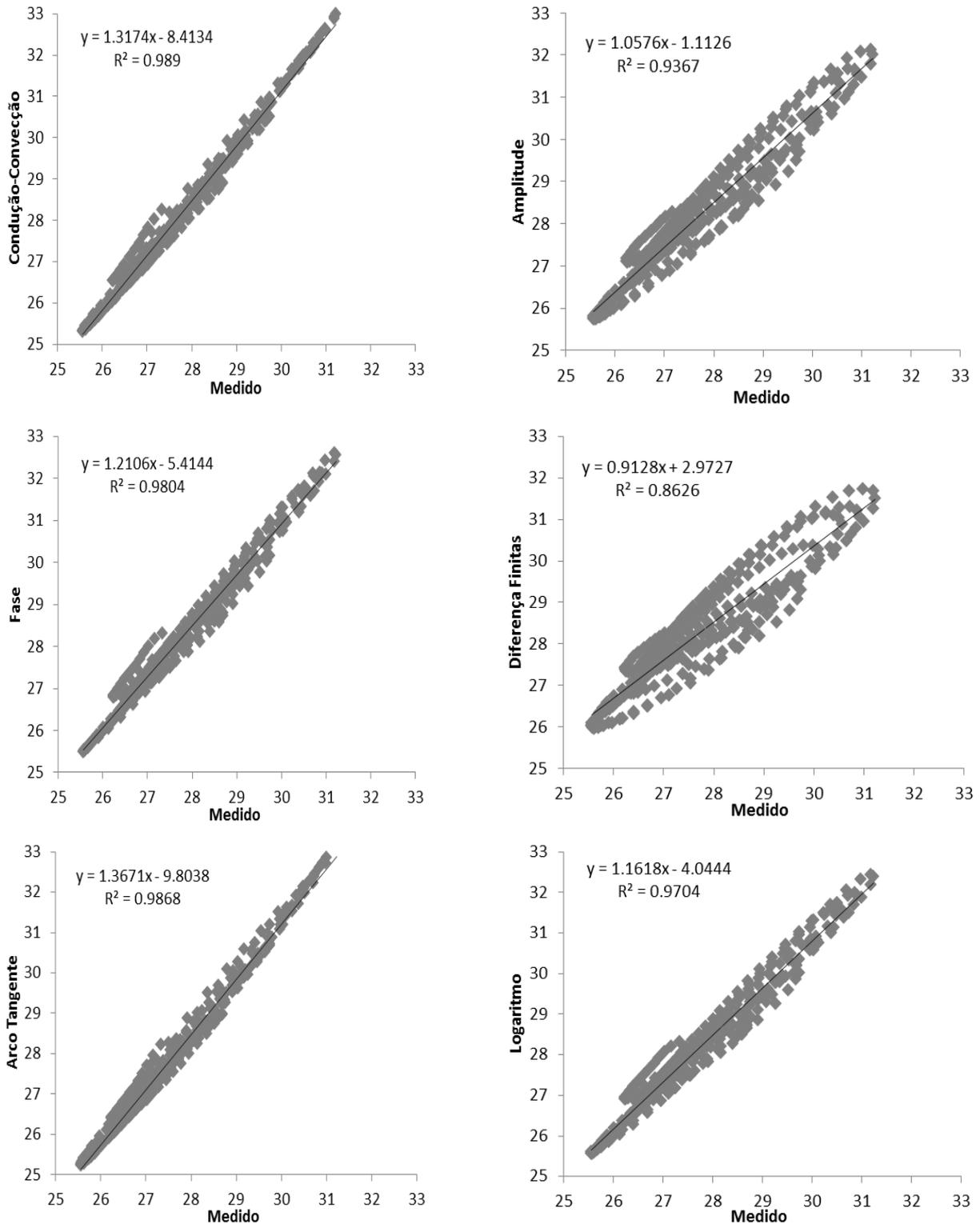


Figura 6. Análise estatística dos valores medidos e encontrados pelos métodos na profundidade de 8 cm durante o período de estudo.

Analisando a Figura 5a, observa-se que o método da condução-convecção resultou na simulação mais próxima dos valores medidos, acompanhando os picos de valores mais baixos e extrapolando os mais altos em cerca de até 1,7°C

nos quatro primeiros dias, e reproduzindo muito próximo do real nos dias restantes.

