

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

PROJEÇÕES FUTURAS DO ÍNDICE DE ARIDEZ NO TERRITÓRIO BRASILEIRO

Eduardo Silva Alexandre¹; Tiago de Moura Marques Aguiar¹; Jamil A. A. Anache¹;

André Simões Ballarin¹ & Edson Wendland¹

Abstract: Aridity is defined as the degree of water availability necessary to sustain terrestrial life and is traditionally assessed using the aridity index (ϕ), which expresses the balance between precipitation (P) and potential evapotranspiration (PET). In the context of climate change, the reliability of the aridity index to represent future hydroclimatic conditions has been questioned, mainly due to the overestimation of PET by traditional equations. As an alternative, new PET formulations have been proposed to improve the characterization of aridity under global warming scenarios. This study aims to evaluate future changes in aridity across the entire Brazilian territory using the bias-corrected CLIMBra database. Different PET equations were applied in simulations based on two climate scenarios and ten models from CLIMBra, allowing the investigation of the impacts of these formulations on future aridity estimates. The results contribute to a more robust understanding of the uncertainties associated with aridity projections and provide valuable insights for water resource management in Brazil.

Resumo: A aridez é definida como o grau de disponibilidade hídrica necessário para sustentar a vida terrestre, sendo tradicionalmente avaliada por meio do índice de aridez (ϕ), que expressa o balanço entre a precipitação (P) e a evapotranspiração potencial (PET). Em um cenário de mudanças climáticas, a confiabilidade do índice de aridez para representar estados hidroclimatológicos futuros tem sido questionada, principalmente devido à superestimação de PET por equações tradicionais. Como alternativa, novas formulações de PET têm sido propostas para melhorar a caracterização da aridez em cenários de aquecimento global. Este estudo visa avaliar alterações futuras na aridez em todo o território brasileiro utilizando a base de dados CLIMBra com correção de viés. Foram aplicadas diferentes equações de PET em simulações baseadas em dois cenários climáticos e dez modelos do CLIMBra, permitindo investigar os impactos dessas formulações sobre as estimativas futuras de aridez. Os resultados contribuem para uma compreensão mais robusta das incertezas associadas às projeções de aridez e oferecem subsídios importantes para a gestão de recursos hídricos no Brasil.

Palavras-Chave – Índice de aridez; evapotranspiração potencial; mudanças climáticas

¹⁾ Afiliação: Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), Universidade de São Paulo, CxP. 359, São Carlos-SP, 13566-590. Email: esalexandre@usp.br, tiagommaguiar@usp.br, jamil.anache@usp.br, andre.ballarin@usp.br, ew@sc.usp.br.

1. INTRODUÇÃO

O termo aridez pode ser definido como o grau de umidade – ou disponibilidade hídrica – necessário para garantir e manter a vida nos ambientes terrestres (Greve *et al.*, 2017). De acordo com essa definição, ambientes áridos apresentam uma baixa disponibilidade hídrica, enquanto ambientes úmidos apresentam alta disponibilidade hídrica. Apesar da complexidade de se avaliar de maneira precisa o grau de aridez – ou o estado hidroclimatológico - de um determinado ambiente (Greve *et al.*, 2019), estudos recentes vêm utilizando o *índice de aridez* (ϕ) para esse fim (Fu; Feng, 2014; Huang *et al.*, 2016; Yang *et al.*, 2019). Esse índice considera que a aridez de um ambiente pode ser representada pelo balanço entre a demanda e a oferta de água pela atmosfera, representados pela evapotranspiração potencial (PET) e a precipitação (P), respectivamente (Budyko, 1974).

