

## XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

### **Controladores climáticos da evapotranspiração: Tendências em área de Cerrado em região central de São Paulo**

*Luiza Jardim Machado<sup>1</sup>; Heitor de Sousa Pantarotto<sup>2</sup>; Samuel Almeida Dutra Júnior<sup>3</sup> & Jamil Alexandre Ayach Anache<sup>4</sup>*

**Abstract:** Evapotranspiration (ET) is a fundamental hydrological process, intrinsically linked to the carbon cycle and sensitive to meteorological dynamics and environmental changes. To understand this sensitivity, this study quantified the magnitude of trends in ET and CO<sub>2</sub> flux, as well as investigated the trends of climatic controls on reference evapotranspiration (ET<sub>0</sub>) in a preserved Cerrado area between 2018 and 2021. Results revealed a significant reduction in ET, by 0.7 mm/year in the wet season and 2.5 mm/year in the dry season, which contrasts with the increase observed in humid tropical forests, indicating hydric limitations in the ecosystem. Mean temperature in the dry season showed a notable decline of 2.5 °C/year, accompanied by decreases in relative and absolute humidity, corroborating a trend towards a drier climate in the region. CO<sub>2</sub> flux exhibited a significant increase, particularly in the dry season (70.6 μmol m<sup>-2</sup> year<sup>-1</sup>), suggesting a possible weakening of the Cerrado's role as a carbon sink. Sensitivity analysis of ET<sub>0</sub> indicated that, in the wet season, wind speed was the most influential factor (5.25% contribution). In the dry season, however, net radiation dominated (25.48%), highlighting ET<sub>0</sub>'s energy dependence. Although the time series is short, this study provides valuable insights into the Cerrado's resilience and the complex mechanisms controlling water flow in this important biome.

**Resumo:** A evapotranspiração (ET) é um processo hidrológico fundamental, intrinsecamente ligado ao ciclo do carbono e sensível às dinâmicas meteorológicas e às mudanças ambientais. Para entender a sensibilidade, este estudo quantificou a magnitude das tendências na ET, no fluxo de CO<sub>2</sub> e nas variáveis climáticas, bem como, investigou as tendências de controles climáticos na evapotranspiração de referência ET<sub>0</sub> em uma área preservada de Cerrado *sensu stricto*, no período de 2018 a 2021. Os resultados revelaram uma redução significativa na ET, de 0,7 mm ano<sup>-1</sup> no período úmido e 2,5 mm/ano no período seco, o que contrasta com o aumento observado em florestas tropicais úmidas, indicando limitações hídricas no ecossistema. A temperatura média no período seco apresentou um declínio de 2,5 °C/ano, acompanhado por decréscimos na umidade relativa e absoluta, corroborando a tendência de um clima mais seco na região. O fluxo de CO<sub>2</sub> mostrou um aumento expressivo, principalmente na estação seca (70,6 μmol m<sup>-2</sup> ano<sup>-1</sup>), sugerindo um possível enfraquecimento do Cerrado como sumidouro de carbono. A análise de sensibilidade da ET<sub>0</sub> indicou que, no período úmido, a velocidade do vento foi o fator mais influente (5,25% de contribuição). Já no período seco, a radiação líquida dominou (25,48%), evidenciando a dependência energética da ET<sub>0</sub>. Embora a série temporal seja curta, este estudo fornece insights sobre a resiliência do Cerrado e os mecanismos complexos que controlam o fluxo de água neste importante bioma.

**Palavras-Chave** – Evapotranspiração de referência, Cerrado, Remoção de tendências

Afiliação<sup>1,2,3,4</sup>: Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento. Av. Trab. Sancarlense, 400 - Parque Arnold Schmidt, São Carlos – SP, 13556-590, luizaljm@gmail.com<sup>1</sup>, heitor.pantarotto@usp.br<sup>2</sup>, samueldutrajr@usp.br<sup>3</sup>, jamil.anache@usp.br<sup>4</sup>.

## INTRODUÇÃO

A evapotranspiração (ET) representa um componente fundamental do ciclo hidrológico, desempenhando papel crucial na manutenção dos fluxos de água, no balanço hídrico e na regulação climática regional e está intimamente ligada ao ciclo do carbono (Santos et al., 2004; Jasechko et al., 2013). Esse processo resulta da transferência de água da superfície terrestre, somando a evaporação da água do solo e da transpiração das plantas, ambos altamente sensíveis às condições meteorológicas (Wang e Dickinson, 2012). Estudos recentes têm revelado mudanças significativas nas taxas de ET em diversas regiões do globo, motivados por fatores como o aquecimento global, variabilidade na radiação solar, alterações nos regimes de precipitação, umidade relativa, padrões de ventos e mudanças de uso e cobertura da terra (Valipour et al., 2020; de Oliveira et al., 2021; Hofmann et al., 2023; Yang et al., 2023). Essas transformações podem comprometer a disponibilidade hídrica, com implicações diretas sobre os sistemas ecológicos, agrícolas e energéticos, afetando a segurança hídrica nos nexos entre água, energia e alimento (ANA, 2024).