O método que obteve uma maior amplitude e conseqüentemente uma maior variação nos picos máximos foi o do arco-tangente. O método das diferenças finitas obteve o

resultado mais insatisfatório, apesar de obter o menor erro em relação aos picos máximos, por causa da sua amplitude de onda menor em relação aos demais, suas medidas destoaram nos picos mais baixos em todos os dias. Isto ocorre devido à sua metodologia ser mais exigente que as outras, sendo necessárias três profundidades de aferição ao invés de duas, e neste caso, a sua terceira camada foi encontrada através de uma ponderação, divergindo dos valores reais. Os resultados do algoritmo amplitude tiveram uma tendência ao das diferenças finitas, pois seus valores de difusividade foram próximos.

O coeficiente de difusividade térmica médio do solo foi mantido constante para a modelagem das temperaturas na profundidade de 40 cm, como se pode observar na Figura 5b. O método do arco-tangente simulou eficientemente, acompanhando as variações das temperaturas ao longo do dia com bastante coerência. O método obteve apenas uma média de temperatura menor, em cerca de 0,4°C, em relação aos valores medidos. Este método também obteve um dos melhores resultados analisados, como visto na Figura 2, sendo muito eficiente para este tipo de solo em todas as simulações estudadas neste trabalho. Os resultados da condução-convecção foram muito próximos aos do método anterior, diferenciando apenas na média das temperaturas, as quais foram um pouco menor nas suas medidas em °C.

Os métodos amplitude e diferenças finitas foram próximos entre si, apresentando amplitudes aquém dos valores reais e oscilando entre a média das temperaturas entre picos das medidas relacionadas a este. Em relação às metodologias fase e logaritmo, resultaram em avaliações semelhantes aos dois últimos métodos citados em relação à amplitude, mas obteve uma oscilação maior entre os picos e vales das medidas. Os ângulos de fase e a frequência destes diferenciaram dos outros modelos, deslocando o figura minimamente para a direita nos momentos onde ocorrem os extremos das temperaturas. A figura de regressão linear é importante para compreensão da relação existente entre as variáveis. O objetivo destas figuras é representar a relação entre as observações e as estimativas feitas pelos métodos. Estes resultados se assemelham aos de Wang e Bras (1999).

Observam-se na Figura 6 as figuras de regressão linear entre os valores estimados dos algoritmos utilizados e os medidos. A simulação mais próxima dos valores medidos é a que tende à linearidade. A condução-convecção, fase, arco

tangente e o logaritmo possuem um coeficiente de determinação (R^2) muito próximo de um, enquanto este nas diferenças finitas possui quase 0,14 de diferença até a unidade. Conclusões semelhantes foram encontradas por Danelichen et al. (2011), para o método da condução, fase, arco tangente e logaritmo. A linearidade foi menor na profundidade de 40 cm em relação à profundidade de 8 cm, já que a comparação feita entre as figuras mostrados, na figura 4a e 4b mostram a diferença significativa entre os resultados. O algoritmo do arco-tangente modelou consideravelmente melhor que as outras metodologias nesta última. O algoritmo condução teve simulações eficientes às duas profundidades. Já as diferenças finitas comprovaram ser o método menos adequado para este estudo nos dois casos. Os algoritmos amplitude, logaritmo e fase tiveram as maiores discrepâncias entre as simulações dos dois casos, sendo que estes dois últimos simularam melhor ao decorrer das profundidades em tempo fixo.

Os resultados obtidos para as análises estatísticas do estudo realizado na profundidade de 40 cm mostram que a modelagem foi mais eficiente na condução-convecção e no arco-tangente, este obtendo parâmetros próximos aos simulados na outra camada, com coeficiente de determinação mais próximo de um, neste caso em 88%. As diferenças finitas apresentaram os resultados mais distantes dos medidos, sendo assim, o R^2 menos próximo da unidade. As figuras construídas entre valores medidos/estimados estão apresentadas na Figura 7.

A análise indica que as modelagens na profundidade de 8 cm superaram em exatidão às de 40 cm e assim, reafirmando a variação da difusividade térmica ao longo das camadas deste solo. A linearidade foi menor deste em relação àquele, já que a comparação feita entre as figuras mostrados na Figura 5a e 5b mostram a diferença significativa entre os resultados. O algoritmo do arco-tangente modelou consideravelmente melhor que as outras metodologias nesta última. O algoritmo condução teve simulações eficientes às duas profundidades. Já as diferenças finitas comprovaram ser o método menos adequado para este estudo nos dois casos. Os algoritmos amplitude, logaritmo e fase tiveram as maiores discrepâncias entre as simulações dos dois casos, sendo que estes dois últimos simularam melhor ao decorrer das profundidades em tempo fixo.

