



## Temperatura do solo como função da temperatura do ar em floresta inundável no Pantanal Mato-grossense<sup>(1)</sup>.

**Fernando da Silva Sallo<sup>(2)</sup>; Luciana Sanches<sup>(3)</sup>; Vanessa Rakel de Moraes Dias<sup>(4)</sup>; Rafael da Silva Palácios<sup>(5)</sup>; José de Souza Nogueira<sup>(6)</sup>.**

<sup>(1)</sup> Trabalho executado com recursos do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq e Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Mato Grosso – FAPEMAT.

<sup>(2)</sup> Doutorando do Programa de Pós-graduação em Física Ambiental, Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT); <sup>(3)</sup> Professora do Programa de Pós-graduação em Física Ambiental, Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT) <sup>(4)</sup> Química, UNEMAT, <sup>(5)</sup> Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental, Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT); <sup>(6)</sup> Professor do Programa de Pós-graduação em Física Ambiental, Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT).

**RESUMO:** O presente estudo estimou a temperatura do solo de uma região florestada e sazonalmente alagável no Pantanal Mato-grossense usando medidas de temperatura do ar por meio de uma simples função senoidal. Os resultados obtiveram bons coeficientes de determinação e pequenos erros quadráticos, sendo possível avaliar e identificar influências diárias e sazonais ocasionadas pela temperatura do ar e da inundação, afetando os mecanismos de transferência de calor entre solo e a atmosfera.

**Termos de indexação:** áreas alagáveis, condutividade térmica do solo, modelagem.

### INTRODUÇÃO

A temperatura do solo ( $T_s$ ) é elemento de fundamental importância agrícola e ecológica pelo papel que desempenha nas interações solo-planta. Essa importância está relacionada às influências em inúmeros processos, destacando-se a evaporação, a difusão de solutos e gases (Bitteli et al., 2008), o desenvolvimento e a atividade das raízes em absorver água (Siqueira et al., 2008) e nutrientes do solo, a atividade de microrganismos, a velocidade das reações químicas do solo (Muneepeerakul et al., 2010) e germinação das sementes (Kaufmann & Ross, 1970).

Apesar da temperatura do solo ser uma variável crucial nos processos adjacentes a superfície, em geral, seu monitoramento é pontual e esparso, com número insuficiente de estações meteorológicas ou micrometeorológicas para sua medição (Zheng et al., 1993). Quando se trata de áreas florestadas, as medidas de  $T_s$  se tornam ainda mais raras, mas não menos importante, onde a ciclagem de nutrientes é contínua (Paul et al., 2004). Estudos comprovam que a temperatura é a variável controladora das emissões de gases metano ( $CH_4$ ) (Yvon-Durocher et al., 2014). Em solos sazonalmente alagados com cobertura florestal no Pantanal Matogrossense, a temperatura do solo ainda é uma variável que pode

controlar as emissões de gases como o dióxido de carbono ( $CO_2$ ) (Johnson et al., 2013).

A temperatura do solo é influenciada por inúmeros fatores, tanto meteorológicos (precipitação, radiação solar e temperatura do ar) quanto da topografia, conteúdo de água no solo, textura, uso e cobertura do solo. Modelos empíricos são usados para estimativa da temperatura do solo tanto em escala local quanto regional por medidas da temperatura do ar (Zheng et al. 1993; Paul et al., 2004), uma vez que esta variável é bem correlacionada com a temperatura do solo, e variáveis como umidade relativa do ar, radiação solar e velocidade do vento são mais difícil em se obter (Yin et al., 1993).

Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi avaliar a sazonalidade da temperatura do solo e sua relação com a temperatura do ar por meio de regressões não lineares, verificando a influência da inundação nos mecanismos de transferências solo-atmosfera.

### MATERIAL E MÉTODOS

#### Descrição do local de estudo

Este estudo foi desenvolvido em uma área dentro da Reserva Particular do Patrimônio Natural (RPPN) do Serviço Social do Comércio (SESC) localizada entre as latitudes  $16^{\circ}29'04''S$  e  $16^{\circ}29'10''S$  e longitudes  $56^{\circ}25'25''O$  e  $56^{\circ}25'39''O$ , aproximadamente 160 km de Cuiabá - Mato Grosso no Norte do Pantanal. A área de estudo é caracterizada por floresta de abundância relativa de *Vochysia divergens* Pohl (51,20%), seguido das espécies *Mouriri elliptica* Mart. (26,20%) e *Licania parvifolia* Huber (9,5%) entre outras. O solo é caracterizado como franco argiloso e argiloso que são solos com maior porosidade total e grande quantidade de microporos, em relação aos solos arenosos que tem grande volume de macroporos (Meurer, 2006). Consequentemente, as propriedades hidráulicas deste solo respondem da



mesma maneira. Muitos ambientes de áreas alagadas possuem baixa condutividade hidráulica (Berry et al., 2011).

