

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

Correlação entre Aerossóis Atmosféricos e Evapotranspiração na Bacia Hidrográfica do Rio Itacaiúnas: Uma Análise Espacial e Temporal (2001–2024)

*Laura Carolina Trindade Santos¹ ; Camile Cristina Braga da Silva²; Emily Amaro Pires³;
Priscila dos Santos Ribeiro²; Maria Regina Oliveira de Silva¹; Paulo Rógenes Monteiro Pontes¹;
Rafael da Silva Palácios².*

Resumo: A Bacia Hidrográfica do Rio Itacaiúnas (BHRI), localizada no sudeste do Pará, Brasil, apresenta uma dinâmica ambiental complexa influenciada por fatores naturais e antrópicos. Este estudo analisou a distribuição espaço-temporal da profundidade óptica de aerossóis (AOD) e evapotranspiração (ET) na região da BHRI e correlação entre essas variáveis, utilizando dados de 2001 a 2024. Os resultados indicam um padrão sazonal distinto: durante o período chuvoso (janeiro a maio), a AOD permanece baixa, possivelmente devido à remoção de partículas por deposição úmida, enquanto a ET urbana permanece elevada. Na estação menos chuvosa (agosto a outubro), observa-se um aumento acentuado da AOD, especialmente em áreas urbanas e de pastagem, coincidindo com correlações negativas significativas ($p < -0,5$, $p < 0,05$), sugerindo impacto na ET e alteração do ciclo hidrológico local. As áreas florestais mantêm uma ET mais constante durante o período menos chuvoso, reforçando o papel da vegetação para regulação do ciclo hidrológico.

Palavras-Chave – Ciclo hidrológico, Bacia hidrográfica.

INTRODUÇÃO

Os aerossóis atmosféricos são definidos como partículas em suspensão na atmosfera, também chamados de material particulado (MP), como poeira, fuligem, nevoeiro ou sprays. Classificam-se em aerossóis primários (emitidos diretamente na atmosfera) ou secundários (formados quimicamente na atmosfera), com origens naturais — como neblina, vulcões e sais marinhos — ou antropogênicas, como queimadas, emissões urbanas e industriais (Seinfeld & Pandis, 2016; Romera et al., 2019). Quando estão em suspensão na atmosfera podem influenciá-la com os chamados efeitos diretos e indiretos. O efeito direto ocorre quando essas partículas absorvem ou espalham a radiação solar, causando resfriamento ou aquecimento da superfície, conforme suas propriedades ópticas e o albedo do solo, e interferem no perfil vertical de temperatura, por consequência, nos processos atmosféricos e no balanço de radiação global (Artaxo et al., 2006). Quanto ao efeito indireto, ocorre devido a atuação dos aerossóis como núcleos de condensação de nuvens, que quando estão em excesso na atmosfera podem influenciar em padrões de precipitação e alterar o albedo das nuvens (Artaxo et al., 2003). A profundidade óptica de aerossóis (AOD, do inglês *Aerosol Optical Depth*) é um indicador amplamente utilizado para identificar a presença de partículas em suspensão na atmosfera, sendo um parâmetro essencial para entender os efeitos diretos e indiretos dos aerossóis no balanço de energia da superfície.

1) Instituto Tecnológico Vale - ITV: R. Boaventura da Silva, 955 - Nazaré, Belém - PA, 66055-090, (91) 3213-5424.

2) Universidade Federal do Pará - UFPA: Rua Augusto Corrêa, 01 – Bairro Guamá – CEP 66075-110, Belém – Pará – Amazônia – Brasil, (91) 3201-7390.

3) Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE: Rodovia Presidente Dutra, km 40, CEP 12630-000 Cachoeira Paulista - SP – Brasil, (12) 3186-9300.

A evapotranspiração (ET) é uma das componentes do ciclo hidrológico, que regula a distribuição da água e influencia diretamente o clima e os ecossistemas, é a combinação entre a evaporação da superfície e a transpiração das plantas e desempenha um papel muito importante de devolver vapor d'água à atmosfera, que pode ser afetada pelos efeitos dos aerossóis atmosféricos em suspensão devido aos efeitos indiretos e diretos dessa variável (Brutsaert, 2023; Trenberth, 1999; Pontes et al., 2019). Além disso, o ciclo hidrológico contribui para a regulação dos padrões de precipitação, temperatura e umidade, fatores que afetam diretamente a agricultura, o abastecimento de água potável e o equilíbrio dos ecossistemas. (Tundisi, 2003; Okie Kanae, 2006). Nesse contexto, a vegetação funciona como reguladora neste ciclo, contudo com a intensificação das mudanças climáticas vêm intensificando o ciclo hidrológico, aumentando as taxas de evaporação e a concentração de vapor atmosférico, o que pode gerar eventos de precipitação mais extremos e alterar a disponibilidade hídrica em diversas regiões (Tundisi, 2003; Okie Kanae, 2006; Brutsaert, 2023; Trenberth, 1999; Pontes et al., 2019; Ehtasham, Sherani e Nawaz, 2024).

