



Modelagem do Fluxo de Calor no Solo em Área de Pastagem no Pantanal Mato-Grossense

Jonathan Willian Zangeski Novais¹, Amanda Alves Rocha², Louyse Siqueira da Silva Gariglio³, Higo José Dalmagro⁴, Dahiane dos Santos Oliveira Zangeski⁵, Paula Roberta Ramos Libos⁶.

¹Professor da Universidade de Cuiabá - UNIC e do Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Ciências Ambientais, e-mail jonathan.novais@kroton.com.br. ²Mestre em Ciências Ambientais pelo Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Ciências Ambientais, Universidade de Cuiabá - UNIC, e-mail: amanda_alvesrocha@hotmail.com. ³Professora da Faculdade de Tecnologia FATEC - MT, e-mail loovarella@gmail.com. ⁴Professor da Universidade de Cuiabá - UNIC e do Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Ciências Ambientais, e-mail: higo.dalmagro@cogna.com.br. ⁵Professora da Universidade de Cuiabá - UNIC, e-mail: dahiane.zangeski@cogna.com.br. ⁶Diretora da faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Engenharias e Tecnologias - FAUET, da Universidade de Cuiabá - UNIC, e-mail: paula.libos@cogna.com.br.

Artigo recebido em 08/03/2023 e aceito em 22/01/2024

RESUMO

De modo a contribuir com o entendimento da dinâmica anual do fluxo de calor no solo de regiões sazonalmente alagáveis, este trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de modelos lineares e sazonais, que representassem o fluxo de calor no solo a qualquer momento do dia no Pantanal mato-grossense. Foi utilizada correlação de Pearson para dados coletados a cada 30 minutos entre fluxo de calor no solo e as variáveis ambientais temperatura e umidade do solo, temperatura e umidade relativa do ar, radiação global e saldo de radiação, de forma a se determinar quais eram significativamente correlacionadas ($p < 0,05$) e, posteriormente, elaborar modelos sazonais preditivos. A análise de correlação eliminou a variável umidade do solo do modelo. Ao se fazer a regressão linear múltipla com as variáveis restantes, percebeu-se que não foi significativo ($p > 0,05$) para o período chuvoso as variáveis temperatura do solo a 0,05 m, umidade relativa do ar e saldo de radiação, assim repetiu-se a regressão linear, retirando as variáveis que não foram significativas, encontrando-se um modelo com coeficiente de determinação $R^2 = 0,859$. Os coeficientes de correlação, $r = 0,969$ e de determinação, $R^2 = 0,940$ foram maiores do que os do período chuvoso. Repetiu-se a regressão linear múltipla no período seco retirando as mesmas variáveis que o período chuvoso, continuando a ser significativos a $p < 0,05$. Este tipo de modelagem pôde reproduzir com boa aproximação o comportamento do fluxo de calor no solo, para períodos de solo úmido e seco.

Palavras-chave: condutividade térmica do solo; zonas úmidas; temperatura do solo; balanço de energia; correlação de Pearson.

Modeling of Soil Heat Flow in a Pasture Area in the Pantanal of Mato Grosso

ABSTRACT

In order to contribute to the understanding of the annual dynamics of heat flow in the soil of seasonally flooded regions, this work aimed to develop linear and seasonal models that represented the flow of heat in the soil at any time of the day in the Pantanal of Mato Grosso. Pearson's correlation was used for data collected every 30 minutes between soil heat flow and the environmental variables soil temperature and humidity, temperature and relative humidity, global radiation and radiation balance, in order to determine which were significantly correlated ($p < 0.05$) and, subsequently, to elaborate predictive seasonal models. The correlation analysis eliminated the soil moisture variable from the model. When doing the multiple linear regression with the remaining variables, it was noticed that it was not significant ($p > 0.05$) for the rainy season the variables soil temperature at 0.05 m, relative humidity and radiation balance, so the linear regression was repeated, removing the variables that were not significant, finding a model with coefficient of determination $R^2 = 0.859$. The correlation coefficients, $r = 0.969$ and determination, $R^2 = 0.940$ were higher than those of the rainy season. Multiple linear regression was repeated in the dry period removing the same variables as the rainy season, continuing to be significant at $p < 0.05$. This type of modeling was able to reproduce with good approximation the behavior of the heat flow in the soil, for periods of wet and dry soil.

Keywords: soil thermal conductivity; Wetlands; soil temperature; energy balance; Pearson's correlation.

Introdução

O Brasil possui rica biodiversidade, possuindo seis biomas, Mata Atlântica, Caatinga, Pampas, Amazônia, Cerrado e Pantanal, em que parte dos três últimos encontram-se no estado de Mato Grosso, Brasil (Rodrigues et al., 2013). Destacando-se o Pantanal, que abrange 80% da maior área úmida de água doce do mundo, sendo os outros 20% na Bolívia (cerca de 19%) e Paraguai (cerca de 1%) (Higa et al., 2022). O bioma compreende um mosaico de cobertura do solo que inclui florestas, bosques, pastagens, lagos e sistemas fluviais, todos sujeitos a algum grau de inundação, permanente ou sazonal (Tomas et al., 2019). A vegetação do bioma é muito diversificada, principalmente devido às inundações e às variações de classes de solo, sendo considerada o centro da maior diversidade de plantas aquáticas do planeta (Pott e Pott, 2000; Fundación Amigos de la Naturaleza (FAN), 2020) e o lar de mais de 3500 espécies de plantas vasculares, 300 espécies de peixes, 41 espécies de anfíbios, 177 espécies de répteis, cerca de 600 espécies de aves e mais de 150 espécies de mamíferos (Primack e Vidal, 2019).

Os padrões espaciais dos níveis d'água do Pantanal são influenciados pela hidrografia dos rios e canais que inundam a região, bem como às inundações locais decorrentes das chuvas (Girard et al., 2010), e representa um complexo de ecossistemas aquáticos, terrestres e de zonas úmidas interconectados, ligando o Cerrado, o centro do Brasil, o Chaco, na Bolívia, e a região amazônica, no Norte (Marengo et al., 2021).

Porém, a hidrologia do Pantanal está ameaçada pelas mudanças climáticas e pelas alterações antrópicas da paisagem, em que sua superfície da água vem diminuindo anualmente desde 2003, sendo a redução 34% maior que a média anual no ano de 2020 (Lázaro et al., 2020; Barbosa et al., 2022). Costa et al., (2023) reportam um evento extremo de seca prolongada no Pantanal de 2019 a 2021, em que a parte norte não conseguiu até o ano de 2021 se recuperar de déficit hídrico dos anos anteriores. Esta seca teve graves impactos na hidrologia do Pantanal, em que os níveis hidrométricos caíram ao longo de todo o rio Paraguai. Em 2020, os níveis dos rios atingiram valores extremamente baixos e em alguns trechos deste rio o transporte teve que ser restringido (Marengo et al., 2021). Períodos de estiagem deverão continuar tanto no Pantanal como nas regiões mais altas circundantes, assim, deve-se esperar uma intensificação do risco de incêndios, estendendo-se agora a áreas historicamente

inundadas, concomitantemente a um impacto negativo na cobertura vegetal não resistente ao fogo (Thielen et al., 2021).

Modelos climáticos previram um aumento na frequência de eventos extremos de precipitação, além do prolongamento da estação seca e ondas de calor (Thielen et al., 2020; Costa et al., 2023; Cunha et al., 2023). Estes eventos extremos tornam a região sensível a queimadas, principalmente como consequência da intensificação das atividades humanas (Barbosa et al., 2022).

Na planície de inundação do Pantanal, quase 80% da vegetação nativa está bem preservada, mas no Cerrado nas terras altas circundantes, mais de 65% da vegetação foi convertida em pastagens aráveis e terras agrícolas (Roque et al., 2016). O mesmo padrão está sendo desenvolvido atualmente no Chaco do Paraguai e menos densamente na floresta Chiquitano da Bolívia, ambos próximos à borda oeste do Pantanal (Yanosky, 2013; Caldas et al., 2015; Waroux et al., 2016). Em florestas naturais, o conhecimento da estrutura da vegetação é importante para estimar a biomassa e a produtividade e entender a influência na sua biodiversidade e sua estabilidade (Guo et al., 2021).

Nesse âmbito de mudanças climáticas e da mudança de cobertura vegetal sobre a superfície, tem-se a hipótese de que há mudanças nos fluxos geotermiais, e por consequência no balanço de energia, alterando assim toda a dinâmica energética e biogeoquímica do local, mediadas pela radiação solar, que influencia na temperatura do ar e na quantidade de vapor d'água na atmosfera em uma região, e consequentemente na energia disponível para o aquecimento do solo, sendo a temperatura do solo um fator primário na determinação das trocas de energia e massa com a atmosfera e taxas e direções dos processos físicos do solo (Abdalla et al., 2023). O conhecimento dessa variação do fluxo geotérmico induzida pela radiação solar nas camadas superiores é importante para as Geociências, devido estas camadas serem o principal cenário para muitos processos bioquímicos, tais como desgaste, lateralização, difusão de solutos e gases, processos geofísicos, tais como alterações dos valores de condutividade térmica e difusividade térmica do material na zona de arejamento (Araújo et al., 2004; Novais et al., 2012; 2013; Curado et al., 2013), influencia em processos biológicos como desenvolvimento de plantas, germinação de sementes (Zucareli et al. 2010) e fluxo de massa, como assimilação de águas e nutrientes pelas raízes e a atividade dos

microorganismos no solo, em que sua respiração atua diretamente no ciclo global de carbono, todos dependentes diretamente da temperatura do solo (Yan et al., 2022; Yang et al., 2022; Novais et al., 2023).