No contexto atual de mudanças climáticas, diversos estudos vêm projetando uma redução da disponibilidade hídrica como consequência do aumento da aridez ao redor do globo (Dai, 2013; Fu; Feng, 2014; Trancoso *et al.*, 2024). No Hemisfério Sul essa redução de fato já vem sendo observada em escala global (Blöschl; Chaffé, 2023), e, no Brasil, o cenário não é diferente. Chagas *et al.* (2022), utilizando dados observados, sugeriram uma alteração na intensidade do ciclo hidrológico com consequente tendência de aridificação em cerca de 50% do país. Similarmente, um estudo conduzido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) em conjunto com o Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais (CEMADEN) indicou tendências de aridificação ao longo de todo território nacional, com exceção da região Sul (Tomasella; Cunha; Marengo, 2024). Além disso, estudos utilizando projeções futuras vêm sugerindo que essa tendência de intensificação dos eventos de secas e redução da disponibilidade hídrica deve se manter em grande parte do país no futuro (Almazroui *et al.*, 2021; Ballarin *et al.*, 2023a, 2024; Ferreira *et al.*, 2023).

No geral, uma grande parcela desses estudos em escala global baseia-se somente na utilização do índice ϕ para avaliar potenciais mudanças nas condições de aridez futura (Park *et al.*, 2018; Sherwood; Fu, 2014). Estudos recentes, no entanto, vêm questionando a validade de ϕ para representar estados hidroclimatológicos futuros (Milly; Dunne, 2016), colocando em dúvida os resultados recentes acerca das tendências de alteração da aridez futura. Isso ocorre, dentre outros fatores, devido à falta de representatividade das equações tradicionais de PET utilizadas no cálculo de ϕ , que muitas vezes acaba superestimando a demanda hídrica atmosférica (Lemaitre-Basset; Oudin; Thirel, 2022; Milly; Dunne, 2016). Com base nessa limitação, equações alternativas para PET vêm sendo propostas com o intuito de melhor caracterizar o estado climatológico, representado por ϕ , em um contexto de aquecimento global (Yang *et al.*, 2019).

Diante do exposto e com base na importância de um preciso entendimento da aridez para a gestão sustentável de sistemas naturais e humanos, o presente trabalho tem como propósito avaliar as potenciais alterações na aridez futura em todo o território nacional. Através da utilização da base de dados CLIMBra (Ballarin *et al.*, 2023b) e de diferentes formulações PET – abrangendo níveis variados de complexidade – determinou-se o índice de aridez para o período histórico e futuro, considerando dois cenários no contexto do CMIP6: SSP2-4.5 e SSP5-8.5. Dessa maneira, o presente projeto busca melhorar a compreensão das mudanças na aridez no Brasil em um contexto de aquecimento global. Espera-se que os resultados encontrados possam auxiliar tomadas de decisões em políticas públicas relacionadas ao clima e a gestão de recursos hídricos.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. DADOS CLIMÁTICOS

O presente estudo utilizou a base de dados CLIMBra para determinação de ϕ e para as análises subsequentes. A base disponibiliza projeções climáticas com correção de viés e resolução espacial de 0,25° para o período histórico (1980-2013) e futuro (2015-2100), em escala diária, para seis diferentes variáveis climáticas: temperatura máxima, temperatura mínima, precipitação, umidade relativa, velocidade do vento, e radiação. A base CLIMBra compreende simulações feitas por até 19 modelos do CMIP6 – a depender da variável climática, forçadas por dois diferentes cenários: SSP2-4.5 e SSP5-8.5, representando níveis intermediário e extremo em termos de emissão de gases do efeito estufa e adoção ou não de políticas de mitigação, respectivamente. Por conta do interesse em avaliar diferentes formulações de PET e seus impactos nas estimativas futuras de aridez, optou-se pela utilização de dados de 10 modelos climáticos em que todas as variáveis climáticas necessárias para o cálculo de PET estão disponíveis. Ademais, diante dos potenciais erros sistemáticos e da falta de representatividade das simulações brutas na representação das variáveis climáticas no Brasil (Ballarin *et al.*, 2023b), o presente projeto focou na análise dos dados após aplicação do método de correção de viés nomeado mapeamento delta quantil (Cannon *et al.* 2015).