### Instrumentação

As medidas de temperatura do solo ( $T_s$ , °C) foram obtidas por um reflectômetro no domínio do tempo - TDR (CS650 – Campbell Scientific Inc., Logan, UT, USA) localizado a 30 cm de profundidade do solo. A temperatura do ar ( $T_a$ , °C) foi registrada por um sensor de coleta de dados meteorológicos (WXT520, Vaisala Inc., Helsinki, Finland) instalado a 2 km da área de floresta. O nível da lâmina d'água sobre o solo foi medido por um transdutor de pressão (CS450, Campbell Scientific Inc., Logan, UT, US) definindo o período de inundação. O armazenamento dos dados foi realizado em intervalos de 15 min, por um datalogger (CR1000, Campbell Scientific, Logan, Utah, USA).

### Tratamento dos dados

Neste estudo, as medidas de  $T_s$  e  $T_a$  (Figura 1a) foram divididas em dois períodos distintos: período de inundação (solo saturado) e período não inundado, significando presença e ausência de lâmina d'água sobre o solo. Os períodos inundado e não inundado foram identificados por medidas *in loco* (Figura 1b).

Dado que a temperatura do solo a 30 cm de profundidade no solo não apresenta variações pouco acentuada no decurso do dia, efetuou-se médias horárias tanto de  $T_s$  quanto  $T_a$ .

### Análise estatística

Para avaliar a sazonalidade da temperatura do solo e a influência da inundação nos mecanismos de transferência entre o solo e a atmosfera, uma função senoidal foi ajustada a cada período (inundado e não inundado). Baseado na função descrita por Paul et al. (2004), a temperatura horária do solo ( $T_s$ ) pode ser estimada pela formulação seguinte:

$$T_s = \frac{1}{2} A_s + P_s \sin\left(2\pi \frac{(t - t_c)}{w}\right) - D \quad \text{Eq.(1)}$$

em que  $t$  é o dia juliano. Consequentemente,  $t_c$  e  $w$  apresentam unidade em dia juliano e os demais parâmetros são descritos na **tabela 1**.

**Tabela 1.** Lista de parâmetros, variáveis e abreviações de Eq. (1)

Parâmetros	Descrição
$A_s$ (Offset vertical)	Máxima temperatura do ar ( $T_{a-10h}$ ) defasada em 10 h
$P = P_s * P_a$ (Amplitude)	$P_s$ é a amplitude diária de $T_{a-10h}$ $P_a$ é o fator de correção da amplitude de $T_s$ .
$D = D_s * f_D$ (Variação de $T_s$ )	$D_s$ é a média móvel de $T_{a-10h}$ $f_D$ é o fator ajustável de $T_s$
$t_c$	Mudança de fase
$w$	Período, relacionado a duração dos períodos de inundado e não inundado.

Na estimativa de  $T_s$ , a temperatura do ar foi defasada em - 10 h ( $T_{a-10h}$ ), uma vez que o solo suaviza o processo de transferência de calor para as camadas mais profundas no solo (Campbell & Norman, 1998). O valor -10h foi definido a partir da correlação cruzada entre  $T_a$  e  $T_s$ . A variável  $D_s$  é representada por uma média móvel com janela de 24h. Todas as análises estatísticas foram realizadas por meio do software R.

