VARIABILIDADE TEMPORAL DO DÉFICIT DE PRESSÃO DE VAPOR EM BAGÉ E PORTO ALEGRE, RIO GRANDE DO SUL

Fernanda Lyra[1], Gabriel Adão Zechini da Silva[1], Elaine Cordeiro dos Santos[1], Iulo Pessotti Moro[1]

[1]Universidade Federal do Espírito Santo/Centro de ciências agrárias e engenharias, Av. Governador Lindemberg, 316, Centro - 29550-000- Jerônimo Monteiro - ES, Brasil, lyraafer@gmail.com, gabrielzechini@hotmail.com, elainecordeiro1220@gmail.com, iulo.floresta@gmail.com

Resumo

O Déficit de Pressão de Vapor (*DPV*) é um importante indicador da demanda evaporativa da atmosfera e do estresse hídrico. Este estudo analisou a dinâmica temporal da pressão de saturação de vapor d'água no ar (e_s), pressão real de vapor d'água no ar (e_a) e *DPV* em Bagé e Porto Alegre, Rio Grande do Sul, utilizando dados meteorológicos horários do INMET entre 2008 a 2025. As variáveis foram processadas e agregadas em escala diária para caracterizar a variabilidade sazonal e interanual e avaliar períodos extremos de seca e precipitação. Em ambas as localidades, observaram-se maiores valores de e_s e *DPV* no verão e valores próximos de zero no inverno. Nos períodos secos, o *DPV* apresentou aumento e maior amplitude, enquanto nos períodos chuvosos manteve-se reduzido e mais estável. Os resultados evidenciam a forte influência da sazonalidade e da disponibilidade hídrica sobre a demanda atmosférica por vapor d'água. Conclui-se que o *DPV* constitui um indicador relevante para o monitoramento de condições de riscos climáticos na região.

Palavras-chave: Demanda evaporativa. Agrometeorologia. Variabilidade climática.

Área do Conhecimento: Engenharia Ambiental e Sanitária**.**

Introdução

A dinâmica do vapor d'água na atmosfera é um elemento central para a compreensão dos balanços de energia e de massa nos ecossistemas. A capacidade do ar de reter umidade é estritamente dependente da sua temperatura, quando a temperatura do ar se eleva, há um aumento exponencial na quantidade de vapor d'água necessária para atingir a saturação (Monteith; Unsworth, 2013). Consequentemente, variações diárias e sazonais da temperatura do ar modulam diretamente a umidade relativa e a disponibilidade hídrica no sistema solo-planta-atmosfera, influenciando processos meteorológicos desde a formação de orvalho até a ocorrência de precipitações intensas (Pezzopane et al., 2011).

Embora a umidade relativa seja amplamente utilizada para descrever o estado de saturação do ar, ela apresenta limitações em estudos agrometeorológicos por ser altamente dependente da temperatura (Allen *et al.*, 1998). Para quantificar a real demanda evaporativa da atmosfera, o Déficit de Pressão de Vapor (*DPV*) demonstra ser um indicador físico mais preciso. O *DPV* representa a diferença absoluta entre a pressão de saturação de vapor d'água no ar (e_s), que é o máximo de vapor que o ar pode conter em dada temperatura, e a pressão real de vapor d'água no ar (e_a) presente no momento. Altos valores de *DPV* indicam uma atmosfera seca exercendo forte tensão sobre as superfícies evaporantes, enquanto valores próximos a zero indicam saturação (Grossiord *et al.*, 2020). Compreender o comportamento da pressão de vapor exige a análise em múltiplas escalas. Em uma escala microclimatológica horária, o curso diário de e_s e de e_a revela a complexa interação entre o aquecimento radiativo e a advecção de umidade (Pezzopane *et al.*, 2011). Por outro lado, em uma escala climatológica de longo prazo, a distribuição temporal dessas variáveis permite identificar o regime higrométrico característico de uma região e sua variabilidade interanual, fornecendo uma base sólida para a identificação de tendências e anomalias climáticas (Blain, 2010).