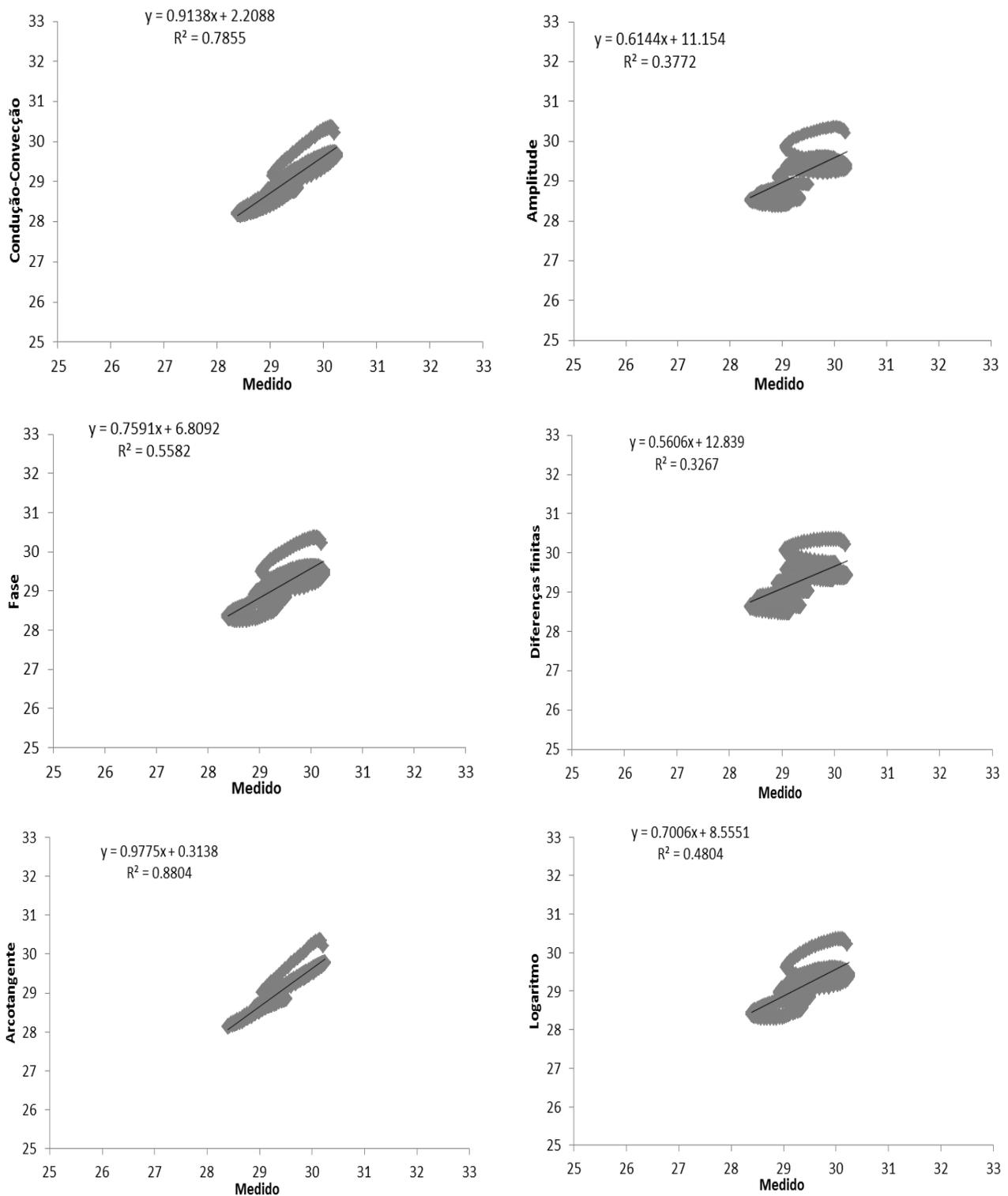


Figura 7. Análise estatística dos valores medidos e encontrados pelos métodos na profundidade de 40 cm durante o período de estudo.