A variação do fluxo de calor no solo (G) em ambientes florestais é muitas vezes negligenciada em estudos de balanço de energia, devido aos menores valores observados durante o dia, porém esse componente não deve ser descartado em pastagens, pois desempenha um papel relevante no fechamento do balanço de energia em função da maior amplitude diária. Sua determinação pode ser usada para avaliar os outros fluxos de superfície, fluxo de calor latente e sensível, ajudando a explicar os problemas do fechamento do balanço de energia (Priante-Filho et al., 2004; Foken, 2008; Wang et al., 2010; Gao et al. 2017; Liang et al. 2017).

Há também uma lacuna de conhecimento sobre a geotermia rasa para o Pantanal mato-grossense, prejudicando assim a estimativa de modelos matemáticos, devido à incerteza e empirismo de seus parâmetros, sendo necessária a determinação de parâmetros locais acerca do solo e superfície, como condutividade térmica, umidade do solo e sazonalidade. Assim, o desenvolvimento de metodologias para monitorar eventos climáticos é crucial para avaliar os riscos num clima em aquecimento, (Cunha et al., 2023), fornecendo informações essenciais para a compreensão e prevenção dos seus impactos, especialmente aqueles que podem desencadear surtos de incêndios (Costa et al., 2023), justificando este trabalho que tem como objetivo o desenvolvimento de modelos lineares e sazonais, que representassem o fluxo de calor no solo a qualquer momento do dia no Pantanal mato-grossense.

Material e Métodos

Localização e descrição da área a ser estudada

A pesquisa foi realizada na Fazenda Nossa Senhora do Carmo, Figura 1, situada a 10 km do município de Poconé, sub-região do Pantanal Norte Mato-grossense (56° 46' N; 16° 37' W, 120 m de altitude). Nesta localidade, com área total de 1.113 ha destinada exclusivamente à pecuária, foi instalada, em dezembro de 2017, uma estação meteorológica, em uma área de pastagem sazonalmente inundada (Dalmagro et al., 2022), para análise constante do fluxo de matéria e energia. A torre tem 5 m de altura e foi instalada de maneira com que as espécies arbóreas nativas, localizadas ao redor da propriedade, não afetassem a coleta de dados.

O campo é dominado por gramíneas forrageiras conhecida localmente como Capim Mimoso (*Axonopus purpusi*) e com forrageira cultivada do gênero Braquiária (*Brachiaria humidicola* cv. *humidicola*), a pastagem não passa por reforma há mais de 10 anos e encontra-se, segundo Klink e Machado (2005), em estado avançado de degradação, caracterizando um sistema de cultivo de baixa qualidade e produtividade (Dalmagro et al., 2022).

O clima da região é caracterizado, segundo estudo de Alvares et al. (2013), como Aw, correspondendo a invernos secos e verões chuvosos, com uma estação de chuva pronunciada (de outubro a abril) e outra seca (de maio a setembro). A temperatura média anual é de aproximadamente 26,6 °C (Dias et al., 2021) e a precipitação varia entre 1000 e 1500 mm.ano⁻¹ (Schwartz et al., 2021). A direção predominante do vento é Norte e Noroeste durante a maior parte do ano, e direção Sul durante o inverno (Ribeiro et al. 2022). O tipo de solo na região é classificado como Plintossolo Argilúvico Alumínico típico, conforme caracterizado por Couto et al. (2002), com uma concentração média de 271 g.kg⁻¹ de areia, 276 g.kg⁻¹ de silte e 182 g.kg⁻¹ de argila, e em média de 13,1 g.kg⁻¹ de carbono orgânica do solo (0-0,10 cm de profundidade) com pH do solo de 4,3 (Couto et al., 2002).

Período de coleta de dados, instrumentação e medidas

O estudo ocorreu no intervalo de um ano, entre janeiro e dezembro de 2020. De acordo com Costa et al. (2023), neste período o Pantanal mato-grossense sofreu um evento extremo de seca prolongada, com estação chuvosa encurtada ao final do ano de 2020. Neste ano o Pantanal também sofreu com queimadas, sendo as áreas queimadas 200% maiores que a média de longo prazo (Barbosa et al., 2022), correspondendo a mais de 3,9 milhões de hectares queimados (Libonati et al., 2022).

Para a análise da temperatura do solo (T_{solo}) e umidade do solo (U_{solo}) foi utilizado o sensor modelo TEROS 12 (Meter Group, Inc., Pullman, Wahsington, USA), instalados nas profundidades de 0,05 m; 0,1 m; 0,3 m; 0,6 m; e 1 m no perfil do solo. O fluxo de calor no solo foi obtido a partir de fluxos médios medidos por placas de fluxo de calor no solo, sendo utilizado um sensor HFP03 (Hukseflux, Delft, Holanda; precisão 5-15%) colocados diretamente em contato com o solo na altura de 7,5 cm. Com relação a temperatura do ar (T_{ar}), umidade relativa do ar (UR_{ar}), radiação global (R_g) e precipitação pluviométrica (P_{pt}), foram

monitoradas continuamente por sensores instalados na estação automática (WXT520, Vaisala Inc., Helsinki, Finlândia). Para o saldo de radiação (R_n) foi utilizado um saldo-radiômetro (CNR 4, Kipp & Zonen, Delft, Netherlands). Para o processamento e armazenamento dos dados foi utilizado um datalogger modelo CR1000

(Campbell Scientific, Inc., Logan, Utah, USA) equipado com um multiplexador modelo AM16/32AST-SW (Campbell Scientific, Inc., Logan, Utah, USA), cujas leituras eram registradas a cada 30 minutos.

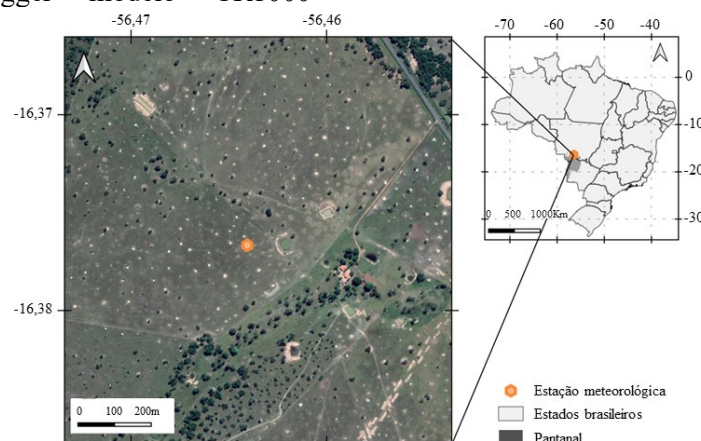


Figura 1. Distribuição territorial do bioma Pantanal e localização geográfica da torre micrometeorológica, instalada em área de pastagem, no Pantanal mato-grossense.

Baseado em resultados de precipitação e umidade do solo local, foi determinado como período seco os meses de junho a outubro, e como período úmido de janeiro a maio e novembro a dezembro.

Condutividade térmica

A condutividade térmica, K ($W.m^{-1}.^{\circ}C$) pode ser definida a partir da equação de Fourier, segundo a qual a densidade de fluxo de calor no solo, G ($W.m^{-2}$), é proporcional ao gradiente de temperatura na profundidade $\delta T/\delta z$ ($^{\circ}C.m^{-1}$) (Carslaw e Jaeger, 1959), assim expressa na Equação 1:

$$K = -\frac{G}{\delta T/\delta z} \quad (1)$$

A condutividade térmica foi calculada para a profundidade entre 0,05 m e 0,1 m.

Análise estatística

A estatística multivariada é uma área que utiliza diversas técnicas para analisar conjuntos de variáveis que caracterizam objetos ou indivíduos de uma amostra. Essas técnicas podem ser classificadas em dependência ou interdependência. As técnicas de dependência são usadas quando uma variável (dependente) é explicada por outras

variáveis (independentes). Exemplos dessas técnicas incluem modelos de regressão múltipla e análise discriminante (Johnson e Wichern, 1998; Hair et al, 1998). Já as técnicas de interdependência analisam todas as variáveis simultaneamente, sem considerar nenhuma variável como dependente ou independente, com o objetivo de encontrar uma estrutura para todo o conjunto de variáveis. Essas técnicas incluem análise fatorial, análise de cluster e escalagem multidimensional (Johnson e Wichern, 1998; Hair et al, 1998).

Segundo Turkman e Silva (2000), o coeficiente de correlação de Pearson (r) é uma técnica estatística amplamente utilizada para avaliar a relação entre as variáveis. O sinal do coeficiente expressa a força e direção da correlação linear de Pearson, que varia de -1 a 1. Conforme Küster et al. (2018) e Sousa (2019), duas variáveis podem apresentar correlação linear negativa perfeita ($r = -1$) ou positiva perfeita ($r = 1$), ou não ter correlação linear ($r = 0$). Para valores intermediários, os autores sugerem a seguinte análise de correlação: fraca (0,01 a 0,39), média (0,40 a 0,69); ou forte (0,70 a 0,99) (Hendges et al., 2020).