A região Sul do Brasil, especificamente o estado do Rio Grande do Sul, destaca-se por sua relevância na produção agrícola nacional, exigindo um refinado zoneamento agroclimático (De Mello; Teleginski Ferraz, 2025). No entanto, a região apresenta uma notável vulnerabilidade à variabilidade

climática, sendo frequentemente afetada por eventos extremos (Grimm, 2011). Anos marcados por secas severas impulsionam o distanciamento acentuado entre e_s e e_a, resultando em picos elevados de *DPV* que intensificam o estresse hídrico e térmico ambiental. Em contrapartida, períodos de precipitação extrema suprimem o *DPV*, saturando a atmosfera por dias consecutivos e alterando drasticamente as trocas gasosas e de energia na superfície.

Diante deste contexto, o presente estudo tem como objetivo analisar a dinâmica temporal da pressão de saturação de vapor d'água do ar (e_s), a pressão real de vapor d'água do ar (e_a) e o déficit de pressão de vapor (*DPV*) nos municípios de Bagé e Porto Alegre (RS), avaliando a influência das condições climáticas locais sobre a demanda evaporativa atmosférica.

Metodologia

Foram utilizados dados horários de estações automáticas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), localizadas em Bagé e Porto Alegre (RS), no período de 1º de janeiro de 2008 a 31 de dezembro de 2025. Os dados foram processados em Python, agregados em escala diária e analisados quanto à radiação solar global (Qg), temperaturas máxima e mínima (Tmax e Tmin), umidades relativas máxima e mínima (*UR*max e *UR*min) e precipitação pluviométrica. As variáveis e_s, e_a e DPV foram calculadas a partir da temperatura e da umidade relativa, e os gráficos foram elaborados com *Matplotlib* e *Seaborn*

$$DPV = e_s - e_a \qquad \text{Eq.1}$$

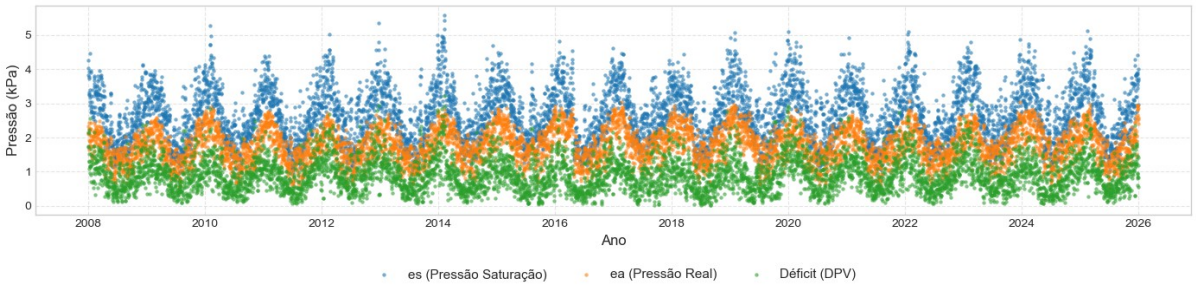
Em que e_s representa a pressão de saturação de vapor d'água, correspondente à pressão máxima de vapor que o ar pode atingir sob determinada temperatura. Por sua vez, e_a corresponde à pressão real de vapor d'água, representando a quantidade de vapor d'água efetivamente presente no ar sob determinada condição atmosférica.

A análise exploratória da dinâmica temporal foi estruturada em duas etapas. Inicialmente, foram elaborados gráficos de dispersão em escala diária para todo o período (2008–2025), com o intuito de caracterizar o comportamento sazonal e a variabilidade interanual do regime higrométrico nas duas localidades. Em seguida, procedeu-se à análise de eventos climáticos contrastantes, mediante a seleção de recortes temporais de dez dias representativos dos períodos de menor e maior disponibilidade hídrica, considerando os anos que apresentaram as maiores anomalias da série histórica. Essa abordagem permitiu avaliar a resposta atmosférica em curto prazo e o comportamento do *DPV* diante de diferentes condições de disponibilidade hídrica.