No contexto do Cerrado brasileiro, a diversidade de formações vegetais, que vão de campos abertos a savanas arborizadas e florestas, confere ao bioma um papel estratégico na regulação hídrica, visto que abriga áreas de recarga de aquíferos e nascentes de grandes bacias hidrográficas (Ribeiro; Walter, 2008; Giambelluca et al., 2009; Sano et al., 2019). Essa heterogeneidade estrutural influencia não apenas os processos hidrológicos, mas também os fluxos de carbono (Butler et al., 2012; Pennington et al., 2018). Dessa forma, a investigação de áreas preservadas do Cerrado é essencial, não apenas para compreender os padrões naturais de trocas de água e carbono, bem como para detectar possíveis tendências temporais nesses fluxos (Anache et al., 2024). Contudo, os mecanismos e processos por trás dos controles climáticos nos fluxos são complexos.

No bioma, estudos demonstram padrões variados e complexos. Hofmann et al. (2021) observaram que o Cerrado tem se tornado mais quente e seco nas últimas décadas, com tendências de aumento nas temperaturas ( $2,2 - 4,0^{\circ}\text{C}$ ) na umidade relativa em aproximadamente 15%. O clima mais quente e seco influencia a atividade microbiana e a respiração do solo fora da estação chuvosa, alterando os padrões sazonais de emissão e absorção de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) (da Rocha et al., 2002). Portanto, a quantificação das mudanças nos fluxos de água e carbono, bem como suas respectivas contribuições para a tendência da ET, se torna fundamental para entender a resiliência dos ecossistemas naturais, especialmente em áreas sensíveis ainda preservadas de Cerrado. Como as séries temporais hidrológicas e meteorológicas frequentemente apresentam tendências e não são estacionárias, a identificação e remoção dessas tendências é uma etapa essencial para melhorar a interpretação dos processos subjacentes e aumentar a precisão das análises (Farsi e Nozari, 2022).

Neste estudo, utilizamos dados de alta resolução obtidos por meio do sistema de covariância de vórtices turbulentos (Eddy Covariance), instalado em uma área preservada do Cerrado *sensu stricto*. Essa técnica permite mensurar diretamente os fluxos de  $\text{CO}_2$  e vapor d'água entre a vegetação e a atmosfera, refletindo as condições reais do ambiente local. Assim, este trabalho teve como objetivos: (1) investigar e quantificar as tendências de variáveis meteorológicas, da ET e do fluxo de  $\text{CO}_2$ ; e (2) identificar os principais fatores climáticos que controlam a variação sazonal da ET por meio do método de remoção de tendências (detrending).

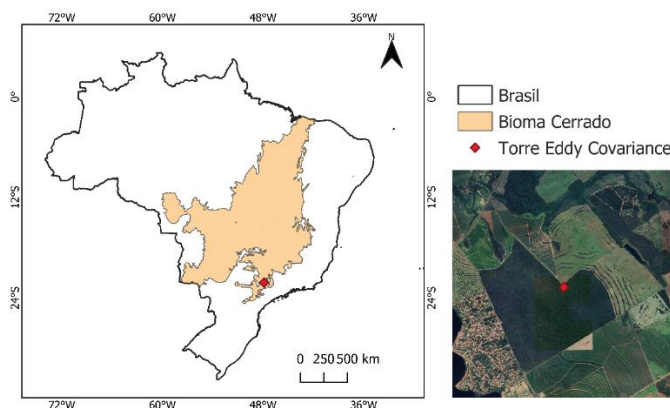
## MATERIAIS E MÉTODOS

### Área de estudo e base de dados

Os dados utilizados neste estudo foram obtidos por meio das medições realizadas por uma torre de fluxo instalada no Instituto Arruda Botelho ( $22^{\circ}10,2517' \text{ S}$ ,  $47^{\circ}52,2567' \text{ N}$ ), localizado no município de Itirapina, estado de São Paulo (Figura 1), conforme disponibilizado por Anache et al. (2024). A área de estudo está inserida em um fragmento de Cerrado *sensu stricto*, classificado como

WSA segundo o sistema IGPB, situado próximo à transição com uma área de pastagem (Zhao et al., 2025). O clima da região é classificado como Cwa, segundo a classificação de Köppen, caracterizado por invernos secos e verões quentes, com precipitação média anual de 1486 mm e temperatura média anual de 21,5 °C (Anache et al., 2019; Beck et al., 2023).

Figura 1 - Localização da torre Eddy Covariance



Fonte: Autor

As variáveis micrometeorológicas foram monitoradas pela torre de 24 metros de altura, equipada com sensores em diferentes frequências, posicionados, em sua maioria, a 16 m de altura para permitir a amostragem correta dos fluxos. A instrumentação de baixa frequência (1 Hz), registraram dados de precipitação, temperatura do ar, umidade relativa, radiação líquida, fluxo de calor no solo e umidade do solo. Já os sensores de alta frequência (20 Hz) capturaram informações sobre velocidade e direção do vento, além das frações molares de H<sub>2</sub>O e CO<sub>2</sub>. A torre está registrada na rede AmeriFlux sob o código BR-IAB (AmeriFlux, 2024; Zhao et al., 2025). Os dados utilizados apresentam resolução temporal de 30 minutos e abrangem o período de 5 de outubro de 2018 a 30 de agosto de 2021.

Além das variáveis diretamente medidas pelos sensores da torre de fluxo, parte dos dados já foram disponibilizados sob a forma de variáveis derivadas, previamente processadas pelos responsáveis pelo monitoramento (seguida de “\*” na Tabela 1). Adicionalmente, outras medidas necessárias à análise foram calculadas e extraídas neste estudo, a partir dos dados disponibilizados. A Umidade Absoluta (g.m<sup>-3</sup>) foi calculada com base em Monteith e Unsworth (2013).