2.2. EQUACIONAMENTO DO ÍNDICE DE ARIDEZ

Foram utilizadas quatro diferentes formulações para determinação do índice de aridez, a depender da equação utilizada para cálculo de PET . A primeira delas (Equação 1) utiliza a equação clássica de Penman-Monteith para o cálculo de evapotranspiração potencial, amplamente utilizada em estudos de impacto climático (Lemaitre-Basset *et al.*, 2022), seguindo as especificações propostas pela FAO (*Food and Agriculture Organization of the United Nations*). A segunda (Equação 2), utiliza uma equação alternativa, proposta por Yang *et al.* (2019) que considera os efeitos da concentração de CO_2 na redução da perda de água por parte das plantas, afetando os valores de evapotranspiração potencial. A terceira equação (Equação 3), proposta por Priestley e Taylor (1972), representa uma simplificação da equação de Penman não exigindo a utilização de variáveis aerodinâmicas (Lemaitre-Basset *et al.*, 2022). A última equação, proposta por Hargreaves e Samani (1985), depende somente de dados de temperatura para a estimativa de PET , representando uma formulação menos complexa.

$$PET_{PM-FAO} = \frac{0,408.s.(R_n - G) + \gamma \cdot \left(\frac{900}{T+273} \right) \cdot u \cdot D}{s + \gamma \cdot (1 + 0,34 \cdot u)} \quad (1)$$

$$PET_{PM-CO_2} = \frac{0,408.s.(R_n - G) + \gamma \cdot \left(\frac{900}{T+273} \right) \cdot u \cdot D}{s + \gamma \cdot \{1 + u \cdot [0,34 + 2,4 \times 10^{-4} (CO_2 - 300)]\}} \quad (2)$$

$$PET_{PT} = \alpha \cdot \frac{s}{s+\gamma} \cdot \frac{(R_n - G)}{\lambda} \quad (3)$$

$$PET_{Hg} = 0,0023 \cdot 0,408 \cdot R_a \cdot (T + 17,8) \cdot (T_{max} - T_{min})^{0,5} \quad (4)$$

Em que: s é o gradiente da pressão de saturação ($Pa.K^{-1}$), R_n é o fluxo de radiação líquida ($MJ.m^{-2}.day^{-1}$), G é o fluxo de calor sensível para o solo ($MJ.m^{-2}.day^{-1}$), γ é a constante psicrométrica ($Pa.K^{-1}$), T é a temperatura média do ar ($^{\circ}C$), u é a velocidade do vento próximo à

superfície (2 m; m.s^{-1}), D é a diferença entre a pressão de vapor saturada e a real (Pa), Ra é a radiação solar no topo da atmosfera, obtida através dos dados de latitude e dia do ano, e α é uma constante ajustada para refletir a magnitude geral do calor latente em relação ao fluxo de calor sensível (em geral, $\alpha = 1.26$ para superfícies bem irrigadas). λ é o calor latente de vaporização da água $\approx 2,45 \text{ MJ/kg}$, necessário para converter de energia para volume de água evaporada (em mm). O termo $2.4 \times 10^{-4}(CO_2 - 300)$ contabiliza os efeitos das concentrações de CO_2 no uso da água pelas plantas. A constante 0.408 representa a conversão de unidades para mm de água equivalente. É importante ressaltar que os valores de PET calculados seguindo essas diferentes formulações serão disponibilizados em uma base de dados, descrita em artigo complementar submetido junto a esse trabalho, intitulado “*Evapotranspiração potencial em um contexto de mudanças climáticas para o território brasileiro*”.