Resultados

A Figura 1 apresenta a variação diária de e_s, e_a e DPV na estação meteorológica de Porto Alegre ao longo da série histórica.

Figura 1 - Dispersão diária de e_s, e_a e *DPV* para a estação meteorológica de Porto Alegre (RS).



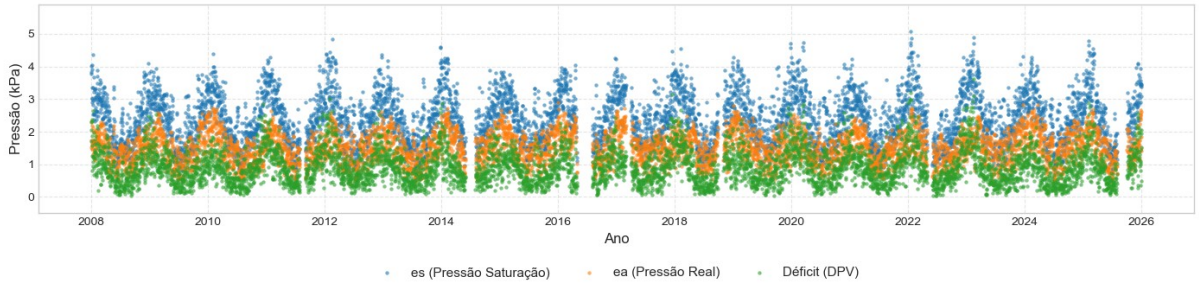
Fonte: os autores (2026).

Observa-se uma marcada sazonalidade de e_s, com os maiores valores concentrados nos meses de verão e picos superiores a 5 kPa em diferentes anos, destacando-se valores próximos a 5,5 kPa em 2014 e 2022. Em contraste, e_a apresentou menor amplitude de variação, permanecendo

predominantemente entre 1,5 e 2,5 kPa ao longo da série. Os maiores valores de DPV ocorreram principalmente nos períodos em que es apresentou valores elevados e maior afastamento em relação a e_a, enquanto os menores valores foram observados nos períodos em que essas variáveis permaneceram mais próximas.

A Figura 2 apresenta a mesma análise para Bagé. O comportamento de *e*s também evidencia ciclos sazonais bem definidos, porém com valores máximos predominantemente entre 4 e 5 kPa, inferiores aos observados em Porto Alegre. A série de e_a apresentou comportamento semelhante ao observado na estação de Porto Alegre, mantendo-se, de modo geral, entre 1,5 e 2,5 kPa. O *DPV* acompanhou a variação sazonal de e_s, apresentando maior amplitude nos períodos mais quentes. A comparação entre as estações evidencia, portanto, maior amplitude de e_s em Porto Alegre, enquanto e_a apresentou comportamento relativamente semelhante entre as localidades.

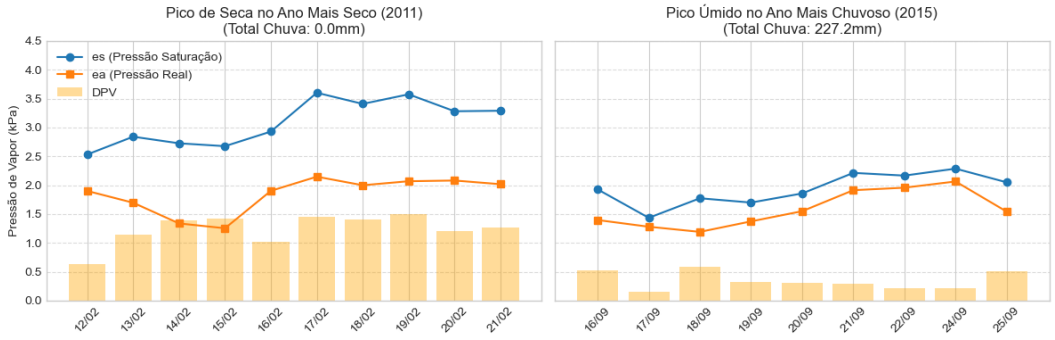
Figura 2 - Dispersão diária de e_s, e_a e *DPV* para a estação meteorológica de Bagé (RS).