Tabela 1 - Variáveis selecionadas para o estudo

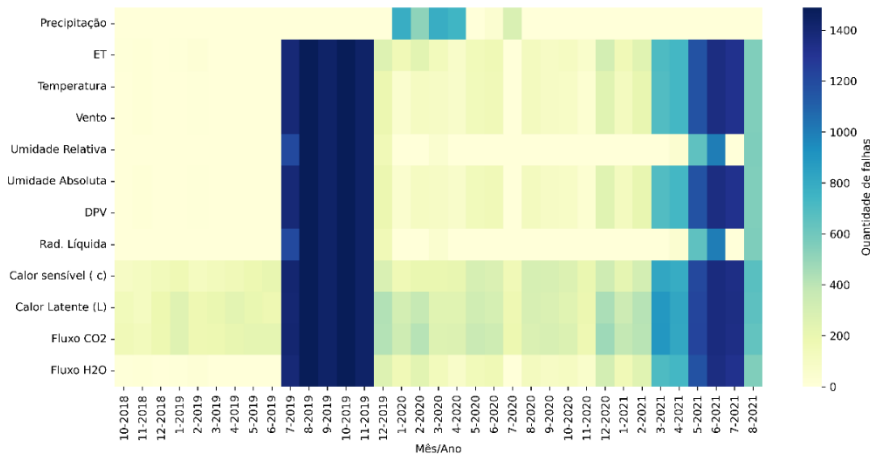
Variáveis	Unidades
Precipitação*	mm
Temperatura*	°C
Evapotranspiração*	mm
Déficit de vapor de pressão*	Pa
Umidade Relativa*	%
Velocidade do vento*	m s <sup>-1</sup>
Fluxo de CO <sub>2</sub> *	μmol m <sup>-2</sup>
Radiação Líquida*	W m <sup>-2</sup>
Umidade absoluta	g m <sup>-3</sup>

Fonte: Autor

A Figura 2 nos permite identificar rapidamente as variáveis com os meses de maior proporção de dados ausentes. Podemos observar uma concentração significativa de falhas em quase todas as variáveis no período de julho a novembro de 2019, incluindo 3 meses no período seco e 2 meses no período úmido. Além disso, há outra área de preocupação a partir de maio até agosto de 2021. A presença dessas lacunas em períodos específicos pode comprometer a confiabilidade das nossas análises, especialmente para capturar as tendências nesses períodos. Para minimizar o impacto dessas

lacunas, a abordagem adotada foi de agregar e padronizar os dados em escala diária. As variáveis foram agrupadas sazonalmente em dois períodos: úmido compreendendo os meses de janeiro, fevereiro, março, outubro, novembro e dezembro (JFMOND), e seco, incluindo os meses de abril, maio, junho, julho, agosto e setembro (AMJJAS).

Figura 2 - Dados faltantes para o período de 2018 a 2021



Fonte: Autor

## Teste Mann Kendall

O teste não paramétrico Mann Kendall (MK) foi aplicado para examinar a significância das tendências monotônicas das variáveis climáticas e de fluxos. A estatística  $S$  é calculada pela Equação 1 (Mann, 1945; Kendall, 1948):

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(X_j - X_k) \quad (1)$$

Onde  $X_j$  representa os valores de dados sequenciais e  $n$  é o número do conjunto de dados. Quando  $n > 10$ ,  $S$  é distribuído normalmente com  $E(S) = 0$ , e a variância da estatística  $S$  pode ser calculada pela Equação 2:

$$\text{Var}(S) = \frac{1}{18} [n(n-1)(2n+5) - \sum_{w=1}^v t_w(t_w-1)(2t_w+5)] \quad (2)$$

Onde  $v$  é o número de grupos empatados e  $t_w$  é o número de valores de dados no grupo  $w$ . Utilizando a estatística  $S$  calcula-se a estatística padrão  $Z$  através da Equação 3:

$$Z = \begin{cases} \frac{s-1}{\sqrt{\text{Var}(s)}} & s > 0 \\ 0 & s = 0 \\ \frac{s+1}{\sqrt{\text{Var}(s)}} & s < 0 \end{cases} \quad (3)$$

A hipótese  $H_0$  é rejeitada quando  $|Z| > Z_{1-\alpha/2}$ , onde  $Z_{1-\alpha/2}$  é o desvio normal padrão. Logo  $|Z| > 1,28, 1,64$  e  $2,32$ , denotam que as tendências de mudança são significativas em 90%, 95% e 99% respectivamente. Entretanto, é importante destacar a limitação metodológica da aplicação do teste de Mann-Kendall neste estudo, uma vez que a série temporal analisada é relativamente curta. O teste assume maior robustez estatística quando aplicado a séries longas, com número suficiente de observações. Apesar da limitação do período desse estudo, o teste é amplamente utilizado em séries temporais e neste caso, irá fornecer indícios preliminares de tendência que, embora não conclusivos, contribuem para uma análise exploratória do comportamento dos dados.

## Estimador de Theil-Sen

O estimador de Theil-Sen (TS) é um método não paramétrico para ajustar uma reta a um conjunto de pontos, estimando assim a magnitude das tendências das variáveis de estudo, através de  $\beta$  (Equação 4) (Sen, 1968; Hirsch et al., 1982; Qin et al., 2019):

$$\beta = \text{Mediana} \left( \frac{x_j - x_k}{j - k} \right), 1 < k < j < n, \quad (4)$$

Onde  $\beta$  é a magnitude estimada das inclinações das tendências das variáveis.  $\beta > 0$  representa uma tendência crescente e  $\beta < 0$  representa uma tendência decrescente.