Portanto, com o intuito de se modelar o fluxo de calor no solo a partir de outras variáveis, fez-se correlação de Pearson para determinar a escolha das variáveis que seriam utilizadas no modelo, assim as variáveis que tiveram correlação significativa com o fluxo de calor no solo foram escolhidas para se fazer a regressão linear múltipla

(MLR). A escolha da regressão linear está conforme Loukili et al. (2008) e Votrubová et al. (2012), que apesar de existirem modelos não-lineares, modelos lineares conseguem de forma confiável reproduzir o comportamento termal do solo.

A variável que representa o fluxo de calor no solo aferido em campo (G) foi introduzida como variável dependente e as demais (T_{solo} a 0,1 e 0,05 m; T_{ar} ; UR_{ar} ; U_{solo} ; R_g ; e R_n) foram introduzidas como variáveis independentes. Para análises de correlação e modelagem MLR, foram utilizadas médias horárias mensais de cada variável, cujos dados foram fracionados entre período úmido e período seco, totalizando 576 dados amostrados (n). Os modelos de regressão foram obtidos usando o software SigmaPlot Versão 11.0 no modo linear múltipla e nível de significância estatística $p < 0,05$.

Resultados e discussão

Descrição do microclima

Conforme Figura 2, observa-se sazonalidade no R_n , R_g , T_{ar} , UR_{ar} , U_{solo} e Ppt

acumulada mensal no decorrer do ano de 2020. Com menores valores ocorrendo no período seco e maiores valores ocorrendo no período úmido. Os padrões observados de radiação global e, consequentemente de radiação líquida, estão de acordo com o padrão de radiação do Hemisfério Sul, em que as maiores médias ocorreram no mês de novembro, em torno de $333,2 \text{ W.m}^{-2}$, época do ano em que o Sol se aproxima do solstício de verão e de pouca nebulosidade. A precipitação acumulada anual foi de 783 mm.ano^{-1} durante o período de estudo, estando aproximadamente 42,5% abaixo da média de longo prazo para esta região (Dias et al., 2021). Neste período grande parte do Pantanal foi afetada por condições severas de seca com evidências de que a seca de 2020 foi a mais nos últimos 70 anos (Libonati et al., 2022), causada pela redução do transporte de ar quente e úmido do verão da Amazônia para o Pantanal, ocorrendo neste período a predominância de massas de ar mais quentes e secas provenientes de latitudes subtropicais, contribuindo para a escassez de chuvas de verão no pico da estação das monções (Marengo et al., 2021).

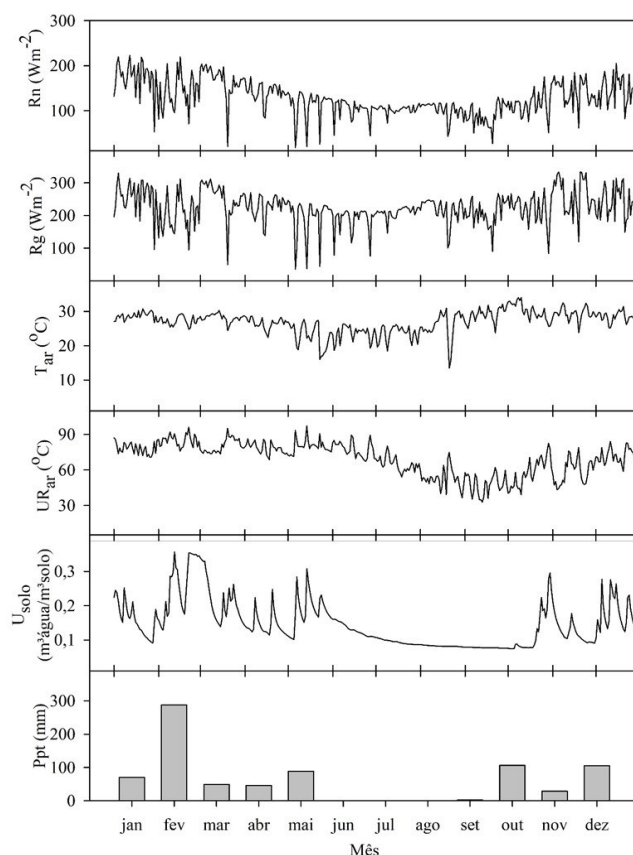


Figura 2. Médias diárias de saldo de radiação (R_n), radiação global (R_g), temperatura do ar (T_{ar}), umidade relativa do ar (UR_{ar}), umidade do solo (U_{solo}) a 0,1 m e precipitação acumulada mensal (Ppt), no período de janeiro a dezembro de 2020, no Pantanal-MT.

A maior média diária da umidade relativa do ar ocorreu em maio, com 97,15% e a menor em setembro, com 32,78%. Comparando-se com os dados de precipitação, a UR_{ar} diminui a partir do fim das chuvas do mês de maio, até atingir o seu menor valor, voltando a aumentar no mês de outubro, período em que evidencia o início das chuvas nessa região.

Os maiores valores de T_{ar} média diária ocorreram no mês de outubro, sendo 34,1 °C o maior valor observado para este mês. Durante setembro-novembro de 2020, os serviços meteorológicos do Brasil, Argentina, Peru, Paraguai e Bolívia relataram temperaturas máximas recordes em vários períodos de calor durante esta temporada. Neste período, uma onda de calor intensa durante a primeira metade de outubro e dois eventos de ondas de calor em novembro resultaram em temperaturas máximas diárias recordes em vários locais da região central da América do Sul. Alguns locais registaram temperaturas cerca de 10°C acima do normal e temperaturas máximas acima dos 40°C durante vários dias consecutivos. (Marengo et al., 2021). A menor temperatura do ano de 2020 ocorreu em agosto, 13,5 °C, devido a uma massa de ar fria polar. A ocorrência de frentes frias é comum durante todo o ano no Brasil, principalmente nas regiões sul e sudeste (Rodrigues et al., 2004). A maior variabilidade dos valores ocorre no período seco, uma vez que com a diminuição da disponibilidade de água na atmosfera, observada pela diminuição da umidade e a ausência de precipitação, aumenta-se a amplitude das variações de T_{ar} e UR_{ar} . O alto calor específico da água inibe variações bruscas de temperatura do ar, sendo necessária mais energia para elevar a temperatura do ar (Novais et al., 2013), justificando assim as maiores variações observadas. Em compensação, em períodos mais úmidos, a presença de água contribui para uma estabilidade maior nas médias de temperatura do ar. Outra explicação plausível é feita por De Carvalho et al. (2021), que em estudo nesse bioma, verificaram que a redução da T_{ar} ocorrera durante as estações outono e inverno (de março a setembro), período em que, geralmente, há menor incidência de radiação solar sobre o Hemisfério Sul.

O solo esteve mais úmido no mês de fevereiro e início do mês de março, estando 16 dias de fevereiro e 6 primeiros dias de março com umidade acima de 30%. Com o final da precipitação e do período úmido no mês de maio, a umidade do solo diminui até se estabilizar em torno de 12%, voltando a aumentar com as chuvas de

outubro. A presença contínua de uma massa de ar quente durante vários dias consecutivos em setembro e meados de outubro contribuiu para anomalias de temperatura e umidade relativa pronunciadas (Marengo et al., 2022) possivelmente reforçadas pela umidade extremamente baixa do solo observada nestes meses.

Analisando os dados meteorológicos registrados durante o ano de 2020, foi observado que as condições climáticas seguiram um padrão semelhante aos anos anteriores e subsequentes na região do Pantanal, caracterizando os períodos quente-úmido, seguido do frio-seco, que são típicos do Pantanal de Poconé-MT. Contudo, as variações observadas na precipitação total anual em comparação com outros anos, enfatizam a importância de estudar e compreender as mudanças climáticas e seus impactos nos ecossistemas alagados e em outras regiões semelhantes.

Temperatura, condutividade térmica e fluxo de calor no solo

Foram estimadas médias mensais da T_{solo} referente a cada hora do dia e para cinco diferentes profundidades, a partir de dados coletados ao longo dos meses de janeiro a dezembro de 2020, em área de pastagem, situada no Pantanal mato-grossense. Os valores expostos graficamente representam consequentemente o ciclo térmico diário médio dos respectivos meses. São apresentadas na Figura 3 as temperaturas das profundidades 0,05 m; 0,1 m; 0,3 m; 0,6 m ; e 1 m.

A maior temperatura média do solo de todo o estudo foi 35 °C, ocorrendo as 17 horas do mês de janeiro, na profundidade de 0,05 m. Já a menor temperatura média do solo foi 22,5 °C, ocorrendo as 11 horas do mês de junho. Logo, observa-se que tanto as maiores quanto as menores T_{solo} ocorreram na camada mais rasa do solo (0,05 m). Ao comparar com as demais, a superfície e regiões adjacentes possuem maior facilidade em ganhar e perder calor durante o ciclo diário. Os valores de temperatura superficial, 0,05 m, foram similares aos encontrados por Angelini et al. (2021) em área de Pantanal próxima por sensoriamento remoto, em que a temperatura média do solo oscilou entre 27°C e 34°C. A T_{solo} nas camadas superficiais varia de acordo com a incidência de radiação solar, tendo o valor máximo observado na altura de 0,05 m, no período com maior predominância energética. Quanto mais profundo os sensores, maior o atraso temporal nos picos de temperatura do solo.