Fonte: os autores (2026).

A Figura 3 detalha a resposta de *e*s, *e*a e *DPV* em dois recortes de dez dias na estação de Bagé. O primeiro corresponde a um período de ausência de precipitação selecionado em 2011, enquanto o segundo representa um período de elevada precipitação acumulada em 2015. Durante o intervalo sem precipitação, o *DPV* apresentou tendência geral de aumento, passando de aproximadamente 0,6 kPa para valores próximos de 1,5 kPa. Esse comportamento ocorreu paralelamente ao aumento de e_s, de aproximadamente 2,5 para 3,6 kPa, enquanto e_a apresentou variação mais discreta, de cerca de 1,9 para 2,15 kPa. No intervalo de elevada precipitação, por outro lado, o *DPV* permaneceu em níveis mais baixos, variando aproximadamente entre 0,15 e 0,6 kPa. Nesse período, e_s variou entre 1,4 e 2,3 kPa e e_a entre 1,2 e 2,1 kPa, resultando em menor afastamento entre as duas variáveis.

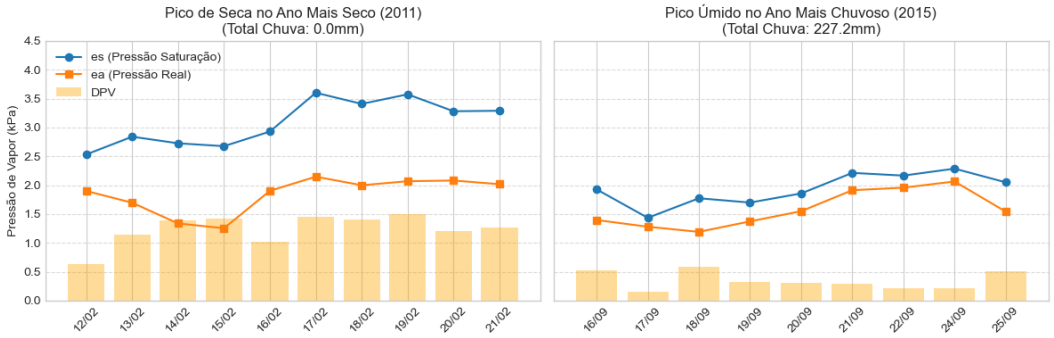
Figura 3 - Comportamento diário de e_s, e_a e *DPV* em dois recortes de dez dias na estação de Bagé (RS).



Fonte: os autores (2026).

A Figura 4 apresenta o mesmo tipo de análise para Porto Alegre, considerando um período de ausência de precipitação em 2021 e um período de elevada precipitação acumulada em 2024. Durante o intervalo sem precipitação, o *DPV* apresentou aumento ao longo dos dez dias, passando de aproximadamente 1,2 para 2,15 kPa, acompanhado pelo aumento de e_s, que variou de cerca de 3,3 para 4,2 kPa. Em contrapartida, durante o intervalo de elevada precipitação, o *DPV* permaneceu reduzido, oscilando entre aproximadamente 0,1 e 0,75 kPa, enquanto *e*s e e_a permaneceram em faixas mais próximas, variando entre 2,0 e 3,1 kPa e entre 1,75 e 2,4 kPa, respectivamente.

Figura 4 - Comportamento diário de e_s, e_a e DPV em dois recortes de dez dias na estação meteorológica de Porto Alegre (RS).



Fonte: os autores (2026).