A partir dos diferentes equacionamentos de PET , foram calculados diferentes valores de ϕ para todo o território nacional considerando o período histórico (1980-2013) e futuro (2015-2100), visando compreender as mudanças esperadas em ϕ nas escalas mensal, sazonal e anual nos períodos de futuro próximo (2015-2055) e futuro distante (2055-2100). O intuito de avaliar essas três diferentes escalas temporais (mensal, sazonal e anual) é compreender como o balanço entre oferta e demanda hídrica irá se alterar ao longo dos meses e estações, levando em conta, dessa maneira, a sazonalidade. Esse aspecto é fundamental visto que em muitos casos, regiões podem passar por períodos de insegurança hídrica apesar de um aumento geral na disponibilidade hídrica de longo-termo devido às alterações na distribuição temporal de P e PET . Entretanto, para o presente trabalho, o foco das análises foi dado somente às escalas anuais e de longo-termo.

2.3. ANÁLISE DE TENDÊNCIAS FUTURAS

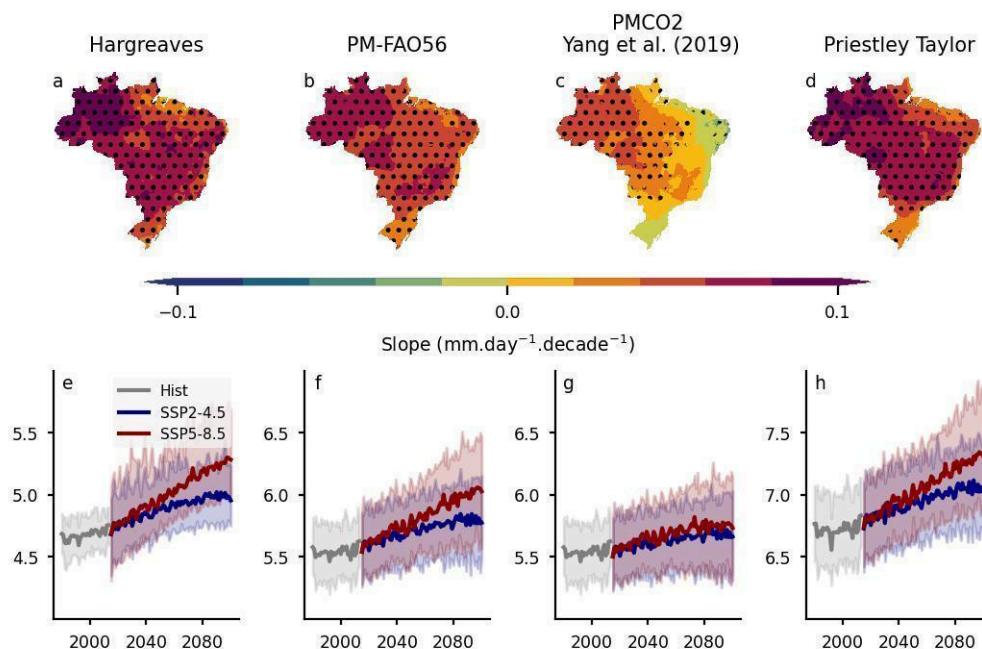
Para a análise das tendências nas séries temporais utilizadas neste estudo, empregou-se o teste de Mann-Kendall, uma ferramenta estatística não paramétrica amplamente adotada para a detecção de tendências monótonas, sejam elas crescentes ou decrescentes ao longo do tempo. Esse teste apresenta a vantagem de não requerer pressupostos sobre a distribuição dos dados, sendo, portanto, aplicável a séries não normais. No entanto, a presença de autocorrelação serial pode comprometer a validade dos resultados, especialmente no que diz respeito à significância estatística (valores de p). Para mitigar esse problema, utilizou-se a versão modificada do teste proposta por Hamed e Rao (1998), que incorpora uma correção da variância a fim de considerar os efeitos da autocorrelação. Diferentemente da versão original, que presume independência temporal entre as observações, o teste modificado permite a consideração de defasagens estatisticamente significativas, tornando-se mais robusto em contextos com dependência temporal. A magnitude da tendência foi estimada por meio do Sen's slope, que calcula a inclinação mediana entre todos os pares de pontos da série, oferecendo uma medida robusta da taxa de variação ao longo do tempo. O teste de Mann-Kendall foi aplicado aos dados em escala anual (média de PET diária).