Para o período seco, as maiores temperaturas do solo ocorreram em outubro, mesma época da seca extrema enfrentada pelo

Pantanal no período (Barbosa et al., 2022; Libonati et al., 2022; Costa et al., 2023; Cunha et al., 2023), devido a sistemas de alta pressão que geraram ondas de calor extremas, uma vez que mais energia

do Sol vai para o aquecimento da atmosfera em vez de evaporar a água inexistente no solo (Marengo et al., 2022).

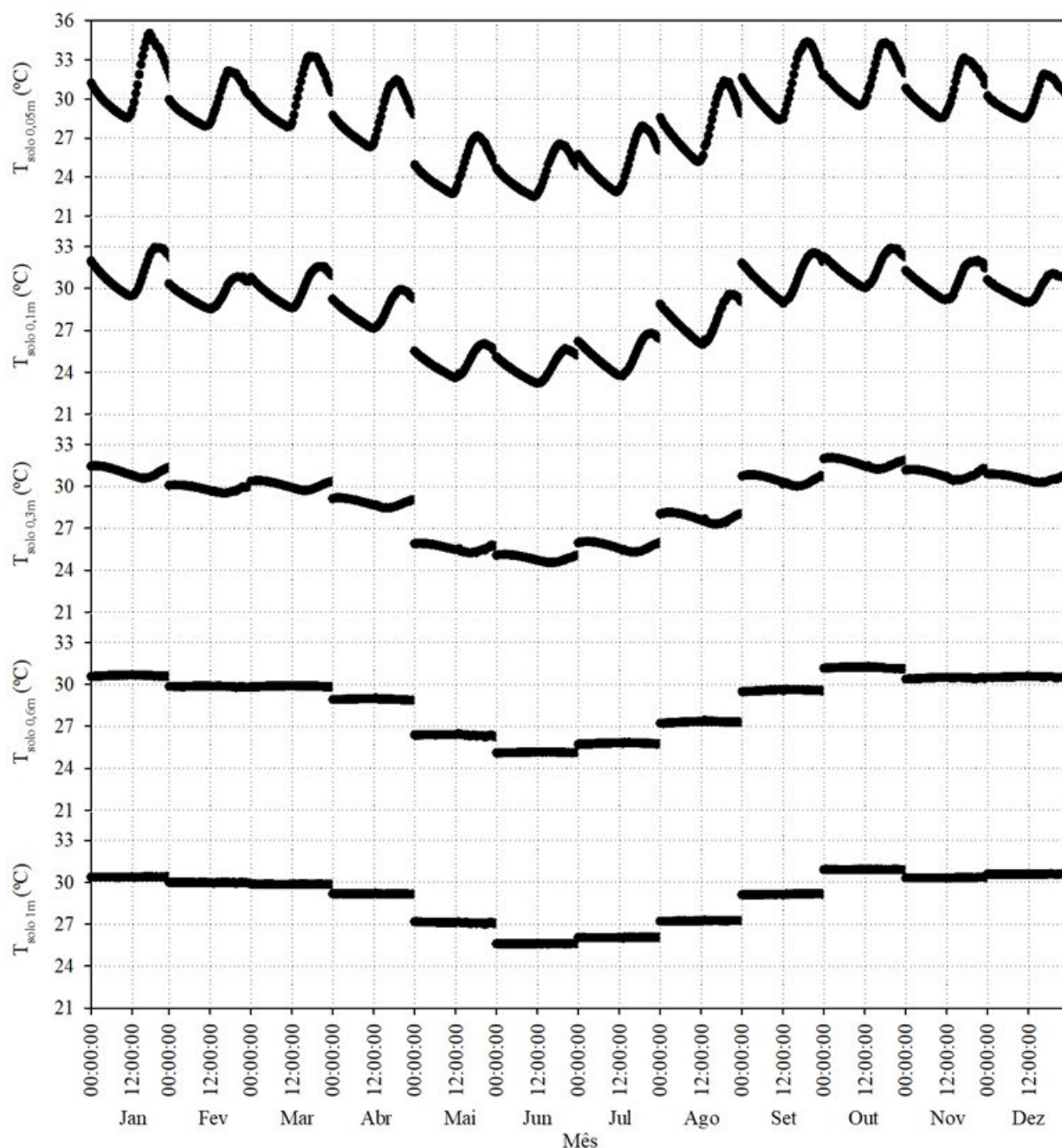


Figura 3. Variação média da temperatura do solo, nas profundidades 0,05 m, 0,1 m, 0,3 m, 0,6 m e 1 m, ao longo do dia nos meses de janeiro a dezembro de 2020, no Pantanal-MT.

Além dos efeitos do balanço de ondas curtas na T_{solo} , outro fator limitante para variação deste importante parâmetro do solo é a condição da superfície do solo, isto é, desprovido ou não de vegetação. Assim, destaca-se a pesquisa de Guilherme et al. (2020) realizada em uma zona urbana no bioma amazônico, em que foi constatado que áreas com índices de vegetação mais altos

apresentaram temperaturas de superfície mais baixas. Em outras palavras, há uma dinâmica negativa entre os valores de índices de vegetação e as temperaturas da superfície.

A seguir, na Figura 4 estão apresentados os resultados das médias da condutividade térmica do solo mensal e fluxo de calor no solo horário, no

período de 01/2020 até 12/2020, em área de pastagem, situada no Pantanal mato-grossense.

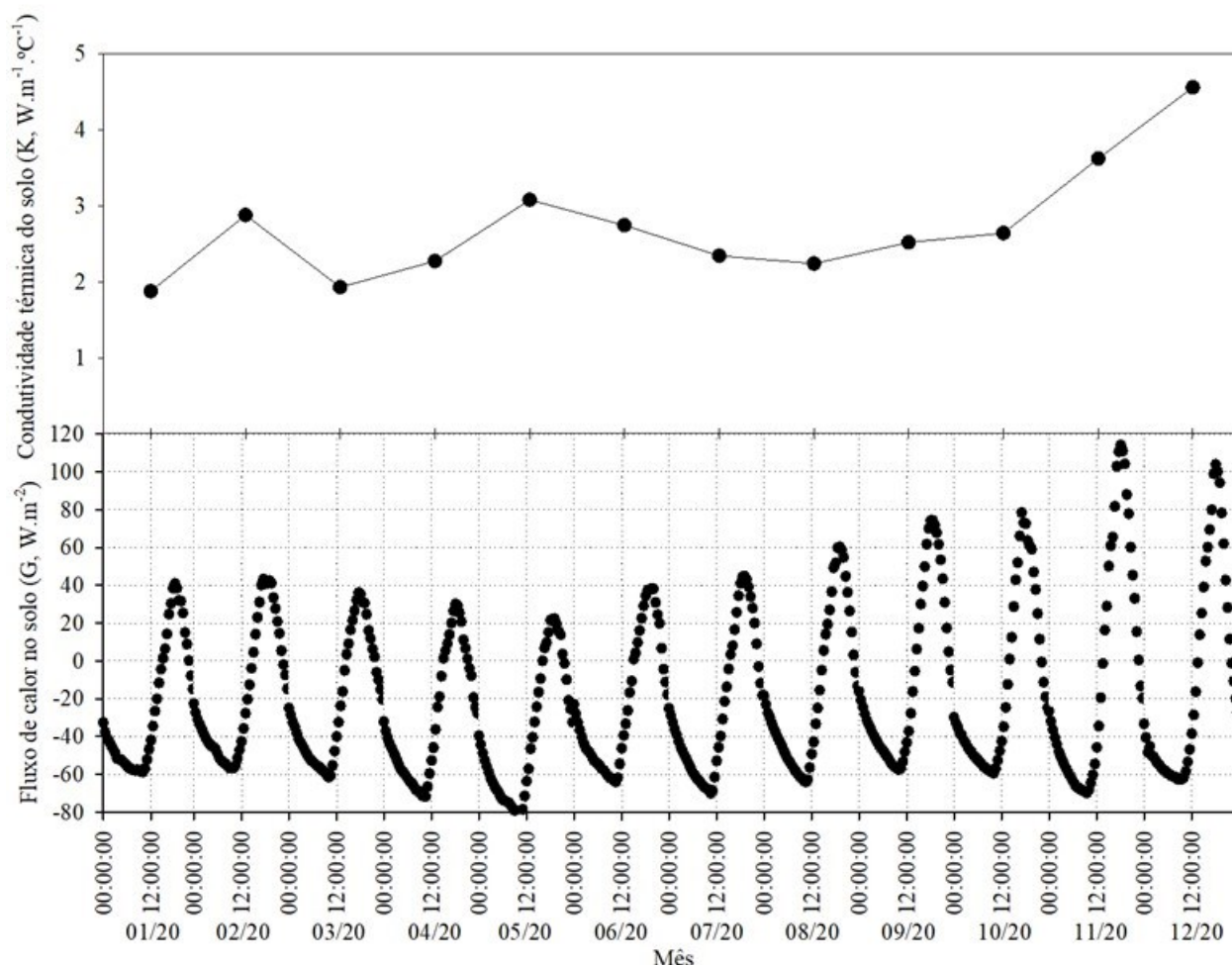


Figura 4. Média da condutividade térmica do solo mensal e fluxo de calor no solo horária, entre as profundidades 0,05 e 0,1 m, no período de janeiro a dezembro de 2020, em área de pastagem, situada no Pantanal-MT.