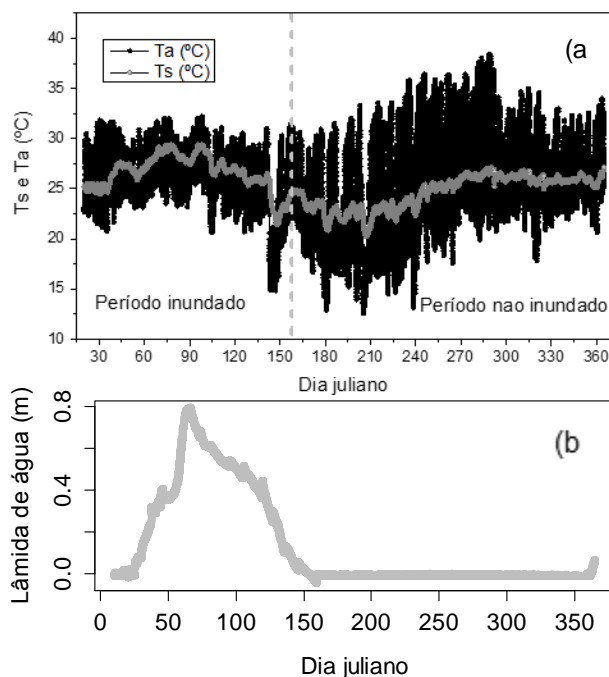
## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A estimativa da temperatura do solo como da temperatura do ar a partir uma função senoidal foi bastante sensível ao tempo de defasagem de  $T_a$ . O melhor tempo de defasagem entre  $T_a$  e  $T_s$  observado pelo teste de correlação cruzada, foi de - 10 horas ( $T_{a-10h}$ ). Este procedimento foi crucial para correção de fase entre  $T_a$  e  $T_s$  aumentando a acurácia nas relações de regressão.

A estimativa de  $T_s$  pelo modelo sugerido foi significativa para todos os parâmetros (**Tabelas 1 e 2**). Os coeficientes de determinação ajustados ( $R^2_{ajust}$ ) indicaram que  $T_s$  foi representado com boa acurácia, tanto no período inundado quanto no período não inundado. Os erros quadráticos médios (MSE) observados foram inferiores a 0,26 °C<sup>2</sup> em ambos os períodos. Tendo em vista que a amplitude anual de  $T_s$  foi de 9,17 °C, o erro foi em torno de 2,83%. Paul et al. (2004) observaram MSE menores que 4,25 °C<sup>2</sup> e  $R^2$  menores que 0,91. Estes autores utilizaram mais que quatro parâmetros e mais variáveis controladoras da variação em  $T_s$ , como índice de área foliar e serrapilheira.

No presente trabalho,  $T_s$  foi influenciada principalmente pelo nível de lâmina d'água sobre o solo (Figura 1b), verificando-se maior variação diária em  $T_s$  durante o período inundado (Figura

1a), embora, que neste período a amplitude em  $T_a$  foi menor (14,8 a 32,2 °C) comparado ao período não inundado (12,6 a 37,4 °C). Desta forma, é possível afirmar que a transferência de calor nas camadas superficiais do solo, ocorreram com mais efetividade no período inundado, isso também é verificado analisando a magnitude de  $P_a$ , que é maior no período inundado. Além disso, a amplitude diária média de  $T_s$  é 24% e 9% de  $T_a$  para os períodos inundados e não inundados, respectivamente.

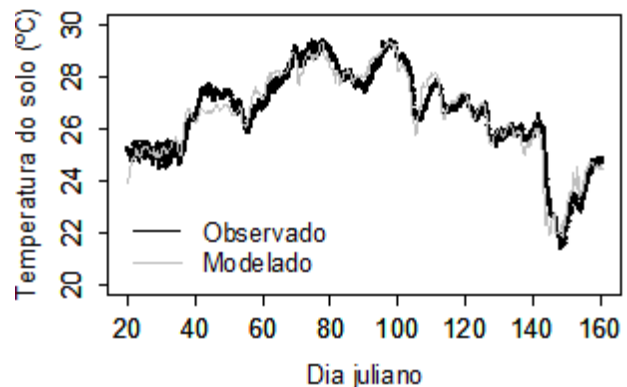


**Figura 1.** (a) Temperatura do solo ( $T_s$ , °C) e temperatura do ar ( $T_a$ , °C) a cada 1h, (b) lâmina d'água sobre o solo a cada 1h. Em (b) a hachura cinza vertical indica o termina da lâmina d'água sobre o solo. Período inundado: 20 de janeiro a 10 de junho (dias juliano 20-161). Período não inundado: 11 de junho a 28 de dezembro de 2014 (dias juliano 162-362).

Esses resultados indicam que a condutividade térmica do solo foi bastante sensível ao conteúdo de água no solo, devido à condutividade térmica da água ser maior que a do ar, quando o solo não está saturado. O aumento da temperatura do solo pode favorecer a produção de  $CH_4$ , uma vez que causa aumento do potencial redutor do meio, como foi observado por estudos em áreas alagadas (Luo et al., 2013 e Bastviken et al., 2010). Malhi et al. (2009) constataram que a produção de óxido nítrico aumentou exponencialmente com a temperatura do ar em áreas alagáveis na Amazônia. Este cenário

sugere que certo acréscimo em  $T_a$  favorece aumento em gases tidos como causadores do efeito estufa em áreas alagáveis. Contudo, Bastviken et al. (2010) constataram que o aumento na emissão de  $CH_4$  não esteve significativamente associado à um acréscimo em  $T_s$ .