## Remoção de tendências

Para quantificar a contribuição individual da tendência de cada variável climática (temperatura do ar, radiação solar, velocidade do vento e déficit de pressão de vapor) sobre a Evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ), foi empregada uma metodologia de análise de sensibilidade baseada em remoção de tendências, conforme descrito em Li et al. (2013). Esse procedimento foi aplicado separadamente para os períodos sazonais definidos, utilizando o método de Penmann Monteith para o cálculo de  $ET_0$ , com base na série de dados originais (Allen et al., 1998). Em seguida, a tendência de cada variável foi removida, por meio de regressão linear simples, e uma nova série recalculada de  $ET_0$  foi gerada, simulando um cenário em que a respectiva variável não apresentasse tendência de longo prazo. Assim, esse novo cenário foi construído mantendo todas as demais variáveis em seu estado original, permitindo isolar o impacto específico da tendência de cada uma sobre a  $ET_0$ . A contribuição (R) é então calculada através da Equação 5 (Xu et al., 2006; Liu et al., 2010):

$$R = \sum_{i=1}^n \frac{|ET_0^o i - ET_0^R i|}{ET_0^o i} \quad (5)$$

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Características climáticas

A Tabela 2 apresenta as médias e desvios-padrão das variáveis climáticas para os períodos úmido (JFMOND) e seco (AMJJAS) no intervalo de 2018 e 2021. A precipitação no período úmido é quase cinco vezes superior à do período seco, apresentando alta variabilidade em ambos os casos. A ET acompanha o comportamento da precipitação, sendo significativamente maior no período úmido. Quanto ao déficit de pressão de vapor (DPV), os valores médios são semelhantes entre os períodos, porém com maior variabilidade no período seco. Os fluxos de energia, são mais elevados no período úmido, indicando a atuação de outros fatores que contribuem para esse aumento. A vegetação do Cerrado se comporta como sumidouro de  $CO_2$  em ambos os períodos, com maior intensidade no úmido. O fluxo de  $H_2O$ , por sua vez, é mais elevado no período úmido, acompanhando a ET. Essa comparação evidencia a forte sazonalidade característica do bioma e pode oferecer subsídios para discutir a variabilidade recente do clima local.



Tabela 2 - Médias e desvios-padrão das variáveis

Variável	Período	
	JFMOND	AMJJAS
Precipitação (mm mês <sup>-1</sup> )	137,75 ±84,82	28,56 ±40,37
ET (mm mês <sup>-1</sup> )	162,74 ±77,71	70,62 ±63,26
T <sub>méd</sub> (°C)	22,76 ±1,00	18,28 ±3,70
T <sub>mín</sub> (°C)	18,37 ±1,01	13,83 ±2,52
T <sub>máx</sub> (°C)	28,18 ±1,65	23,38 ±5,06
Vento (m s <sup>-1</sup> )	1,93 ±0,23	1,87 ±0,22
UR (%)	76,53 ±5,81	66,58 ±7,67
UA (g m <sup>-3</sup> )	15,26 ±1,29	10,66 ±1,98
DPV (Pa)	754,06 ±257,71	778,5 ±386,85
Rad. Líquida (W m <sup>-2</sup> )	153,96 ±15,76	113,11 ±18,61
c (W m <sup>-2</sup> )	31,11 ±12,05	21,04 ±20,54
L (W m <sup>-2</sup> )	95,32 ±25,12	47,14 ±28,47
Fluxo CO <sub>2</sub> (μmol m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )	-87,48 ±45,75	-64,41 ±53,59
Fluxo H <sub>2</sub> O (mmol m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )	94,81 ±26,55	43,45 ±29,12

Fonte: Autor

## Testes MK e TS

Os testes de Mann Kendall e Theil-Sen revelaram tendências estatisticamente significativas para a maioria das variáveis analisadas (Tabela 3). Em relação a ET, observou-se uma redução de 0,7 mm ano<sup>-1</sup> ( $p < 0,05$ ) durante o período úmido e 2,5 mm ano<sup>-1</sup> ( $p < 0,001$ ) no período seco. Essa redução observada, especialmente durante o período seco, pode refletir as limitações hídricas enfrentadas pelo ecossistema (Vourlitis; da Rocha, 2010; Da Conceição et al., 2024). No entanto esse comportamento contrasta com o observado em florestas tropicais úmidas, onde a ET tende a aumentar na estação seca devido à presença de espécies com sistemas radiculares profundos, capazes de acessar reservas hídricas mesmo sob déficit hídrico (Giambelluca et al., 2009b).

Tabela 3 - Estatística do teste de MK (Z valor) e magnitude das tendências (β).