Analisando a Figura 4 observa-se que os valores médios mensais de condutividade térmica do solo foram maiores nos meses de novembro e dezembro de 2020, período úmido, sendo seu maior valor $4,56 \text{ W.m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}$, resultado semelhante ao encontrado por Novais et al. (2013) em estudo no mesmo bioma. O aumento da condutividade térmica pode ser atribuído à presença de água nos poros do solo, o que, por consequente, afetou a distribuição de energia no solo e levou a um aumento no fluxo de calor, fazendo com que os maiores valores de G também ocorressem durante estes meses, com valor máximo de 114 W.m^{-2} observado por volta das 18 horas do mês de novembro. A principal ocorrência de precipitação na região se concentra no período entre novembro e março, meses no qual o Pantanal recebe cerca de 70% da sua cota anual de chuva, o que resulta em maior condutividade térmica. Os espaços vazios, quando carregados de água, permitem maior fluxo

de calor por condução, que é a principal forma de transferência de calor no solo (Farouki, 1986; Novais et al., 2013). Entretanto, a menor média mensal do ano de 2020 ocorreu em janeiro, $1,88 \text{ W.m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}$, mesmo este sendo um mês considerado úmido. Apresenta-se duas razões possíveis para essa situação: a primeira é a ocorrência de um breve período sem chuvas que foi suficiente para secar o solo, conforme observado nos dados de U_{solo} apresentado na Figura 4; e a segunda é a presença de características edáficas desfavoráveis na área de estudo que dificultam a infiltração de água no solo (Couto et al., 2002). Além disso, de acordo com o estudo de Marques et al. (2021), há uma tendência de diminuição para a umidade do solo na porção central e no extremo noroeste do Pantanal, o que também pode ter contribuído para esta defasagem no valor da condutividade térmica do solo observada para a região de Poconé-MT.

Modelagem sazonal do fluxo de calor no solo

De modo a determinar se as variáveis climáticas e do solo se correlacionavam com o fluxo de calor no solo, fez-se o teste de correlação de Pearson, conforme Tabela 1 abaixo. Ressalta-se

que foram feitas 48 medições diárias (medições a cada 30 minutos) de cada variável independente, e a partir da média diária de cada variável ambiental, foi feita uma comparação com a medição diária do fluxo de calor no solo de referência para análise de correlação.

Tabela 1. Correlação de Pearson (r) entre o fluxo de calor no solo a 7,5 cm (G) e as variáveis ambientais temperatura do solo a 0,1m e 0,05m, temperatura do ar (T_{ar}), umidade relativa do ar (UR_{ar}), radiação global (R_g) e saldo de radiação (R_n), no período de janeiro a dezembro de 2020, no Pantanal-MT.

Úmido		$T_{solo\ 0,1m}$	$T_{solo\ 0,05m}$	T_{ar}	UR_{ar}	U_{solo}	R_g	R_n
G	r	0,439	0,679	0,882	-0,846	-0,0528	-0,244	-0,268
	p	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,335	<0,001	<0,001
	n	336	336	336	336	336	336	336

Seco		$T_{solo\ 0,1m}$	$T_{solo\ 0,05m}$	T_{ar}	UR_{ar}	U_{solo}	R_g	R_n
G	r	0,346	0,59	0,895	-0,849	-0,040	-0,365	-0,392
	p	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,538	<0,001	<0,001
	n	240	240	240	240	240	240	240

r = coeficiente de correlação; p = Significância; n = quantidade de dados analisados por período

Percebe-se pela Tabela 1, que o G e as variáveis temperatura do solo a 0,1 e 0,05 m, temperatura do ar e umidade relativa do ar apresentaram correlações positivamente significantes, tanto no período úmido (nov-mai) quanto no período seco (jun-out). De modo contrário, as variáveis umidade relativa do ar, umidade do solo e os componentes do balanço de energia foram negativamente correlacionados com o fluxo de calor no solo, em ambos os períodos avaliados, com $p > 0,05$ registrada para a U_{solo} , nos meses compreendidos como quente-úmido

(33,5%) e frio-seco (53,8%). Isso significa que a maioria das variáveis foram correlacionadas significativamente com o G , nas duas épocas do ano, exceto a umidade do solo. Desta forma, optou-se por retirá-la dos modelos e utilizar em um primeiro momento as variáveis restantes nas MLR, conforme resultados abaixo (Figura 5). A umidade do solo não foi significativamente correlacionada, pois os dados utilizados são horários, e a variação da umidade do solo ocorre em uma escala temporal maior que as outras variáveis.

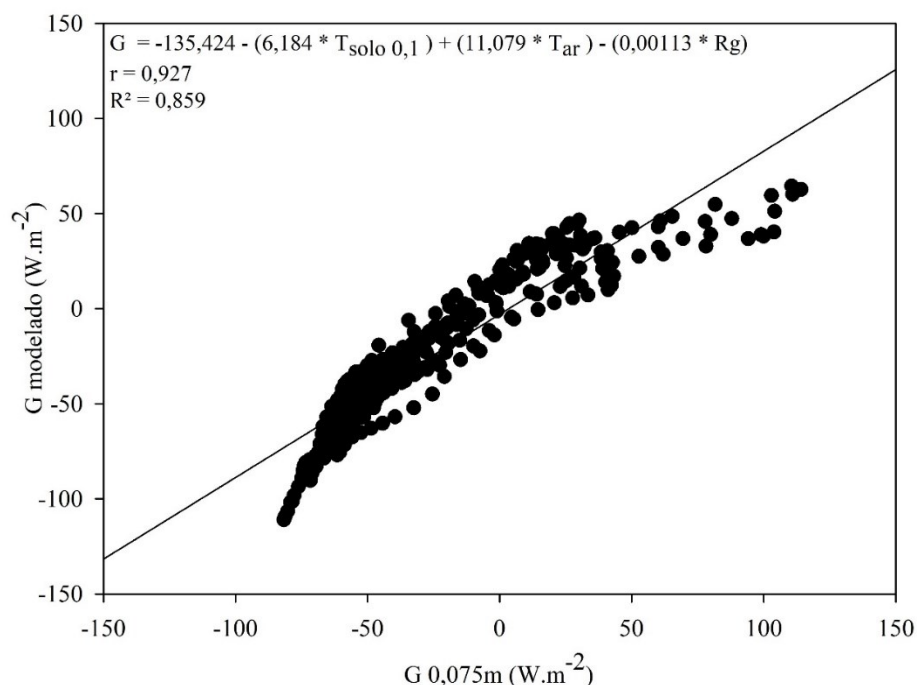


Figura 5. Regressão linear entre fluxo de calor no solo a 0,075 m e fluxo de calor no solo modelado por regressão múltipla usando as variáveis temperatura do solo a 0,1 e 0,05 m, temperatura do ar (T_{ar}), umidade relativa do ar (UR_{ar}), radiação global (R_g) e saldo de radiação (R_n). Coeficiente de correlação (r) e coeficiente de determinação (R^2), para o período chuvoso, no Pantanal-MT.

Ao analisar as significâncias dos coeficientes da regressão a um nível de $p < 0,05$, percebe-se que não foi significativo para as variáveis temperatura do solo a 0,05 m (22%), umidade relativa do ar (6,8%) e saldo de

radiação (5,8%). Assim, repetiu-se a regressão linear, retirando as variáveis que não foram significativas, conforme Figura 6.

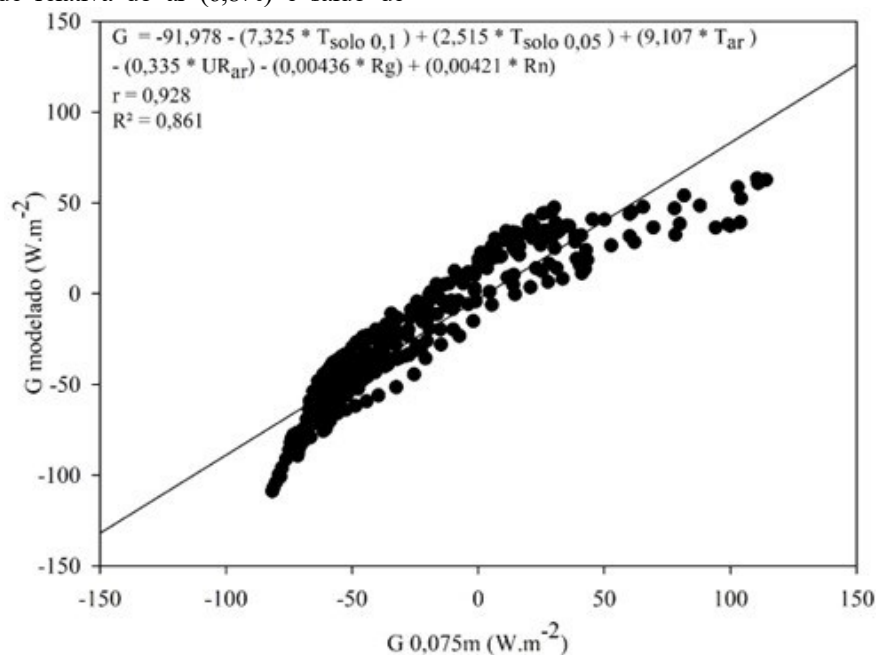


Figura 6. Regressão linear entre fluxo de calor no solo a 0,075 m e fluxo de calor no solo modelado por regressão múltipla usando as variáveis temperatura do solo a 0,1 m, temperatura do ar (T_{ar}) e radiação global (R_g). Coeficiente de correlação (r) e coeficiente de determinação (R^2), para o período chuvoso, no Pantanal-MT.