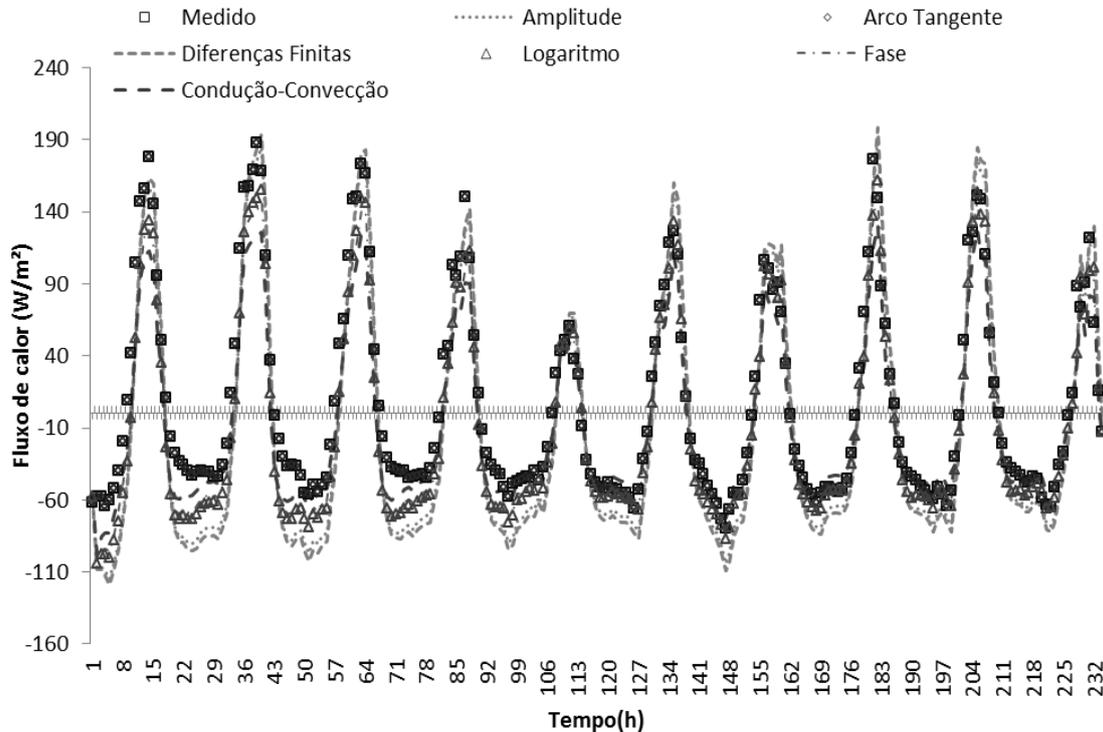


Figura 8. Comparação entre o fluxo de calor calculado através das temperaturas medida e estimadas pelos seis métodos.

Os resultados da Figura 8 mostram que o fluxo de calor tem sentido negativo, em direção à superfície do solo, durante os horários onde a incidência solar é reduzida ou quase nula, visto estes entre 18h e 6h de dias consecutivos. Da mesma maneira que entre 6h e 18h, período diurno e vespertino, o fluxo é positivo, de maneira que o calor é transportado para camadas mais internas do solo. Desta maneira, o fluxo de calor medido mantém uma correspondência com os valores analisados na Figura 3. A estimativa do fluxo de calor no solo apresentada acima foi realizada para o mesmo período de dez dias. Esta figura mostra que as maiores discrepâncias entre os valores do fluxo entre as temperaturas estimadas e medidas estão destacadas nas faixas de mínimos absolutos, onde ocorre a inversão do sentido do fluxo, comportamento este que foi igualmente encontrado por Santos et al. (2013) e Soares et al. (2014). Este resultado é coerente com os da Figura 5a, já que esta inversão corresponde com os picos máximos de temperatura apresentados nesta figura. Este resultado implica

que para as estimativas do fluxo de calor no solo, neste estudo, foi influenciado pelos valores de difusividades encontrados pelos seis algoritmos e pelas modelagens realizadas por estes.

O fluxo de calor calculado para a última camada do solo manteve o comportamento esperado para tal, já que em comparação ao observado na Figura 8, o da Figura 9 apresenta amplitude de onda bastante reduzida, já que o fluxo de calor tende a ser constante quanto maior for a profundidade do solo.

A Figura 4 mostra uma variação diária de cerca de 2°C para a profundidade estudada, e o fluxo corresponde a um intervalo de 20 a 25 W/m². Apesar de a temperatura esfriar com o decorrer dos dias no intervalo de 0,4 e 0,5m, o fluxo se mantém quase que uniformemente um senóide, já que sua relação é com a variação de temperatura e não com o seu valor numérico. Conclusão semelhante foi obtida por Borges et al. (2008).