De forma geral, as duas estações apresentaram comportamento semelhante quanto à resposta do *DPV* às diferentes condições atmosféricas. Nos períodos caracterizados por ausência de precipitação, observou-se maior afastamento entre e_s e e_a, acompanhado por valores mais elevados de *DPV*. Já nos períodos de elevada precipitação acumulada, a aproximação entre as pressões de vapor esteve associada à redução e à maior estabilidade do *DPV*. Esse comportamento foi identificado tanto na análise da série histórica quanto nos recortes de dez dias, evidenciando a relação entre as condições de umidade atmosférica e a demanda evaporativa representada pelo *DPV*.

Discussão

A dinâmica observada para e_s, e_a e *DPV* nas duas estações está associada, principalmente, à sazonalidade das condições atmosféricas. A variação de es acompanha diretamente as alterações na temperatura do ar, uma vez que a pressão de saturação aumenta de forma não linear com o aquecimento atmosférico. Dessa forma, durante os períodos mais quentes, a atmosfera apresenta maior capacidade de conter vapor d'água, elevando o valor de es. Esse comportamento contribui para explicar a maior demanda evaporativa atmosférica observada nos meses de verão, enquanto as temperaturas mais baixas do inverno reduzem a pressão de saturação e, consequentemente, o potencial de ocorrência de elevados valores de *DPV*. A predominância desse ciclo nas duas localidades evidencia a importância da sazonalidade térmica na determinação das condições de demanda atmosférica por água, em concordância com o comportamento descrito na literatura para regiões de clima temperado e subtropical (Yuan *et al.*, 2019).

A diferença de comportamento entre e_s e e_a é particularmente importante para compreender a dinâmica do *DPV*. Enquanto es é fortemente determinado pela temperatura do ar, e_a depende da quantidade de vapor d'água efetivamente presente na atmosfera. Assim, o aquecimento do ar não implica necessariamente um aumento proporcional da pressão real de vapor. Quando a temperatura se eleva sem que ocorra um aumento equivalente na disponibilidade de vapor d'água, ocorre um aumento da diferença entre e_s e e_a e, consequentemente, do DPV (Ficklin; Novick, 2017). Esse mecanismo explica por que períodos de maior aquecimento podem apresentar elevada demanda evaporativa mesmo quando a precipitação recente não é necessariamente nula. Portanto, a análise conjunta dessas variáveis é mais informativa do que a avaliação isolada da precipitação ou da temperatura, pois permite representar a interação entre a capacidade atmosférica de reter vapor e a quantidade de umidade efetivamente disponível.

O comportamento do *DPV*, por sua vez, evidencia que os maiores déficits ocorrem justamente quando a diferença entre e_s e e_a se amplia, isto é, em dias quentes e simultaneamente secos, quando o ar tem grande capacidade de reter vapor, mas a umidade efetivamente disponível não acompanha esse potencial (Novick *et al.*, 2016). Esse padrão é visualmente marcante nos gráficos de dispersão, nos quais a "nuvem" verde do *DPV* se afasta da nuvem laranja da e_a justamente nos picos de verão, retornando a valores próximos de zero durante o inverno, quando e_s e e_a praticamente se sobrepõem. Esse comportamento é fisiologicamente relevante, pois valores elevados de *DPV* estão diretamente associados ao aumento da demanda evaporativa da atmosfera, podendo intensificar o estresse hídrico em plantas e ecossistemas mesmo na ausência de déficit hídrico no solo (Grossiord *et al.*, 2020).

A resposta observada nos períodos de precipitação contrastante reforça a importância da umidade atmosférica na modulação do *DPV*. Em condições de maior disponibilidade de água, a manutenção de maior umidade na atmosfera tende a aproximar e_a de e_s, reduzindo o déficit de pressão de vapor. Em contrapartida, a ausência prolongada de precipitação pode favorecer a redução da umidade atmosférica e ampliar a diferença entre essas variáveis, desde que acompanhada por condições térmicas favoráveis ao aumento de e_s. Essa relação ajuda a explicar por que a ausência de precipitação, isoladamente, não determina o comportamento do *DPV*: sua magnitude resulta da interação entre temperatura e umidade atmosférica (Seager *et al.*, 2015). Assim, períodos sem chuva podem apresentar diferentes níveis de demanda evaporativa dependendo das condições meteorológicas predominantes.