Ao se comparar os coeficientes de correlação r igual a 0,927, e coeficientes de determinação R^2 de 0,859

entre as regressões acima, percebe-se pouca diminuição dos valores dos coeficientes, assim o fluxo de calor no

solo para o período chuvoso pode ser modelado utilizando apenas as variáveis temperatura do solo a 0,1 m, temperatura do ar e radiação global.

Repetiu-se as regressões múltiplas para o período seco, conforme Figura 7 a seguir.

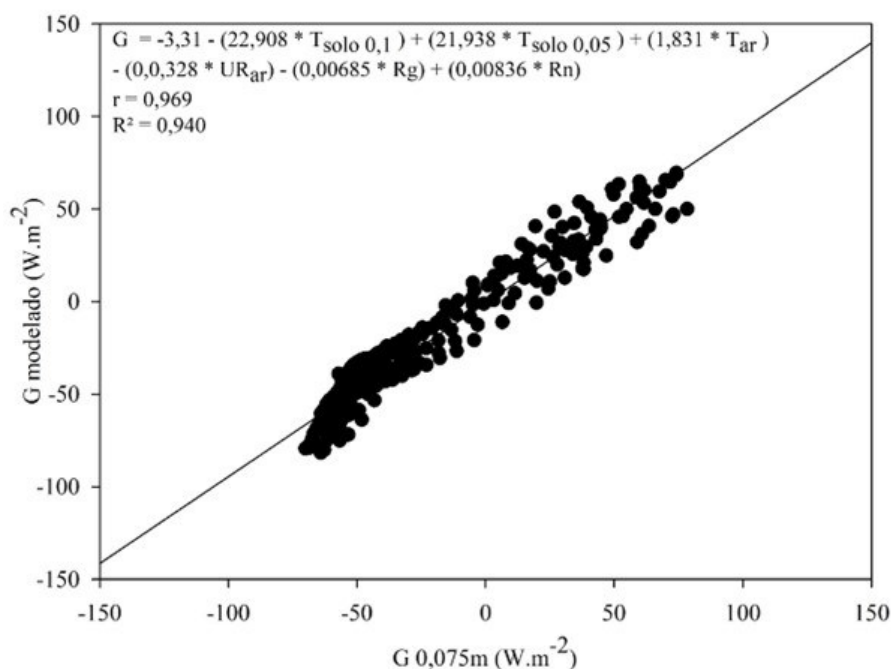


Figura 7. Regressão linear entre fluxo de calor no solo a 0,075 m e fluxo de calor no solo modelado por regressão múltipla usando as variáveis temperatura do solo a 0,1 m, temperatura do ar (T_{ar}) e radiação global (R_g). Coeficiente de correlação (r) e coeficiente de determinação (R^2), para o período seco, no Pantanal-MT.

Para o período seco todos os coeficientes da regressão linear múltipla foram significativos a uma significância de $p < 0,001$. Os coeficientes de correlação, r igual a 0,969 e de determinação, R^2 igual a 0,940 foram maiores do que os do período chuvoso ($r = 0,928$ e de determinação, $R^2 = 0,861$).

Apesar dos coeficientes da regressão serem significativos, repetiu-se a análise retirando as mesmas variáveis que a análise anterior, temperatura a 0,05 m, umidade relativa do ar e saldo de radiação, em que os resultados são mostrados a seguir na Figura 8.

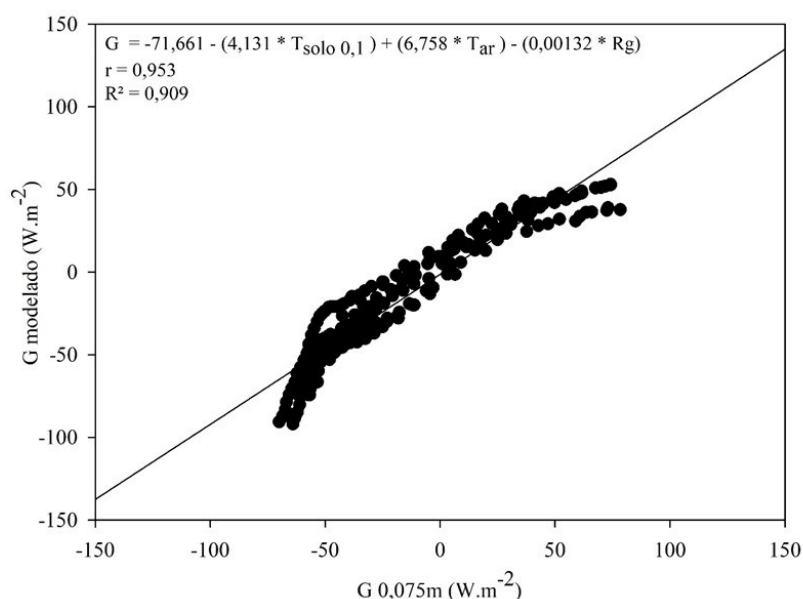


Figura 8. Regressão linear entre fluxo de calor no solo a 0,075 m e fluxo de calor no solo modelado por regressão múltipla usando as variáveis temperatura do solo a 0,1 m, temperatura do ar (T_{ar}) e radiação global (R_g). Coeficiente de correlação (r) e coeficiente de determinação (R^2), para o período seco, no Pantanal-MT.

Os coeficientes da regressão da Figura 8 continuaram sendo significativos a $p < 0,05$ e novamente ao se comparar a regressão com todas as variáveis do período seco, percebe-se pouca diminuição do coeficiente de determinação e correlação. Desta forma, também para o período seco, de forma a se fazer um modelo mais simples, dependente de menos variáveis, também optou-

se por utilizar apenas as variáveis preditoras temperatura do ar, temperatura do solo a 0,1 m e radiação global.

Assim, seguem na Tabela 2 os modelos completos e simplificados, para ambos os períodos, com seus respectivos coeficientes de determinação e correlação.

Tabela 2. Regressões lineares múltiplas do fluxo de calor no solo de referência com as variáveis preditoras temperatura do solo a 0,1 e 0,05 m, temperatura do ar (T_{ar}), umidade relativa do ar (UR_{ar}), radiação global (R_g) e saldo de radiação (R_n), no período de janeiro a dezembro de 2020, no Pantanal-MT.

Período	Modelo	R^2	r
Chuvoso ¹	$G = -91,978 - (7,325 * T_{solo\ 0,1}) + (2,515 * T_{solo\ 0,05}) + (9,107 * T_{ar}) - (0,335 * UR_{ar}) - (0,00436 * R_g) + (0,00421 * R_n)$	0,861	0,928
Chuvoso ²	$G = -135,424 - (6,184 * T_{solo\ 0,1}) + (11,079 * T_{ar}) - (0,00113 * R_g)$	0,859	0,927
Seco ¹	$G = -3,31 - (22,908 * T_{solo\ 0,1}) + (21,938 * T_{solo\ 0,05}) + (1,831 * T_{ar}) - (0,0328 * UR_{ar}) - (0,00685 * R_g) + (0,00836 * R_n)$	0,940	0,969
Seco ²	$G = -71,661 - (4,131 * T_{solo\ 0,1}) + (6,758 * T_{ar}) - (0,00132 * R_g)$	0,909	0,953

¹ e ² = indica o modelo predito por período; R^2 = coeficiente de determinação; r = coeficiente de correlação

Conforme observa-se na Tabela 2, tanto no período úmido quanto no período seco, o fluxo de calor no solo e as variáveis preditivas foram diretamente proporcionais. Com destaque para o período de estiagem, em que o coeficiente de correlação de Pearson foi maior, nas duas análises, que no período chuvoso ($r = 0,969$ e $r = 0,953$). Com isso, pode-se dizer que à medida que as variáveis independentes aumentam, o fluxo de calor no solo também aumenta. Além disso, a análise reduzida dos dados permitiu observar, também para o período seco², um valor satisfatório para o coeficiente de determinação ($R^2 = 0,909$), o que indica que 90,9% da variação do fluxo de calor no solo de referência foi explicada pela variação das variáveis temperatura do solo a 0,1 m, temperatura do ar e radiação global, considerando o modelo de regressão linear utilizado.

Conclusões

Caracterizou-se o comportamento termal do solo de uma pastagem sazonalmente alagada no Pantanal mato-grossense, analisando as variações horárias da temperatura do solo para profundidades de até 1 m, e determinando a média mensal da condutividade térmica durante o ano de 2020. Também foram elaborados modelos sazonais lineares multivariados de fluxo de calor no solo, e a partir da comparação dos resultados

modelados com dados medidos de campo, conclui-se que este tipo de modelagem pôde reproduzir com boa aproximação o comportamento do fluxo de calor no solo, para períodos de solo úmido e seco, utilizando as variáveis temperatura do ar, temperatura do solo e radiação global, para qualquer momento do dia. Estes resultados serão úteis para propósitos agrometeorológicos em regiões tropicais, bem como modelos de balanço de energia e mudanças climáticas.

Agradecimentos

A Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Mato Grosso - FAPEMAT, pelo suporte no desenvolvimento da pesquisa (processo n. 0194288/2017).