As variações térmicas nas camadas subjacentes foram suavizadas pelo fato da absorção e da perda de energia se darem na superfície, aliado à baixa velocidade de propagação do calor no interior do solo, as variações térmicas se limitam aos horizontes mais superficiais. A variável  $D$  em Eq.1 descreve o papel de suavização em  $T_s$  à 30 cm de profundidade. A componente  $D_s$  sendo uma média móvel de 24h aliado à um fator de correção  $f_D$  foram capazes de descrever bem as variações horárias de  $T_s$ .  $f_D$  foi ligeiramente maior no período inundado, significando menores flutuações diárias de  $T_a$  neste período. No período não inundado  $T_a$  apresentou flutuações mais abruptas devido às eventuais friagens ocorridas principalmente entre junho e julho. Ademais, a área de estudo nestes meses apresenta menor índice de área foliar, havendo maior incidência de radiação solar sobre o solo influenciando em  $T_s$ .

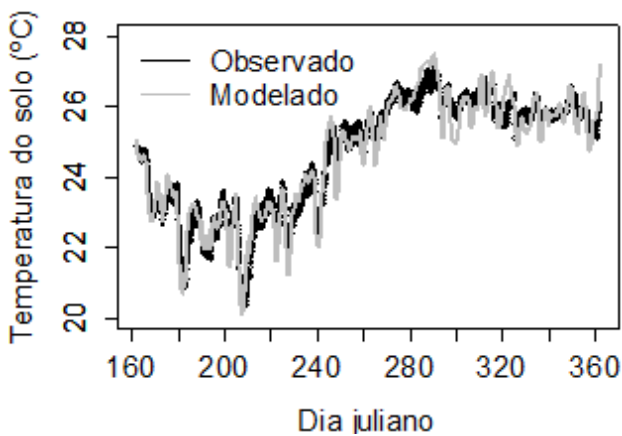


**Figura 2.** Média horária da Temperatura do solo observada e estimada no período inundado.

**Tabela 2.** Estimativa do erro padrão (E.P.), erro quadrático médio (MSE), coeficiente de determinação ajustado ( $R^2_{ajust}$ ), graus de liberdade (df) da relação não linear entre a  $T_s$  observada e estimada no período inundado.

Regressão				
Pars. <sup>1/</sup>	Est. <sup>2/</sup>	E.P.	t-valor	Pr > t
$A_s$	15,2	--	--	--
$P_a$	0,24	3,66e-3	67,3	<0,001
$w$	161,8	1,91	84,4	<0,001
$f_D$	0,44	9,07e-4	489	<0,001
$t_c$	45,2	0,49	92,3	<0,001
MSE = 0.258 °C		$R^2_{ajust}=0.915$	$df^5=3380$	

<sup>1/</sup> Parâmetros; <sup>2/</sup> Estimativa dos parâmetros



**Figura 3.** Temperaturas observada e estimada no período não inundado.

**Tabela 3.** Estimativa do erro padrão (E.P.), erro quadrático médio (MSE), coeficiente de determinação ajustado ( $R^2_{ajust}$ ), graus de liberdade (df) da relação não linear entre a  $T_s$  observada e estimada no período não inundado.

Regressão				
Pars. <sup>1/</sup>	Est. <sup>2/</sup>	E.P.	t-valor	Pr > t
As	14,7	--	--	--
Pa	0,09	7,64e-4	119	<0,001
w	241,7	1,917	109	<0,001
f <sub>D</sub>	0,407	2.96e-4	1287	<0,001
tc	28,2	3,725	13	<0,001
MSE <sup>4/</sup> = 0,211 °C		$R^2_{ajust}$ = 0.927		df <sup>5/</sup> = 4916

<sup>1/</sup> Parâmetros; <sup>2/</sup> Estimativa dos parâmetros

## CONCLUSÕES

Por meio de uma função senoidal modificada de PAUL et al. (2004), a temperatura do solo foi descrita a partir da temperatura do ar com boa precisão. A partir da análise dos parâmetros infere-se que a amplitude diária de  $T_s$  foi maior no período inundado, aumentando a condutividade térmica. A variável D foi capaz de representar a variação diária de  $T_s$  por meio de uma média móvel de 24 h.