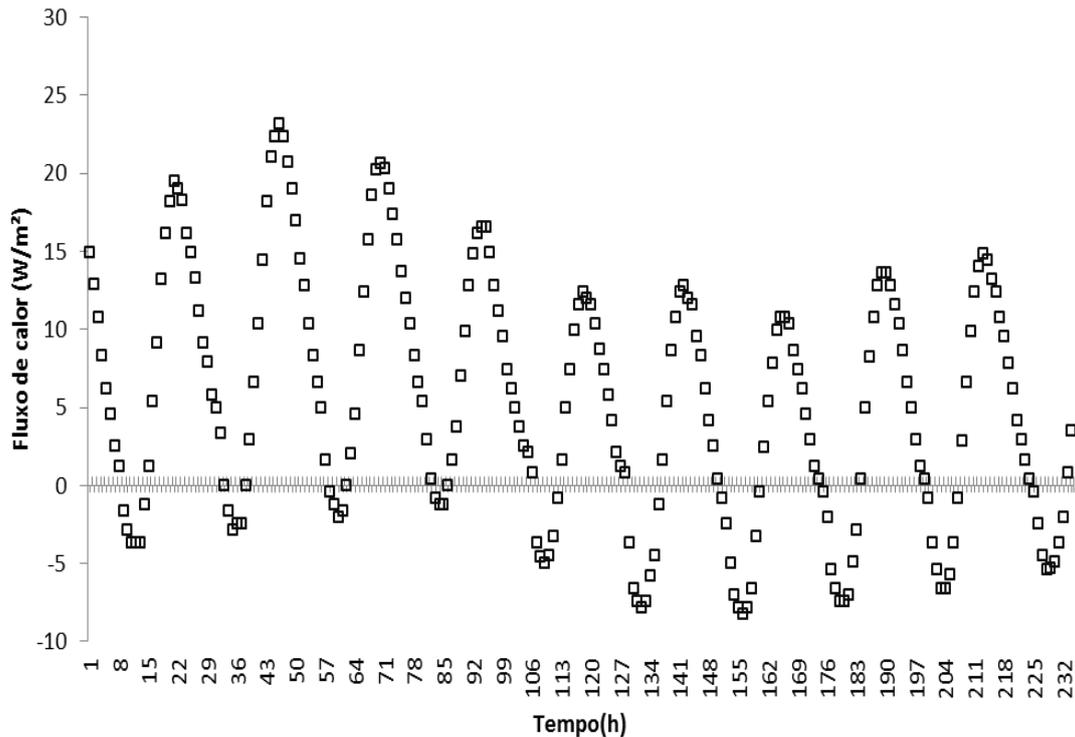


Figura 9. Valores para o fluxo de calor calculado a partir dos valores observados para as temperaturas da última estratificação do solo (40 cm a 50 cm).

Conclusões

A difusividade térmica e o fluxo de calor são parâmetros fundamentais para os estudos dos processos térmicos do solo. Nesse estudo foram utilizadas seis metodologias (diferenças finitas, condução-convecção, fase, logaritmo, amplitude e arco-tangente) para determinar a difusividade térmica e estimar valores de temperatura no solo ao longo de dez dias, calculando os valores dos fluxos de calor para as camadas superficial e a 50 cm de profundidade.

Os métodos apresentaram resultados satisfatórios e próximos da realidade na profundidade de 8 cm, destacando-se nas simulações de temperatura no decorrer do tempo o método da condução-convecção, que obteve a simulação mais adequada para este estudo. Já na profundidade de 40 cm, os métodos arco-tangente e condução-convecção simularam mais fielmente o modelo real. O método das diferenças finitas obteve desempenho um pouco inferior em relação aos demais métodos, nas duas profundidades, por ser mais complexo que estes, já que necessitou de uma estimativa feita por interpolação na camada de 14 cm.

Nas simulações das temperaturas ao longo da profundidade em um tempo fixo, os métodos mais eficientes foram os logaritmo e fase. Os

resultados obtidos pelo cálculo do fluxo de calor no solo corresponderam com os obtidos pelas modelagens de temperaturas do solo que foram realizadas pela estimativa da difusividade, mostrando que o fluxo tem relação com a variação e a amplitude de onda da curva de temperatura.

A relação entre os dois parâmetros térmicos do solo estudado é bem próxima, já que a difusividade térmica indica a capacidade do meio em transportar o calor para o seu interior e o fluxo indica quanto deste calor é transportado.