Referências

- Abdalla, B.S., Sanches, L., Andrade, N.L.R., 2023. Análise do perfil vertical da temperatura do ar e do solo utilizando componentes principais e geostatística em floresta no Sudoeste da Amazônia. *Revista Brasileira de Geografia Física* [online]. Disponível: doi <https://doi.org/10.26848/rbgf.v16.6.p3560-3571>. Acesso: 20 jan. 2024.
- Alvares, C.A., Stape, J.L., Sentelhas, P.C., Gonçalves, J.D.M., Sparovek, G., 2013. Köppen's climate classification map for

- Brazil. Meteorologische Zeitschrift [online] 22. Disponível: doi 10.1127/0941-2948/2013/0507. Acesso: 07 jul. 2021.
- Angelini, L. P., Biudes, M. S., Machado, N. G., Geli, H. M., Vourlitis, G. L., Ruhoff, A., & Nogueira, J. D. S. 2021. Surface Albedo and temperature models for surface energy balance fluxes and evapotranspiration using SEBAL and Landsat 8 over Cerrado-Pantanal, Brazil. *Sensors*. Disponível: <https://doi.org/10.3390/s21217196>. Acesso: 20 jan. 2024.
- Araújo, R.L.C.D., Silva, R.M.D., Carvalho, J.D.S., Monteiro, I.B., 2004. Influência ambiental sobre a estrutura geotermal rasa. *Revista Brasileira de Geofísica* [online] 22. Disponível: <https://doi.org/10.1590/S0102-261X2004000100003>. Acesso: 21 out. 2022.
- Barbosa, F. M. L., Haddad, I., Nascimento, S. A. L., Silva, M. G., Veiga, M. R., Hoffmann, T. B., ... & Oighenstein Anderson, L. 2022. Compound impact of land use and extreme climate on the 2020 fire record of the Brazilian Pantanal. *Global Ecology and Biogeography* [online]. Disponível: <https://doi.org/10.1111/geb.13563>. Acesso: 20 jan. 2024.
- Caldas, M.M, Goodin D., Sherwood S., Krauer J.M.C, Wisely S.M., 2015. Land-cover change in the Paraguayan Chaco: 2000-2011. *Journal of Land Use Science* [online] 10. Disponível: doi 10.1080/1747423X.2013.807314. Acesso: 04 mar. 2023.
- Carslaw, H.S., Jaeger, J.C. (1959). *Conduction of heat in solids*. Londres: Oxford University Press.
- Costa, C. M., Marengo, J. A., Alves, L. M., & Cunha, A. P. 2023. Multiscale analysis of drought, heatwaves, and compound events in the Brazilian Pantanal in 2019–2021. *Theoretical and Applied Climatology*, 1-17. Disponível: 10.1007/s00704-023-04655-2. Acesso: 20 jan. 2024.
- Couto, E.G. et al., 2002. Guide of technique excursion of the XIV RBMCSA. In: *Reunião Brasileira de Manejo e Conservação do Solo e da Água*. 14., Cuiabá: UFMT.
- Cunha, A.P.M.A., Buermann, W., Marengo, J.A., 2023. Changes in compound drought-heat events over Brazil's Pantanal wetland: an assessment using remote sensing data and multiple drought indicators. *Climate Dynamics*. Disponível: <https://doi.org/10.1007/s00382-023-06937-x>. Acesso: 20 jan. 2024.
- Curado, L.F.A., Rodrigues, T.R., Oliveira, A.G.D., Novais, J.W.Z., Paulo, I.J.C.D., Biudes, M.S., Nogueira, J.D.S., 2013. Analysis of thermal conductivity in a seasonal flooded forest in the northern Pantanal. *Revista Brasileira de Meteorologia* [online] 28. Disponível: <https://doi.org/10.1590/S0102-77862013000200001>. Acesso: 21 out. 2022.
- Dalmagro, H.J., Souza, P.J., Engelbrecht, M.M., Arruda, P.H., Sallo, F.D.S., Vourlitis, G.L., ... Couto, E.G., 2022. Net carbon dioxide exchange in a hyperseasonal cattle pasture in the northern Pantanal wetland of Brazil. *Agricultural and Forest Meteorology* [online] 324. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2022.109099>. Acesso: 11 mar. 2023.
- De Carvalho, A.C.X., Justi, A.C.A.A., Sanches, L., Nogueira, J.S., 2021. Influência da Temperatura do ar, Umidade Relativa do ar e Precipitação na Produção de Serrapilheira no Norte do Pantanal Mato-Grossense. *Revista Brasileira de Climatologia* [online] 29. Disponível: <http://dx.doi.org/10.5380/rbclima.v29i0.70878>. Acesso: 20 mar. 2023.
- Dias, O., Silva, P., Piedade, A., Souza, P., Ramirez, G., 2021. Produtividade e Custo Operacional Efetivo de uma Propriedade Rural da Rede de Fazendas Alfa do Agrihub. *Agrarian Academy* [online] 8. Disponível: <https://conhecer.org.br/ojs/index.php/agrarian/article/view/5415>. Acesso: 15 mar. 2023.
- Farouki, O.T. (1986). *Thermal properties of soils*. Clausthal-Zellerfeld, Germany: Trans Tech.
- Foken, T. 2008. The energy balance closure problem: An overview. *Ecological Applications* [online] 18. Disponível: doi 10.1890/06-0922.1. Acesso: 21 out. 2022.
- Fundación Amigos de la Naturaleza (FAN) (2020). *Incendios transfronterizos y dinámica del fuego en el Pantanal*. Santa Cruz: Santa Cruz de la Sierra.
- Gao, Z., Russell, E.S., Missik, J.E., Huang, M., Chen, X., Strickland, C. E., ... Liu, H., 2017. A novel approach to evaluate soil heat flux calculation: An analytical review of nine methods. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* [online] 122. Disponível: <https://doi.org/10.1002/2017JD027160>. Acesso: 03 abr. 2023.
- Guo, Z., Wang, X., Fan, D., 2021. Ecosystem functioning and stability are mainly driven by stand structural attributes and biodiversity, respectively, in a tropical forest in

- Southwestern China. Forest Ecology and Management 481, 118696. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118696>
- Girard, P., Fantin-Cruz, I., Oliveira, S.M.L. Hamilton, S., 2010. Small-scale spatial variation of inundation dynamics in a floodplain of the Pantanal (Brazil). Hydrobiologia [online] 638. Disponível: <https://doi.org/10.1007/s10750-009-0046-9>. Acesso: 05 mar. 2023.
- Guilherme, A.P., Biudes, M.S., Mota, D.D.S., Musis, C.R.D., 2020. Relação entre tipo de cobertura do solo e temperatura de superfície. Sociedade & Natureza [online] 32. Disponível: <https://doi.org/10.14393/SN-v32-2020-47462>. Acesso: 13 mar. 2023.
- Hair, Jr.J.F., Anderson, R.E., Tatham, R.L., Black, W.C. (1998). Multivariate Data Analysis. Fifth edition. New Jersey: Prentice Hall.
- Hendges, E.R., Follador, F.A.C., Andres, J., 2020. Estudo de correlação entre o uso e cobertura da terra com a temperatura de superfície registrada pelo satélite Landsat 8. Sociedade & Natureza [online] 32. Disponível: <https://doi.org/10.14393/SN-v32-2020-42828>. Acesso: 12 mar. 2023.
- Higa, L., Marcato Junior, J., Rodrigues, T., Zamboni, P., Silva, R., Almeida, L., Liesenberg, V., Roque, F., Libonati, R., Gonçalves, W.N., Silva, J., 2022. Active Fire Mapping on Brazilian Pantanal Based on Deep Learning and CBERS 04A Imagery. Remote Sens [online] 14. Disponível: <https://doi.org/10.3390/rs14030688>. Acesso: 05 mar. 2023.
- Johnson, R.A., Wichern, D.W. (1998). Applied Multivariate Analysis. Fourth edition. New Jersey: Prentice Hall.
- Lázaro, W. L., Oliveira-Júnior, E. S., Silva, C. J. D., Castrillon, S. K. I., & Muniz, C. C. 2020. Climate change reflected in one of the largest wetlands in the world: an overview of the Northern Pantanal water regime. Acta Limnologica Brasiliensia [online], 32. Disponível: <https://doi.org/10.1590/S2179-975X7619>. Acesso: 20 jan. 2024.
- Klink, C.A., Machado, R.B., 2005. Conservation of the Brazilian Cerrado. Conservation biology [online] 19. Disponível: <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2005.00702.x>. Acesso: 11 mar. 2023.
- Küster, I.S., Alexandre, R.S., Arantes, S.D., Schmildt, E.R.S., Arantes, L.D.O., Klem, D.L.B., 2018. Phenotypic correlation between leaf characters and physical and chemical aspects of cv. Vitória pineapple fruit. Revista Brasileira de Fruticultura [online] 40. Disponível: <https://doi.org/10.1590/0100-29452018964>. Acesso: 12 mar. 2023.
- Liang, J., Zhang, L., Cao, X., Wen, J., Wang, J., Wang, G., 2017. Energy balance in the semiarid area of the Loess Plateau, China. Journal of Geophysical Research: Atmospheres [online] 122. Disponível: <https://doi.org/10.1002/2015JD024572>. Acesso: 03 abr. 2023.
- Libonati, R., Geirinhas, J. L., Silva, P. S., Russo, A., Rodrigues, J. A., Belém, L. B., ... & Trigo, R. M. (2022). Assessing the role of compound drought and heatwave events on unprecedented 2020 wildfires in the Pantanal. Environmental Research Letters, 17(1), 015005. Disponível: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac462e>. Acesso: 20 jan. 2024.
- Loukili, Y., Woodbury, A.D., Snelgrove, K.R., 2008. SABAE-HW: An enhanced water balance prediction in the Canadian Land Surface Scheme compared with existing models. Vadose Zone Journal [online] 7. Disponível: <https://doi.org/10.2136/vzj2007.0081>. Acesso: 31 out. 2022.
- Marengo, J. A., Cunha, A. P., Cuartas, L. A., Deusdará Leal, K. R., Broedel, E., Seluchi, M. E., ... & Bender, F. 2021. Extreme drought in the Brazilian Pantanal in 2019–2020: characterization, causes, and impacts. Frontiers in Water [online], 3, 639204. Disponível: <https://doi.org/10.3389/frwa.2021.639204>. Acesso: 20 jan. 2024.
- Marengo, J. A., Ambrizzi, T., Barreto, N., Cunha, A. P., Ramos, A. M., Skansi, M., ... & Salinas, R. (2022). The heat wave of October 2020 in central South America. International Journal of Climatology [online], 42(4), 2281–2298. Disponível: <https://doi.org/10.1002/joc.7365>. Acesso: 20 jan. 2024.
- Marques, J.F., Alves, M.B., Silveira, C.F., Silva, A.A., Silva, T.A., Santos, V.J., Calijuri, M.L., 2021. Fires dynamics in the Pantanal: Impacts of anthropogenic activities and climate change. Journal of Environmental Management [online] 299. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113586>. Acesso: 10 mar. 2023.
- Novais, J.W.Z., Rodrigues, T.R., Curado, L.F.A., Oliveira, A.G., Paulo, S.R.D., Nogueira, J.D.S., 2012. Variabilidade sazonal horária das propriedades térmicas em gleissolo háplico no norte do pantanal. Semina: Ciências Agrárias