3. RESULTADOS

A figura 1 contempla a avaliação espacial e temporal de tendências em dados de evapotranspiração potencial considerando o cenário SSP5-8.5, utilizando os diferentes métodos de estimativa de PET apresentados neste artigo e descritos em detalhe no artigo complementar. A magnitude das tendências foi calculada considerando o método Sen's slope, e a significância – representada pelas regiões hachuradas – seguiu o método modificado de Mann Kendall, considerando valor- $p = 0,05$. Para ambas as análises (temporal e espacial, primeira e segunda linha da Figura 1, respectivamente), os resultados foram expressos em termos do *ensemble* multi-modelo.

Nos painéis *a - d* verifica-se de maneira geral uma tendência de aumento do *PET* em grande parte do país para todos os métodos, com intensidade e padrão espacial variando conforme a equação utilizada. Em geral, os métodos de Priestley Taylor e Hargreaves apresentaram as tendências com maior magnitude. Destaca-se o painel *c* - que representa método proposto por Yang *et al.* (2019) e que leva em conta o efeito do aumento de CO_2 - mostrando valores mais moderados, especialmente na região Sul e parte da região Nordeste, onde foram observadas tendências positivas de *PET*, ainda que não significantes estatisticamente. Ainda, é importante ressaltar que, de acordo com as quatro formulações, as maiores tendências de aridificação foram encontradas na região Norte.

Figura 1 - Mapas de tendências estatísticas e gráficos de séries temporais médias de *PET* para o território nacional. (*a - d*) Tendência da evapotranspiração potencial *PET* (média, *ensemble* multimodelo) futura ao longo do território nacional de acordo com o cenário SSP5-8.5 e os quatro equacionamentos avaliados. Áreas hachuradas indicam tendências significantes estatisticamente. (*e - h*) Evolução temporal da *PET* média no Brasil ao longo dos anos, considerando os períodos histórico e futuro (SSP2-4.5 e SSP5-8.5). Linha representa o *ensemble* multi-modelo e a área hachurada indica a incerteza das simulações (intervalo de confiança formado a partir das simulações mínimas e máximas).



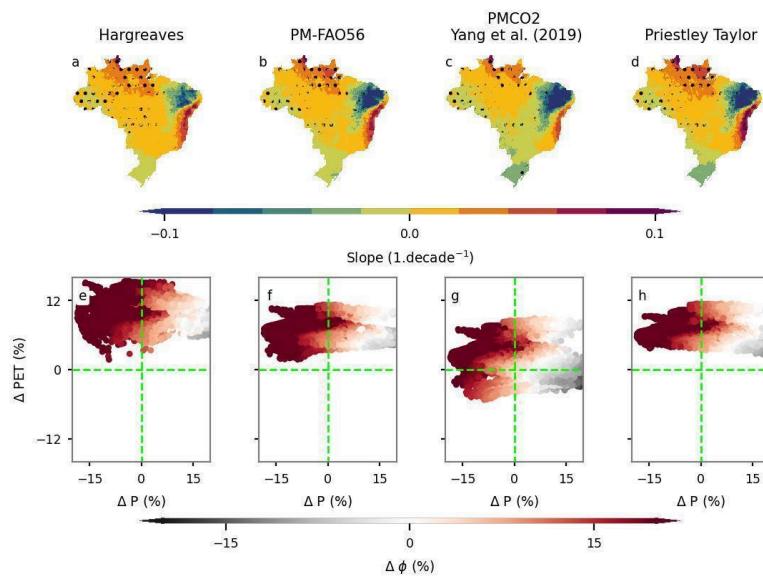
Nos painéis *e - f*, que representam a evolução temporal média em todo território nacional nota-se, em geral e como observado anteriormente, uma predominância de tendências positivas, sendo mais acentuada no cenário SSP5-8.5. Para todos os equacionamentos avaliados, a diferença entre os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5 aumenta ao longo do tempo, sendo maior no fim do século. Destaca-se novamente o método de Yang *et al.* (2019), que apresenta os menores valores médios de *PET* futuro, sugerindo que a inclusão dos efeitos de CO_2 reduz a estimativa da demanda atmosférica por água.