Variável	JFMOND			AMJJAS		
	Z valor	Tendência	β diário	Z valor	Tendência	β diário
ET	-1,94	↓ (95%)	-0,0039	-5,08	↓ (99%)	-0,0137
T <sub>méd</sub>	-1,54	↓ (90%)	-0,0021	-2,97	↓ (99%)	-0,0138
Vento	-1,53	↓ (90%)	-0,0005	0,53	Sem tendência	0,0002
UR	0,02	Sem tendência	-0,0001	-5,38	↓ (99%)	-0,0469
UA	0,31	Sem tendência	-0,0005	-3,57	↓ (99%)	-0,0129
DPV	-1,31	↓ (90%)	-0,4232	-0,25	Sem tendência	-0,1988
Rad. Líquida	0,41	Sem tendência	0,0096	-1,00	Sem tendência	-0,0254
Fluxo CO <sub>2</sub>	1,52	↑ (90%)	0,1104	3,63	↑ (99%)	0,3857

Fonte: Autor

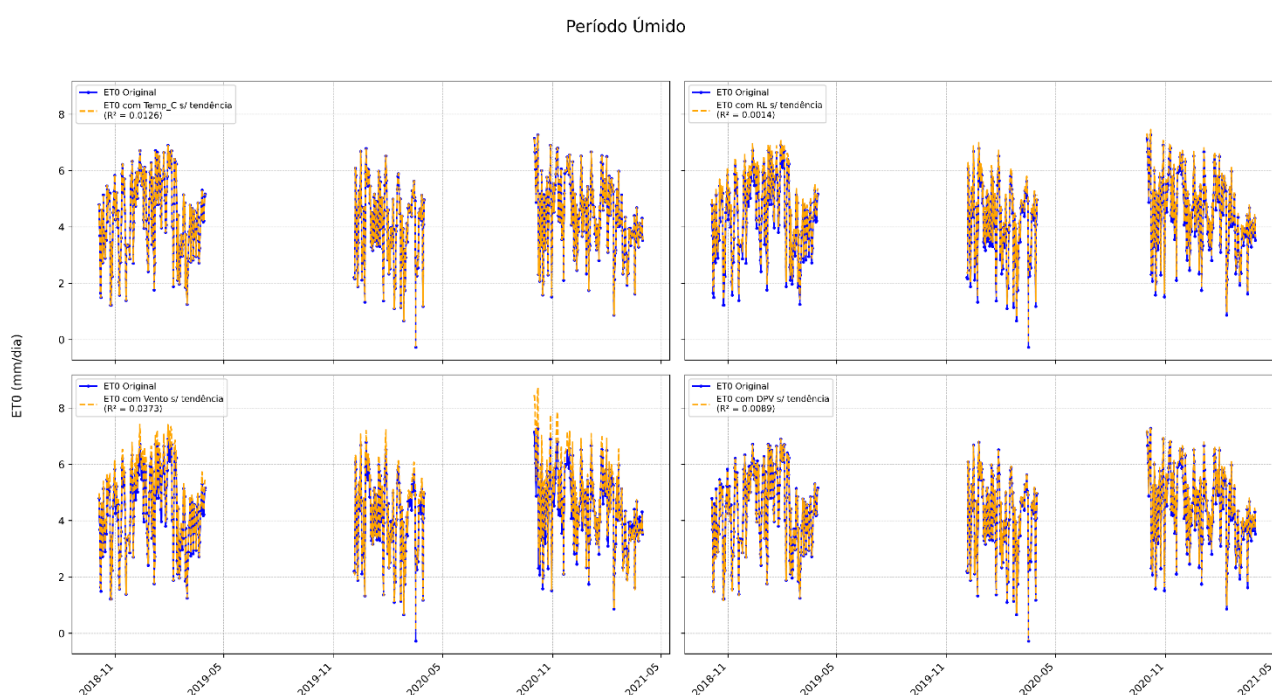
A T<sub>méd</sub> no período seco demonstrou uma marcante tendência de declínio anual de 2,5°C ( $p < 0,001$ ). Contudo no período úmido, a T<sub>méd</sub> exibiu uma fraca tendência de variação, com redução de 0,4°C ano<sup>-1</sup> ( $p < 0,1$ ). No que tange à umidade, tanto a relativa quanto a absoluta, ambas representaram decréscimos significativos no período seco ( $p < 0,01$ ), com valores de 8,6% ao ano e 2,4 g m<sup>-3</sup>ano<sup>-1</sup>, respectivamente. O DPV no período úmido não apresentou tendência significativa ( $p < 0,1$ ), com redução de 77 Pa ano<sup>-1</sup>. Em um estudo publicado por Hofmann et al. (2021), também foi relatado condições mais secas na região, com forte queda da umidade, corroborando com o encontrado neste estudo. No entanto, essa interpretação deve ser cautelosa devido ao curto período de dados e a variabilidade espacial inerente ao bioma.

O fluxo de CO<sub>2</sub> mostrou uma leve tendência no período úmido, com acréscimo de 20,1  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ano}^{-1}$  ( $p < 0,1$ ). Por outro lado, a tendência de aumento foi altamente significativa no período seco, atingindo 70,6  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ano}^{-1}$  ( $p < 0,001$ ). Esse resultado reforça achados anteriores de Miranda et al. (1995), que observou uma redução na absorção de CO<sub>2</sub> no Cerrado durante a estação seca. Nossos dados, no entanto, indicam que essa limitação pode ter se intensificado ao longo dos anos, sugerindo possível enfraquecimento do papel do ecossistema como sumidouro de carbono. Porém, séries mais longas são necessárias para confirmar essa afirmação hipotética.

### Contribuições das variáveis climáticas para a ET<sub>0</sub> em escala sazonal

A ET<sub>0</sub> sazonal original e recalculada com as variáveis diárias de temperatura, radiação líquida (RL), velocidade do vento e DPV para o período úmido é apresentada na Figura 3.