Na camada mais superficial as figuras de temperatura, fluxo e difusividade são mais complexas e mais dinâmicas, já em maiores profundidades eles tendem a ter comportamentos semelhantes, sendo assim, estes parâmetros são mais constantes, numericamente.

Agradecimentos

Os dois primeiros autores deste trabalho agradecem ao PFA (Programa de Fortalecimento Acadêmico) pelo financiamento do estudo e das bolsas (proc.1510 e proc.1588) e à Escola Politécnica de Pernambuco.

Referências

- Akai, T. J., 1994. Applied numerical methods for engineers, New York: John Wiley.
- Antonino, A. C. D. ; Soares, W. A.; Silva, E. B.; Lima, J. R. S.; Netto, A. M.; LIMA, C. A. B. O. 2004. Utilização do método inverso para a caracterização hidrodinâmica de um neossolo flúvico. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* 9, 81-87.
- Beltrão, B. A.; Mascarenhas, J. C.; Miranda, J. L. F.; Junior, L. C. S.; Galvão, M. J. T. G.; Pereira, S. N 2005. Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea: Estado de Pernambuco. Diagnóstico do Município de São João. Ministério de Minas e Energia (MME). Programa de Desenvolvimento Energético dos Estados e Municípios (PRODEEM). p. 19.
- Bellaver, V.;Pereira, O. A.; Biudes, M. S.; Nogueira, J. S.; Silva, L. B. 2009. Estimativa da Difusividade Térmica do solo de uma Área com Monodominância de Cambará no Norte do Pantanal. In: Mudanças Climáticas, Recursos Hídricos e Energia para uma Agricultura Sustentável, 2009, Belo Horizonte. XVI Congresso Brasileiro de Agrometeorologia.
- Borges, C. J. R.; Azevedo, P. V.; Silva, V. P. R., Campos, J. H. B. C.; Moura, M. S. B.; Soares, J. M.; Silva, B. B. 2008. Influência do Calor Armazenado no Sistema Solo-Planta no Balanço de Energia em Pomar de Mangueiras. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 12, 393-399.
- Danelichen, V. H. M.; Biudes, M. S. 2011. Avaliação da difusividade térmica de um solo no norte do Pantanal. *Ciência e natureza (UFMT)* 33, 227-240.
- Gao, Z., Fan, X., and Bian, L. 2003. An analytical solution to one-dimensional thermal conduction convection in soil, *Soil Sci.* 168, 99-107.
- Gnatowski, T. 2009. Analysis of thermal diffusivity data determined for selected organic topsoil layer. *Annals of Warsaw University of Life Sciences., Land Reclamation* 41, 95-107.
- Gasparim, E.; Ricieri, R. P.; Silva, S. L.; Dallacort, R.; Gnoatto, E. 2005. Temperatura no perfil do solo utilizando duas densidades de cobertura e solo nu. *Acta Scientiarum Agronomy, Maringá* 27, 107-115.
- 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* .9, 554-559.
- Santos, J. C. B. dos; Caracterização de Neossolos Regolíticos da Região Semi-Árida do Estado de Pernambuco, Recife, 2011, Tese de defesa de mestrado, UFRPE.
- Santos, M. A. F.; Silva, F. M.; Taveiros, F. E. M. 2013. Estimativa de fluxo de calor no solo em Natal/RN baseado na temporada fracionária de meia ordem. *Sociedade e Território, Natal*, 25, edição especial, 1-16.
- Silans, A. M. B. P ; Silva, F. M.; Werlang, L. 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* 30, 41-48.
- Soares, W. A.; Antonino, A. C. D. ; Lima, J. R. S.; Lira, C. A. B. O. 2014. Comparação de Seis Métodos para a Determinação da Difusividade Térmica de um Latossolo Amarelo. *Revista Brasileira de Geografia Física* 07, 146-154.
- Richtmeyer, R.D.; Morton, K.W. 1967. Difference methods for initial value problems. 2.ed. New York: Interscience Publishers 406p.
- Wang, J.; Bras, R. L. 1999. Ground Heat Flux Estimated from Surface Soil Temperature; *Journal of Hydrology* 216, 214-226.
- Wang, L.; Gao, Z., Horton, R. 2010. Comparison of six algorithms to determine the soil apparent thermal diffusivity at a site in the loess plateau of china.; *Soil Science* 175, 51-60.