Para avaliar o impacto dessas diferentes formulações no índice de aridez e sua trajetória futura, determinou-se as tendências obtidas para cada uma das formulações, bem como a relação entre os desvios futuros projetados na precipitação, evapotranspiração potencial e sua relação com os desvios esperados em ϕ , a fim de entender os principais mecanismos de controle das mudanças da

aridez no país (Figura 2). Os resultados sugerem um padrão espacial de tendências similares, independente da formulação utilizada, com exceção da formulação de Penman-Monteith com consideração do CO_2 , que exibiu uma maior porção do país com tendências positivas dos que as demais. Em geral, espera-se um aumento do índice de aridez (aridificação) em grande parte do Brasil, com exceção da região Nordeste e Sul, que apresentam, em geral, tendências positivas em todas as formulações avaliadas. Entretanto, na maior parte dos casos, a tendência não é significativa estatisticamente.

A análise dos desvios sugere que, em geral, o principal mecanismo de controle na mudança da aridez é a precipitação, dado o padrão horizontal apresentado nos painéis *e - h*. Em geral, os grids com variação negativa na aridez ($\Delta\phi < 0$) apresentam variação positiva na precipitação ($\Delta P > 0$). Entretanto, isso não é válido para os desvios de evapotranspiração potencial ($\Delta PET > 0$). Isto é, mesmo para as formulações que exibiram um aumento generalizado de PET ao longo do país, pode-se observar regiões com desvios negativos na aridez ($\Delta\phi < 0$), devido ao aumento de chuva esperado, como é o caso, por exemplo, da região Sul e da região Nordeste. Em outras palavras, em muitas regiões o aumento da precipitação leva a um tendência de umidificação, independente da mudança projetada em PET . Por fim, é importante destacar que a utilização do ensemble médio (média multimodelo) na representação dos resultados altera a relação direta entre os desvios relativos individuais de PET , P e ϕ . Isso explica por que os desvios relativos projetados para P e PET não necessariamente dividem os valores positivos e negativos do desvio de ϕ .

Figura 2 - Mapas de tendências estatísticas na aridez e relação entre desvios de P , PET e ϕ para todo o território nacional. (a - d) Tendência do índice de aridez ϕ (média, *ensemble* multi-modelo) futuro ao longo do território nacional de acordo com o cenário SSP5-8.5 e os quatro equacionamentos avaliados. Áreas hachuradas indicam tendências significantes estatisticamente. (e - h) Relação entre os desvios relativos de P , PET e ϕ projetados entre o período histórico e futuro distante (2070-2100, SSP5-8.5). Cada ponto representa um grid da malha do território nacional. Uma linha tracejada verde divide os desvios positivos e negativos de P e PET .



4. CONCLUSÃO

Este estudo investigou as projeções futuras do índice de aridez no território brasileiro, com base em múltiplas formulações do evapotranspiração potencial (PET), aplicadas a um conjunto de

modelos climáticos do CMIP6 com correção de viés via mapeamento delta quantil, disponibilizados na base CLIMBra. As análises demonstraram que, sob ambos os cenários de concentração de gases de efeito estufa (SSP2-4.5 e SSP5-8.5), observa-se uma tendência predominante da intensificação da aridez ao longo do século, sendo mais acentuada no cenário SSP5-8.5.

A inclusão de efeitos fisiológicos do aumento da concentração de CO_2 atmosférico, como proposto por Yang *et al.* (2019), resultou em estimativas mais moderadas de PET e os menores incrementos projetados de aridez, corroborando com a crescente literatura que destaca a superestimação de PET em equações tradicionais, como Penman-Monteith, em cenários de aquecimento climático.