Figura 3 - Tendências na ET<sub>0</sub> para JFMOND

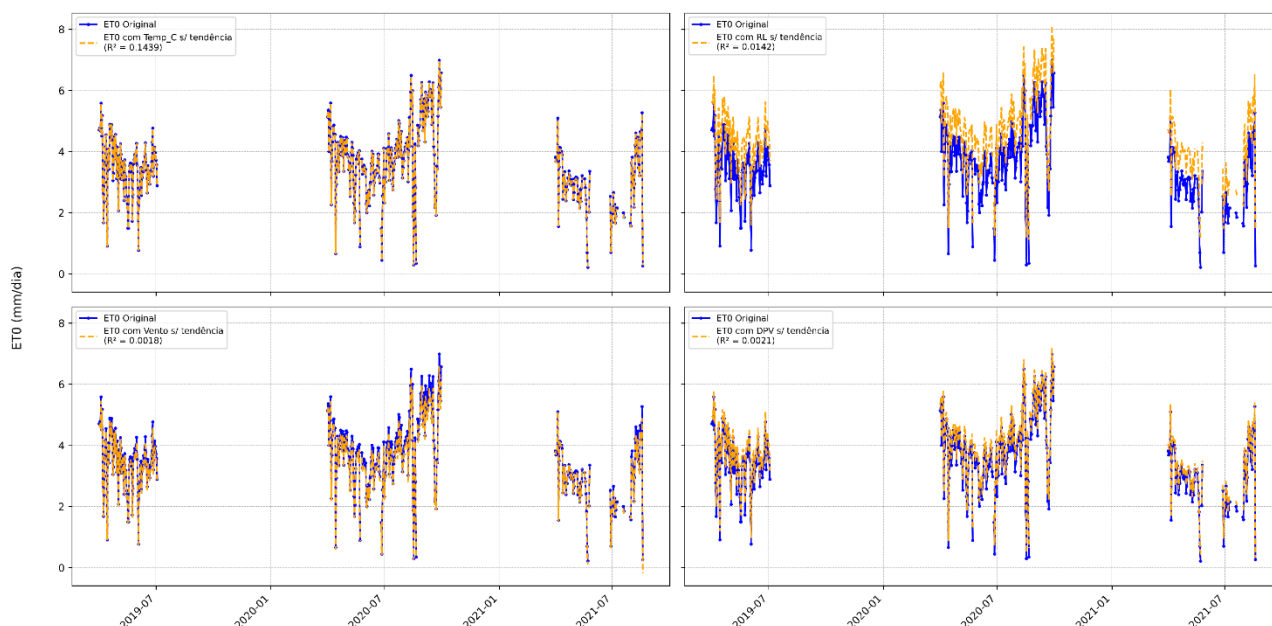


Os resultados da análise revelam uma dinâmica sazonal acentuadamente distinta, onde os principais fatores que governam a tendência da evapotranspiração de referência (ET<sub>0</sub>) se alteram entre os períodos úmido e seco. A tendência da velocidade do vento foi o fator mais influente, com uma contribuição (R) de 5,25% para a variação de ET<sub>0</sub>. Isso sugere que mesmo pequenas tendências na velocidade do vento, têm um impacto significativo, pois a velocidade do vento exerce maior influência em razão das turbulências e do deslocamento na camada limite atmosférica, promovendo a ET<sub>0</sub> (Sabino; De Souza, 2023). Portanto, pode-se dizer que a ET<sub>0</sub> neste período é sensível ao vento, que mesmo uma tendência fraca e ruidosa nesta variável, teve o maior impacto acumulado. Na estação úmida, as contribuições de RL, DPV e temperatura (4,12%, 1,49%, 0,33%, respectivamente), podem estar associadas à elevada disponibilidade hídrica e a cobertura vegetal, que tornam o processo de ET<sub>0</sub> menos sensíveis a flutuações nessas variáveis (Cabral et al., 2015). É importante ainda, observar que os valores de R<sup>2</sup> para todas as variáveis foram extremamente baixos (todos < 0.04). Isso indica que as tendências lineares observadas nos dados climáticos originais são muito fracas e explicam uma porção mínima da variabilidade total dos dados.

Os resultados para a estação seca (Figura 4) refletem um cenário em que o fator de disponibilidade de energia torna-se dominante.

Figura 4 - Tendências na  $ET_0$  para AMJJAS

Período Seco



A tendência de RL foi responsável por uma contribuição (R) de 25,48% para a variação da  $ET_0$ . Os dias mais longos e ensolarados fornecem a energia necessária para impulsionar a evaporação. O DPV com  $R = 6,33\%$  e o vento,  $R = 3,31\%$  ainda contribuem, pois um ar mais seco e mais vento favorecem a  $ET_0$ . A tendência da temperatura, novamente teve o menor impacto ( $R = 0,63\%$ ). Ainda assim, é importante considerar que as variáveis meteorológicas apresentam interações complexas, e a análise por tendência captura apenas os efeitos lineares e isolados, podendo subestimar variáveis como a temperatura em contextos em que há correlação com DPV ou RL.

## CONCLUSÃO

Apresentamos uma análise das tendências e dos controladores climáticos da evapotranspiração em uma área preservada de Cerrado na região central de São Paulo. Nosso estudo utilizou dados de um sistema de covariância de vórtices turbulentos, permitindo uma investigação da sazonalidade e da influência das variáveis meteorológicas. Cabe ressaltar que a presença de falhas nos dados e a curta extensão da série temporal para a aplicação do teste MK, representam limitações inerentes a este estudo. Contudo, sua aplicação forneceu indícios preliminares de tendências relevantes. Essas observações, ainda que não conclusivas, servem para uma análise exploratória preliminar do comportamento desses dados e para futuras pesquisas. Os resultados fornecem subsídios importantes para a compreensão da resiliência do ecossistema do Cerrado *sensu stricto* frente às variações climáticas e para a formulação de estratégias de gestão hídrica e de carbono, destacando a complexidade das interações entre a atmosfera e a vegetação sob diferentes regimes hídricos.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao apoio financeiro da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES, Código de Financiamento 001). Agradecem também à Escola de Engenharia de São Carlos (EESC-USP) pela disponibilização pública dos dados utilizados neste estudo, originalmente coletados com apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP, processo nº 2015/03806-1, processo nº 2023/18011-0).