- [online] 33. Disponível: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=445744117009>. Acesso: 21 out. 2022.
- Novais, J.W.Z., Rodrigues, T.R., Curado, L.F.A., Oliveira, A.G., Paulo, S.R.D., Nogueira, J.S., Oliveira, R.G., 2013. Geothermal dynamics in *Vochysia divergens* forest in a Brazilian Wetland. *Air, Soil and Water Research* [online] 6. Disponível: <https://doi.org/10.4137/ASWR.S11364>. Acesso: 21 out. 2022.
- Novais, J.W.Z., Sallo, F.S., Pierangeli, M.A.P., Pinto Junior, O.B., Batista, D.S., Andrade, L.P., 2023. Evaluating Soil Carbon Efflux Responses to Soil Moisture and Temperature Variations in Brazilian Biomes. *Global Journal of Human Social Sciences*. Disponível: <http://dx.doi.org/10.17406/GJHSS>. Acesso: 20 jan. 2024.
- Pott, A., & Pott, V. J. 2004. Features and conservation of the Brazilian Pantanal wetland. *Wetlands Ecology and Management*, 12, 547-552.
- Priante-Filho, N., Vourlitis, G.L., Hayashi, M.M.S., Nogueira, J.D.S., Campelo Jr.J.H., Nunes, P.C., ... Silveira, M., 2004. Comparison of the mass and energy exchange of a pasture and a mature transitional tropical forest of the southern Amazon Basin during a seasonal transition. *Global Change Biology* [online] 10. Disponível: <https://doi.org/10.1111/j.1529-8817.2003.00775.x>. Acesso: 03 abr. 2023.
- Primack, R. B., and Vidal, O. (2019). *Introducción a la Biología de la Conservación*. México: FCE; Colección: Ediciones Científicas Universitarias.
- Ribeiro, K. F. A., Justi, A. C. A., Novais, J. W. Z., de Moura Santos, F. M., Nogueira, M. C. D. J. A., Miranda, S. A., & Marques, J. B. 2022. Calibration of the Physiological Equivalent Temperature (PET) index range for outside spaces in a tropical climate city. *Urban Climate*, [online] 44. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2022.101196>. Acesso: 20 jan. 2024.
- Rodrigues, M.L.G., Franco, D., Sugahara, S., 2004. Climatologia de frentes frias no litoral de Santa Catarina. *Revista Brasileira de Geofísica* [online] 22. Disponível: <https://doi.org/10.1590/S0102-261X2004000200004>. Acesso: 09 dez. 2022.
- Rodrigues, T.R., de Paulo, S.R., Novais, J.W., Curado, L.F., Nogueira, J.S., de Oliveira, R.G., ... Vourlitis, G.L., 2013. Temporal patterns of energy balance for a Brazilian tropical savanna under contrasting seasonal conditions. *International Journal of Atmospheric Sciences* [online] 2013. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1155/2013/326010>. Acesso: 04 mai. 2023.
- Roque, F.O., Ochoa-Quintero, J., Ribeiro, D.B., Sugai, L.S.M., Costa-Pereira, R., Lourival, R., Bino, G., 2016. Upland habitat loss as a threat to Pantanal wetlands. *Conservation Biology* [online] 30. Disponível: <http://www.jstor.org/stable/24760914>. Acesso: 04 mar. 2023.
- Schuartz, Y. N. H., de Moraes Danelichen, V. H., Pereira, O. A., Felipe, R., & da Silva, B. 2021. Avaliação da precipitação estimada por sensor orbital no Pantanal Mato-Grossense. *Revista Brasileira de Geografia Física* [online]. Disponível: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v14.5.p2700-2710>. Acesso: 20 jan. 2024.
- Sousa, Á., 2019. Coeficiente de correlação de Pearson e coeficiente de correlação de Spearman: o que medem e em que situações devem ser utilizados?. *Correio dos Açores*, 19-19. Disponível: <http://hdl.handle.net/10400.3/5365>. Acesso: 12 mar. 2023.
- Thielen, D., Schuchmann, K.L., Ramoni-Perazzi, P., Marquez, M., Rojas W., Quintero, J.I., Marques, M.I., 2020. Quo vadis Pantanal? Expected precipitation extremes and drought dynamics from changing sea surface temperature. *PLOS ONE* [online]15. Disponível: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0227437>. Acesso: 05 mar. 2023.
- Thielen, D., Ramoni-Perazzi, P., Puche, M. L., Márquez, M., Quintero, J. I., Rojas, W., ... & Libonati, R. (2021). The Pantanal under siege—On the origin, dynamics and forecast of the megadrought severely affecting the largest wetland in the world. *Water* [online]. Disponível: <https://doi.org/10.3390/w13213034>. Acesso: 20 jan. 2024.
- Tomas, W.M., Roque F.O., Morato R.G. et al., 2019. Sustainability Agenda for the Pantanal Wetland: Perspectives on a Collaborative Interface for Science, Policy, and Decision-Making. *Tropical Conservation Science* [online] 12. Disponível: <https://doi.org/10.1177/1940082919872634>. Acesso: 05 mar. 2023.

- Turkman, M.A.A., Silva, G.L. (2000). Modelos Lineares Generalizados-da teoria à prática. Sociedade Portuguesa de Estatística, Lisboa.
- Votrubová, J., Dohnal, M., Vogel, T., Tesař, M., 2012. On parameterization of heat conduction in coupled soil water and heat flow modelling. *Soil and Water Research* 7, 125-137.
- Wang, L., Gao, Z., Horton, R., 2010. Comparison of six algorithms to determine the soil apparent thermal diffusivity at a site in the loessplateau of China. *Soil Science* [online] 175. Disponível: doi 10.1097/SS.0b013e3181cdda3f. Acesso: 03 abr. 2023.
- Waroux, Y.L.P., Garrett, R.D., Heilmayr, R., Lambin, E.F., 2016. Land-use policies and corporate investments in agriculture in the Gran Chaco and Chiquitano. *Proceedings of the National Academy of Sciences* [online] 113. Disponível: <https://doi.org/10.1073/pnas.1602646113>. Acesso: 04 mar. 2023.
- Yan, Y., Wang, J., Tian, D., Luo, Y., Xue, X., Peng, F., ... & Niu, S. (2022). Sustained increases in soil respiration accompany increased carbon input under long-term warming across global grasslands. *Geoderma* [online] 428. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.116157>. Acesso: 20 jan. 2024.
- Yang, Y., Li, T., Pokharel, P., Liu, L., Qiao, J., Wang, Y., ... & Chang, S. X., 2022. Global effects on soil respiration and its temperature sensitivity depend on nitrogen addition rate. *Soil Biology and Biochemistry* [online] 174. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2022.108814>. Acesso: 20 jan. 2024.
- Yanosky, A., 2013. Paraguay's challenge of conserving natural habitats and biodiversity with global markets demanding for products. In: Navjot S. Sodhi, *Conservation biology: Voices from the tropics*, L. and P. Raven (eds.). First Edition. John Wiley & Sons Ltd., 113-119. Disponível: <https://doi.org/10.1002/9781118679838.ch14>. Acesso: 04 mar. 2023.
- Zucareli, V., Esteves Amaro, A.C., Silvério, E.V., Ferreira, G., 2010. Métodos de superação da dormência e temperatura na germinação de sementes de *Dioclea violácea*. *Semina: Ciências Agrárias* [online] 31. Disponível: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=445744099021>. Acesso: 21 out. 2022.