A análise integrada dos desvios relativos de precipitação, PET e índice de aridez indicou que, apesar do aumento projetado na demanda atmosférica por água, a precipitação permanece como fator dominante nas variações interanuais e espaciais da aridez futura. Particularmente nas regiões Nordeste e Sul, os aumentos projetados na precipitação compensam parcialmente ou integralmente os aumentos de PET , resultando em tendências não significativas ou até mesmo negativas do índice de aridez.

Ao fornecer uma avaliação abrangente das incertezas relacionadas à estimativa do índice de aridez, este trabalho contribui para um entendimento mais robusto sobre os impactos das mudanças climáticas no balanço hídrico do Brasil. As informações geradas são estratégicas para embasar políticas públicas de gestão adaptativa dos recursos hídricos, planejamento territorial e mitigação dos impactos decorrentes da intensificação dos processos de aumento da aridez sob mudanças climáticas globais.

AGRADECIMENTOS – Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo suporte financeiro (Processos nº 2023/18011-0, 2024/13670-9 e nº 2025/00248-0).

REFERÊNCIAS

- ALMAZROUI, M. *et al.* (2021). “*Assessment of CMIP6 Performance and Projected Temperature and Precipitation Changes Over South America*”. *Earth Systems and Environment*, [s. l.], v. 5, n. 2, p. 155–183.
- BALLARIN, A.S. *et al.* (2023a). “*Brazilian Water Security Threatened by Climate Change and Human Behavior*”. *Water Resources Research*, [s. l.], v. 59, p. e2023WR034914.
- BALLARIN, A.S. *et al.* (2023b). “*CLIMBra - Climate Change Dataset for Brazil*”. *Scientific Data*, [s. l.], p. 1–31.
- BALLARIN, A.S. *et al.* (2024). “*Drought intensification in Brazilian catchments: implications for water and land management*”. *Environmental Research Letters*, [s. l.], v. 19, n. 5, p. 054030.
- BERGHUIJS, W.R. *et al.* (2024). “*Groundwater recharge is sensitive to changing long-term aridity*”. *Nature Climate Change*, [s. l.], v. 14, n. 4, p. 357–363.

BLÖSCHL, G.; CHAFFE, P.L.B. (2023). “*Water scarcity is exacerbated in the south*”. *Science*, [s. l.], v. 382, n. 6670, p. 512–513

BUDYKO, M.I. *Climate and Life*. New York: Academic Press, 1974.

BYRNE, M.P.; O'GORMAN, P.A. (2015). “*The response of precipitation minus evapotranspiration to climate warming: Why the “Wet-get-wetter, dry-get-drier” scaling does not hold over land*”. *Journal of Climate*, [s. l.], v. 28, n. 20, p. 8078–8092.

CANNON, A.J.; SOBIE, S.R.; MURDOCK, T.Q (2015). “*Bias correction of GCM precipitation by quantile mapping: How well do methods preserve changes in quantiles and extremes?*”. *Journal of Climate*, [s. l.], v. 28, n. 17, p. 6938–6959.

CHAGAS, V.B.P.; CHAFFE, P.L.B.; BLÖSCHL, G. (2022). “*Climate and land management accelerate the Brazilian water cycle*”. *Nature Communications*, [s. l.], n. 13:5136.

DAI, A (2023). “*Increasing drought under global warming in observations and models*”. *Nature Climate Change*, [s. l.], v. 3, n. 1, p. 52–58.

FERREIRA, G.W.S. et al. (2023). “*Assessment of Precipitation and Hydrological Droughts in South America through Statistically Downscaled CMIP6 Projections*”. *Climate*, [s. l.].

FU, Q.; FENG, S. (2014). “*Responses of terrestrial aridity to global warming*”. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, [s. l.], v. 119, n. 13, p. 7863–7875.