## REFERÊNCIAS

- ANA (2024). Impacto da Mudança Climática nos Recursos Hídricos no Brasil. Agência Nacional das Águas e Saneamento Básico. Brasília: ANA, 2024.
- ANACHE, J. A. A.; WENDLAND, E.; ROSALEM, L. M. P.; YOULTON, C.; OLIVEIRA, P. T. S. (2019). Hydrological trade-offs due to different land covers and land uses in the Brazilian Cerrado. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 23, pp. 1263–1279.
- ANACHE, J. A. A.; HOLL, D.; ZHAO, Y.; de SOUZA, P. B. P.; WENDLAND, E (2024). Water and carbon dioxide fluxes in contrasting land covers typical from Brazilian Cerrado: Modeling and methodological challenges using eddy covariance data. *Assembleia Geral da EGU*, Abr. 2024.
- BECK, H. E.; McVICAR, T. R.; VERGOPOLAN, N.; BERG, A.; LUTSKO, N. J.; DUFOUR, A.; ZENG, Z. JIANG, X.; van DIJK, A. I. J. M.; MIRALLES, D. G. (2023). High-resolution (1 km) Köppen-Geiger maps for 1901–2099 based on constrained CMIP6 projections. *Scientific Data*, v. 10.
- BUTLER, A.; MEIR, P.; SAIZ, G.; MARACAHIPES, L.; MARIMONN, B. S.; GRACE, J. (2012) Annual variation in soil respiration and its component parts in two structurally contrasting woody savannas in Central Brazil. *Plant and Soil*, v. 352, pp. 129–142.
- CABRAL, O. M. R.; da ROCHA, H. R.; GASH, J. H.; FREITAS, H. C.; LIGO, M. A. V. (2015). Water and energy fluxes from a woodland savanna (cerrado) in southeast Brazil. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, v. 4, p. 22–40.
- DA CONCEIÇÃO, L. F. C.; da ROCHA, H. R.; NAVARRETE, R. R.; CABRAL, O. M. R.; FREITAS, H. C. (2024). Interannual Variability of Water and Heat Fluxes in a Woodland Savanna (Cerrado) in Southeastern Brazil: Effects of Severe Drought and Soil Moisture. *Atmosphere*, v. 15, pp. 668.
- DE OLIVEIRA, R. G.; JÚNIOR, L. C. G. V.; DA SILVA, J. B.; ESPÍNDOLA, D. A. L. F.; LOPES, R. D.; NOGUEIRA, J. S.; CURADO, L. F. A.; RODRIGUES, T. R. (2021). Temporal trend changes in reference evapotranspiration contrasting different land uses in southern Amazon basin. *Agricultural Water Management*, pp. 106815.
- FARSI, F.; NOZARI, H. (2022). Effect of different detrending approaches on the accuracy of time series forecasting models. *Sustainable Water Resources Management* 8, 179.
- GIAMBELLUCA, T.W.; SCHOLZ, F. G.; BUCCI, S.J.; MEINZER, F. C.; GOLDSTEIN, G.; HOFFMANN, W. A.; FRANCO, A.C.; BUCHERT, M.P. (2009). Evapotranspiration and energy balance of Brazilian savannas with contrasting tree density. *Agricultural and Forest Meteorology* 149, pp.1365–1376.
- HIRSCH, R. M.; SLACK, J. R.; SMITH, R.A. (1982). Techniques of trend analysis for Monthly water-quality data. *Water Resources Research*, v. 18, n.1, p.107-121.
- HOFMANN, G. S.; CARDOSO, M. F.; ALVES, R. J. V.; WEBER, E. J.; BARBOSA, A. A.; TOLEDO, P. M.; PONTUAL, F. B.; SALLES, L. de O.; HASENACK, H.; CORDEIRO, J. L. P.; AQUINO, F. E.; OLIVEIRA, L. F. B. (2021). The Brazilian Cerrado is becoming hotter and drier. *Global Change Biology* 27, pp. 4060–4073.
- HOFMANN, G. S.; SILVA, R. C.; WEBER, E. J.; BARBOSA, A. A.; OLIVEIRA, L. F. B.; ALVES, R. J. V.; HASENACK, H.; SCHOSSLER, V.; AQUINO, F. E.; CARDOSO, M. F. (2023). Changes in atmospheric circulation and evapotranspiration are reducing rainfall in the Brazilian Cerrado. *Scientific Reports* 13, pp. 11236.
- JASECHKO, S.; SHARP, Z. D.; GIBSON, J. J.; BIRKS, S. J.; YI, Y.; FAWCETT, P. J. (2013). Terrestrial water fluxes dominated by transpiration. *Nature* 496, pp. 347–350.
- KENDALL, M. G. (1948). Rank correlation methods. ASME, 1948.
- LI, Z.; LI, Z.; XU, Z.; ZHOU, X. (2013). Temporal variations of reference evapotranspiration in Heihe River basin of China. *Hydrology Research* 44, pp. 904–916.
- LIU, Q.; YANG, Z.; CUI, B.; SUN, T. (2010). The temporal trends of reference evapotranspiration and its sensitivity to key meteorological variables in the Yellow River Basin, China. *Hydrological Processes*, 24 (15), pp. 2171-2181.
- MANN, H. B. (1945). Nonparametric Tests Against Trend. *Econometrica*, 13, pp. 245.