A comparação entre Bagé e Porto Alegre mostra que as duas localidades apresentem um ciclo sazonal semelhante, a magnitude das variações de e_s e *DPV* não é equivalente. Porto Alegre apresentou, em determinados períodos, valores mais elevados de e_s, enquanto e_a permaneceu em faixas relativamente próximas entre as duas localidades. Essa diferença pode estar relacionada às características geográficas que distinguem as estações, especialmente a altitude e a posição relativa ao oceano, fatores capazes de influenciar as condições térmicas e a disponibilidade de umidade atmosférica. A diferença de latitude entre as localidades também contribui para a distinção do regime térmico, sobretudo na amplitude sazonal, embora seja relativamente pequena em comparação com outros contrastes geográficos (Al-Fahdawi, 2022). Dessa forma, apesar de submetidas a um mesmo contexto climático regional, as características locais podem modificar a magnitude da demanda evaporativa atmosférica, resultando em diferentes respostas de e_s, e_a e *DPV*.

A maior demanda atmosférica indicada pelo *DPV* possui implicações relevantes para sistemas naturais e agrícolas, valores elevados dele representam uma atmosfera com maior capacidade de extrair água de superfícies úmidas e da vegetação, podendo aumentar a demanda evaporativa e intensificar o estresse hídrico quando a disponibilidade de água no solo não é suficiente para compensar essas perdas (Mu *et al.*, 2025). Nesse sentido, a utilização do *DPV* como indicador complementar às variáveis tradicionais de temperatura e precipitação pode contribuir para identificar condições atmosféricas potencialmente desfavoráveis à vegetação e às atividades agrícolas, sobretudo em períodos de elevada demanda evaporativa (Grossiord *et al.*, 2020).

De maneira geral, os resultados indicam que a dinâmica do *DPV* nas duas localidades não é determinada exclusivamente pela ocorrência de precipitação, mas pela relação entre a temperatura do ar e a quantidade de vapor d'água presente na atmosfera. A sazonalidade térmica estabelece o padrão de variação de e_s, enquanto as alterações na umidade atmosférica modulam e_a e, consequentemente, a magnitude do déficit (Koutsoyiannis, 2012). A comparação entre Bagé e Porto Alegre demonstra que, apesar da existência de um padrão regional comum, diferenças nas condições atmosféricas locais podem resultar em distintas magnitudes de demanda evaporativa. Esses resultados reforçam a importância de considerar simultaneamente temperatura e umidade atmosférica na avaliação das condições de demanda hídrica da atmosfera.

Conclusão

A análise realizada demonstrou que a dinâmica do déficit de pressão de vapor nas estações de Bagé e Porto Alegre é resultado da interação entre as condições térmicas e a disponibilidade de umidade na atmosfera, apresentando um comportamento sazonal consistente ao longo da série histórica. Embora as duas localidades compartilhem um padrão regional semelhante, as diferenças observadas na magnitude de es e DPV evidenciam que as características geográficas e climáticas locais também contribuem para a diferenciação da demanda evaporativa atmosférica. Os períodos de maior demanda estiveram associados à ampliação da diferença entre es e ea, enquanto condições de maior disponibilidade de umidade favoreceram a redução desse gradiente. Dessa forma, o DPV mostrou-se uma variável integradora das condições atmosféricas, capaz de representar não apenas o efeito do aquecimento do ar, mas também sua relação com a umidade disponível. Esses resultados reforçam a relevância do DPV como indicador complementar na avaliação das condições de demanda evaporativa e de possíveis situações de estresse atmosférico, especialmente em contextos de variabilidade climática e de disponibilidade hídrica.