GREVE, P. et al. (2019). “*The aridity Index under global warming*”. *Environmental Research Letters*, [s. l.], v. 14, n. 12.

GREVE, P.; RODERICK, M.L.; SENEVIRATNE, S.I. (2017). “*Simulated changes in aridity from the last glacial maximum to 4xCO₂*”. *Environmental Research Letters*, [s. l.], v. 12, n. 11, p. 114021.

HAMED, K.A.; RAO, A.R. (1998). “*A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data*”. *Journal of Hydrology*, v. 204, n. 1–4, p. 182–196.

HARGREAVES, G.H.; SAMANI, Z.A. (1985). “*Reference Crop Evapotranspiration from Temperature*”. *Applied Engineering in Agriculture*, [s. l.], v. 1, n. 2, p. 96–99.

HOEK V.D.; ANNE, J. et al. (2022). “*Shifts in regional water availability due to global tree restoration*”. *Nature Geoscience*, [s. l.], v. 15, n. 5, p. 363–368.

HUANG, J. et al. (2016). “*Accelerated dryland expansion under climate change*”. *Nature Climate Change*, [s. l.], v. 6, n. 2, p. 166–171.

LEMAITRE-BASSET, T. et al. (2022). “*Unraveling the contribution of potential evaporation formulation to uncertainty under climate change*”. *Hydrology and Earth System Sciences*, [s. l.], v. 26, n. 8, p. 2147–2159.

LEMAITRE-BASSET, T.; OUDIN, L.; THIREL, G.. (2022). “*Evapotranspiration in hydrological models under rising CO₂: a jump into the unknown*”. *Climatic Change*, [s. l.], v. 172, n. 3–4, p. 1–19.

MILLY, P.C.D.; DUNNE, K.A. (2016). “*Potential evapotranspiration and continental drying*”. *Nature Climate Change*, [s. l.], v. 6, n. 10, p. 946–949.

PARK, CHANG-EUI *et al.* (2018). “*Keeping global warming within 1.5 °C constrains emergence of aridification*”. *Nature Climate Change*, [s. l.], v. 8, n. 1, p. 70–74.

PRIESTLEY, C.H.B.; TAYLOR, R.J. (1972). “*On the Assessment of Surface Heat Flux and Evaporation Using Large-Scale Parameters*”. *Monthly Weather Review*, [s. l.], v. 100, n. 2, p. 81–92.

SHERWOOD, S.; FU, Q. (2014). “*A Drier Future?*”. *Science*, [s. l.], v. 343, n. 6172, p. 737–739.

TEULING, A.J. *et al.* (2013). “*Evapotranspiration amplifies European summer drought*”. *Geophysical Research Letters*, [s. l.], v. 40, n. 10, p. 2071–2075.

TOMASELLA, J.; CUNHA, A.P.A.; MARENKO, J.A.. (2024). “*Nota Técnica: Elaboração dos Mapas de índice de Aridez e Precipitação Total Acumulada para o Brasil*”. [S. l.]: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Disponível em:
https://www.gov.br/cemaden/pt-br/assuntos/noticias-cemaden/estudo-do-cemaden-e-do-inpe-identifica-pela-primeira-vez-a-ocorrencia-de-uma-regiao-arida-no-pais/nota-tecnica_aridas.pdf/view.

TRANCOSO, R. *et al.* (2024). “*Significantly wetter or drier future conditions for one to two thirds of the world’s population*”. *Nature Communications*, [s. l.], v. 15, n. 1, p. 483.

VICENTE-SERRANO, S.M. *et al.* (2022). “*Global drought trends and future projections*”. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, [s. l.], v. 380, n. 2238.

YANG, Y. *et al.* (2019). “*Hydrologic implications of vegetation response to elevated CO₂ in climate projections*”. *Nature Climate Change*, [s. l.], v. 9, n. 1, p. 44–48.