- ENGSHENG, Q.; HAO, L.; YONGQIANG, L.; SUN, G. (2018). Climatic Controls on Watershed Reference Evapotranspiration Varied during 1961–2012 in Southern China. *Journal of the American Water Resources Association* 55, pp. 189–208.
- MIRANDA, A.; MIRANDA, H.; GRACE, J.; MEIR, P.; LLOYD, J. (2025). Carbon dioxide fluxes over cerrado sensu stricto, Central Brazil. *University of Edinburgh Research Explorer*.
- PENNINGTON, R. T.; LEHMANN, C. E. R.; ROWLAND, L. M. (2018). Tropical savannas and dry forests. *Current Biology* 28, pp. R541–R545.
- QIN, Mengsheng *et al.* Climatic Controls on Watershed Reference Evapotranspiration Varied during 1961–2012 in Southern China. *Journal of the American Water Resources Association*, v. 55, p. 189–208, fev. 2019.
- QIN, M.; HAO, L.; SUN, L.; LIU, Y.; SUN, G. (2018). Climatic Controls on Watershed Reference Evapotranspiration Varied during 1961–2012 in Southern China. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association* 55, pp. 189–208.
- RIBEIRO, J. F.; WALTER, B. M. T. (2008). As Principais Fitofisionomias do Bioma Cerrado. Org. por SANO, S. M.; DE ALMEIDA, S. P.; RIBEIRO, J. F. *Cerrado: ecologia e flora*. Distrito Federal, EMBRAPA, pp. 151–212.
- ROCHA, H.; FREITAS, H. C.; ROSOLEM, R.; JUÁREZ, R. I. N.; TANNUS, R. N.; LIGO, V.; CABRAL, R.; DIAS, M. A. F. S. (2002). Measurements of CO<sub>2</sub> exchange over a woodland savanna (Cerrado Sensu stricto) in southeast Brasil. *Biota Neotropica* 2, pp. 1–11.
- SABINO, M.; DE SOUZA; PACHECO, A. (2023). Global Sensitivity of Penman–Monteith Reference Evapotranspiration to Climatic Variables in Mato Grosso, Brazil. *Earth (Switzerland)* 4, pp. 714–727.
- SANO, E.E.; RODRIGUES, A. A.; MARTINS, E. S.; BETTIOL, G. M.; BUSTAMANTE, M. M. C.; BEZERRA A. S.; COUTO, A. F.; VASCONCELOS, V.; SCHULER, J.; BOLFE, E. L. (2019). Cerrado ecoregions: A spatial framework to assess and prioritize Brazilian savanna environmental diversity for conservation. *Journal of Environmental Management* 232, pp. 818–828.
- SANTOS, A. J. B.; QUESADA, C. A.; DA SILVA, G. T.; MAIA, J. F.; MIRANDA, H. S.; MIRANDA, A. C.; LLOYD, J. (2004). High rates of net ecosystem carbon assimilation by *Brachiara* pasture in the Brazilian Cerrado. *Global Change Biology* 10, pp. 877–885.
- SEN, P (1968). Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall’s Tau, pp. 1379–1389.
- VALIPOUR, M.; BATENI, S. M.; SEFIDKOUHI, M. A. G.; RAEINI-SARJAZ, M.; SINGH, V. P. (2020). Complexity of Forces Driving Trend of Reference Evapotranspiration and Signals of Climate Change. *Atmosphere* 11(10), pp. 1081.
- VOURLITIS, G. L.; DA ROCHA, H. R. Flux Dynamics in the Cerrado and Cerrado–Forest Transition of Brazil. *In: Ecosystem Function in Savannas*, pp. 137–156.
- WANG, K.; DICKINSON, R. E. (2012). A review of global terrestrial evapotranspiration: Observation, modeling, climatology, and climatic variability. *Reviews of Geophysics* Blackwell.
- XU, M.; CHANG, C. P.; FU, C.; QI, Y.; ROBOCK, A.; ROBINSON, D.; ZHANG, H. (2006). Steady decline of east Asian monsoon winds, 1969–2000: Evidence from direct ground measurements of wind speed. *Journal of Geophysical Research* 111(D124).
- YANG, Yuting *et al.* Evapotranspiration on a greening Earth. *Nature Reviews Earth and Environment* Springer Nature, set. 2023.
- YANG, Y.; RODERICK, M. L.; GUO, H.; MIRALLES, D. G.; ZIFENG, L.; FATICHI, S.; LUO, X.; ZHANG, Y.; MCVICAR, T. R.; TU, Z.; KEENAN, T. F.; FISHER, J. B.; GAN, R.; ZHANG, X.; PIAO, S.; ZHANG, B.; YANG, D. (2023). Evapotranspiration on a greening Earth. *Nature Reviews Earth & Environment* 4, pp. 626–641.
- ZHAO, Y.; HOLL, Z. ANACHE, J. A. A.; Kobayashi, A. N. A. Wendland, E. (2025). Lower carbon uptake rates resulting from converting wooded Cerrado to pasture-dominated agricultural area in the Brazilian savanna. *Agricultural and Forest Meteorology* 366, pp. 110465.