Referências

AL-FAHDAWI, I. A. H. Geographical Analysis of Temperature Changes between Baghdad and Amman stations during 1989-2019. **Journal of Tikrit University for Humanities**, v. 29, n. 9, 1, p. 223–250, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.25130/jtuh.29.9.1.2022.10

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements**. FAO ed. Roma: *[s. n.]*, 1998. *E-book*. Disponível em: http://www.climasouth.eu/sites/default/files/FAO 56.pdf

BLAIN, G. C. Tendências e variações climáticas em séries anuais de precipitação pluvial do Estado de São Paulo. **Bragantia**, v. 69, n. 3, p. 765–770, 2010. Disponível em: https://doi.org/10.1590/S0006-87052010000300031

DE MELLO, L. M.; TELEGINSKI FERRAZ, S. E. Modeling of rice production areas in southern Brazil, under extreme climate scenarios. **Revista Thema**, v. 24, n. 2, p. 1–18, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.15536/revistathema.24.2025.3143

FICKLIN, D. L.; NOVICK, K. A. Historic and projected changes in vapor pressure deficit suggest a continental-scale drying of the United States atmosphere. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 122, n. 4, p. 2061–2079, 2017. Disponível em: https://doi.org/10.1002/2016JD025855

GRIMM, A. M. Interannual climate variability in South America: impacts on seasonal precipitation, extreme events, and possible effects of climate change. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, v. 25, n. 4, p. 537–554, 2011. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s00477-010-0420-1

GROSSIORD, C.; BUCKLEY, T. N.; CERNUSAK, L. A.; NOVICK, K. A.; POULTER, B.; SIEGWOLF, R. T. W.; SPERRY, J. S.; MCDOWELL, N. G. Plant responses to rising vapor pressure deficit. **New Phytologist**, v. 226, n. 6, p. 1550–1566, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1111/nph.16485

KOUTSOYIANNIS, D. Clausius–Clapeyron equation and saturation vapour pressure: simple theory reconciled with practice. **European Journal of Physics**, v. 33, n. 2, p. 295–305, 2012. Disponível em: https://doi.org/10.1088/0143-0807/33/2/295

MONTEITH, J. L.; UNSWORTH, M. H. Steady-State Heat Balance. *In*: **Principles of Environmental Physics**. *[S. l.]*: Elsevier, 2013. p. 217–247. *E-book*. Disponível em: https://doi.org/10.1016/B978-0-12-386910-4.00013-5

MU, Y.; HU, Y.; JONES, C.; BIGGS, T.; DOMINGUES, T. F.; FUNK, C.; PETERSON, P. Increasing dry-season vapor pressure deficit in the Amazon Basin: historical trends, future projections, and links to deforestation. **Environmental Research Communications**, v. 7, n. 10, p. 101001, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.1088/2515-7620/ae0c5b

NOVICK, K. A. *et al.* The increasing importance of atmospheric demand for ecosystem water and carbon fluxes. **Nature Climate Change**, v. 6, n. 11, p. 1023–1027, 2016. Disponível em: https://doi.org/10.1038/nclimate3114

PEZZOPANE, J. R. M.; MARSETTI, M. M. S.; FERRARI, W. R.; PEZZOPANE, J. E. M. Alterações microclimáticas em cultivo de café conilon arborizado com coqueiro-anão-verde. **Revista Ciência Agronômica**, v. 42, n. 4, p. 865–871, 2011. Disponível em: https://doi.org/10.1590/S1806-66902011000400007

SEAGER, R.; HOOKS, A.; WILLIAMS, A. P.; COOK, B.; NAKAMURA, J.; HENDERSON, N. Climatology, Variability, and Trends in the U.S. Vapor Pressure Deficit, an Important Fire-Related Meteorological Quantity. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 54, n. 6, p. 1121–1141, 2015. Disponível em: https://doi.org/10.1175/JAMC-D-14-0321.1

YUAN, W. *et al.* Increased atmospheric vapor pressure deficit reduces global vegetation growth. **Science Advances**, v. 5, n. 8, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1126/sciadv.aax1396

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).