## REFERÊNCIAS

BASTVIKEN, D.; SANTORO, A. L.; MAROTTA, H.; PINHO, L.Q.; CALHEIROS, D.F.; CRILL, P.; ENRICH-PRAST, E. Methane Emissions from Pantanal, South America, during the Low Water Season: Toward More Comprehensive Sampling. *Environmental Science & Technology*, 44, 14: 5450-5455, 2010.  
BERRY, L. E.; MUTITI, S.; HAZZARD, S. Determining the Hydraulic Conductivity of the Subsurface in Wetland Environments. In: American Geophysical Union, Fall

Meeting 2011, H33E-1353, 2011.

BITTELLI, M.; VENTURA, F.; CAMPBELL, G. S.; SNYDER, R. L.; GALLEGATI, F.; PISA, P.R. Coupling of heat, water vapor, and liquid water fluxes to compute evaporation in bare soils. *Journal of Hydrology*, 362: 191-205, 2008. doi:10.1016/j.jhydrol.2008.08.014.  
JOHNSON, M. S.; COUTO, E. G.; PINTO JR, O.B.; MILESI, J.; AMORIM, R.S.S.; MESSIAS, M.A.I.; BIUDES, M. S. Soil CO<sub>2</sub> Dynamics in a Tree Island Soil of the Pantanal: The Role of Soil Water Potential. *PLoS ONE* 8(6): e64874, 2013. doi:10.1371/journal.pone.0064874.  
KAUFMANN, M. R. & ROSS, K. J. Water Potential, Temperature, and Kinetin Effects on Seed Germination in Soil and Solute Systems. *American Journal of Botany* Vol. 57, nº 4: 413-419, 1970.  
LUO, G. J.; KIESE, R.; WOLF B.; BUTTERBACH-BAHL, K. Effects of soil temperature and moisture on methane uptake and nitrous oxide emissions across three different ecosystem types. *Biogeosciences*, 10: 3205-3219, 2013. doi:10.5194/bg-10-3205-2013.  
MALHI, Y.; SAATCHI, S.; GIRARDIN, C.; ARAGÃO, L. E. O. C. The Production, Storage, and Flow of Carbon in Amazonian Forests, in *Amazonia and Global Change* (eds M. Keller, M. Bustamante, J. Gash and P. Silva Dias), American Geophysical Union, Washington, D. C., 2009.  
MEURER, E. J. Fundamentos da química do solo. 3. ed. Porto Alegre: Evangraf, 2006.  
MUNEEPEERAKUL, C. P.; MUNEEPEERAKUL, R.; MIRALLES-WILHELM, F.; RINALDO, A.; RODRIGUEZ-ITURBE, I. Dynamics of wetland vegetation under multiple stresses: a case study of changes in sawgrass trait, structure, and productivity under coupled plant-soil-microbe dynamics. *Ecohydrol.*, 4:757-790, 2011. doi: 10.1002/eco.165.  
PAUL, K.I.; POLGLASE, P. J.; SMETHURST, A.M.O., CARLYLE, C.J.; KHANNA, P.K. Soil temperature under forests: a simple model for predicting soil temperature under a range of forest types. *Agricultural and Forest Meteorology*, 121: 167-182, 2004.  
SIQUEIRA, M.; KATUL, G.; PORPORATO, A. Onset of water stress, hysteresis in plant conductance, and hydraulic lift: Scaling soil water dynamics from millimeters to meters. *Water resources research*, vol. 44: W01432, 2008. doi:10.1029/2007WR006094.  
YIN, X., ARP, P.A., YIN, X.W., Predicting forest soil temperatures from monthly air temperature and precipitation records. *Can. J. For. Res.* 23, 2521-2536, 1993.  
YVON-DUROCHER, G.; ALLEN, A. P.; BASTVIKEN, D.; CONRAD, R.; GUDASZ, C.; ST-PIERRE, A.; THANH-DUC, N.; DEL GIORGIO, P. A. Methane fluxes show consistent temperature dependence across microbial to ecosystem scales. *Nature*, 507: 488-491, 2014.  
ZHENG, D.; HUNT JR., E. R. RUNNING, S. W. A daily soil temperature model based on air temperature and precipitation for continental applications. *Climate Research*, 2: 183-191, 1993.