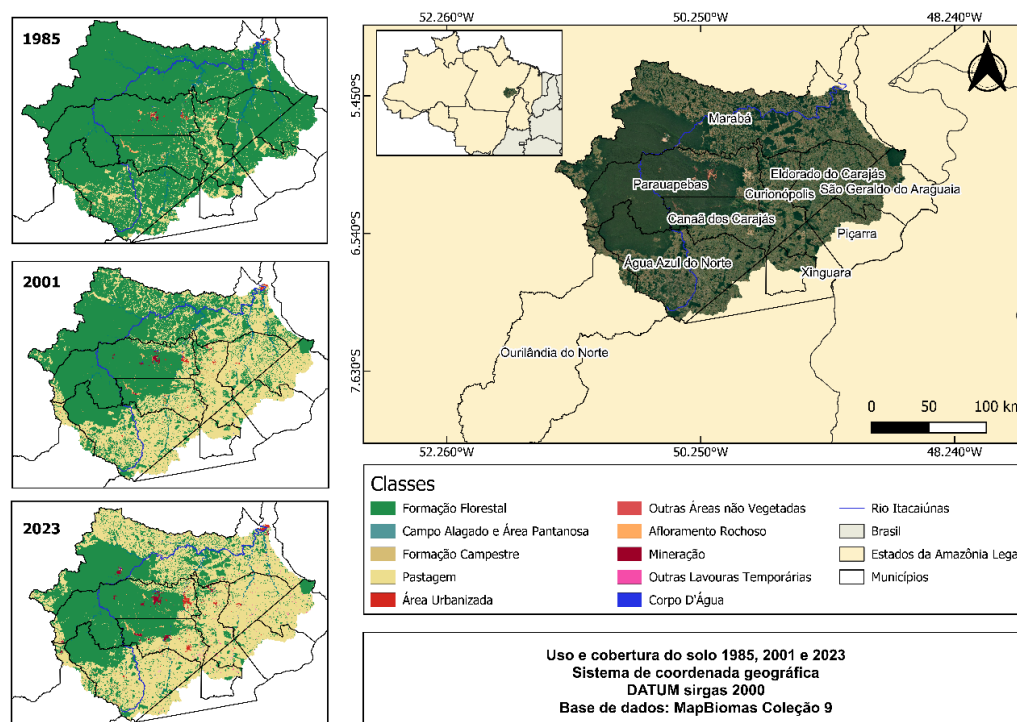
A bacia hidrográfica do rio Itacaiunas, situada no estado do Pará, representa uma região de grande importância ecológica e socioeconômica, especialmente em função das atividades de mineração e expansão urbana que podem contribuir para o aumento das concentrações de aerossóis na atmosfera. Entender como a presença desses aerossóis pode impactar os fluxos de evapotranspiração na bacia é essencial para avaliar os efeitos ambientais dessas atividades e subsidiar estratégias de manejo sustentável dos recursos hídricos (Dias et al., 2021; Souza-Filho et al., 2016). Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo analisar a correlação entre a profundidade óptica de aerossóis (AOD) e a evapotranspiração (ET) na bacia hidrográfica do rio Itacaiunas, no período de 2021 a 2024.

MATERIAL E METODO

A região de estudo compreende a Bacia Hidrográfica do Rio Itacaiúnas (BHRI) que está localizada no sudeste do estado do Pará, abrangendo uma área de aproximadamente 41.318 km². Sua nascente se encontra na Serra da Seringa, no município de Água Azul do Norte, e o rio percorre diversos municípios, incluindo Marabá, Canaã dos Carajás, Parauapebas e Eldorado dos Carajás, até desaguar na margem esquerda do Rio Tocantins. A região é caracterizada por uma vegetação floresta tropical, com áreas de cerrado e campos, e é atravessada por importantes unidades de conservação, como a Floresta Nacional de Carajás (Souza-Filho et al., 2016). Para este trabalho, foram obtidos dados de uso e cobertura do solo para os anos de 1985, 2001 e 2023, utilizando o ambiente de processamento Google Earth Engine (GEE) e o Projeto MapBiomass, coleção 9. No que diz respeito à bacia do rio Itacaiunas, sua delimitação foi obtida a partir do banco de dados disponibilizado pela ANA (Agência Nacional de Águas), enquanto os limites municipais foram extraídos do site do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). A evapotranspiração (ET) foi obtida a partir do produto Terra MODIS MOD16A2GF, versão 6.1, com resolução espacial de 500 metros e compostos temporais de 8 dias. Os dados são baseados na equação de Penman-Monteith, utilizando entradas de reanálises meteorológicas e produtos MODIS relacionados à vegetação e à superfície terrestre (Running et al., 2019). A profundidade óptica de aerossóis (AOD) foi extraída do produto MCD19A2 (satélites Terra + Aqua), com resolução espacial de 1 km, gerado a partir do algoritmo MAIAC (Multi-angle Implementation of Atmospheric Correction), utilizando a banda de 550 nm (Lyapustin e Wang, 2018). O período de análise abrange a série temporal disponível, de 2001 a 2024. O processamento dos dados foi realizado no software Python, com leitura espacial pixel a pixel. Para reduzir a

variabilidade dos dados de AOD e ET, foram calculadas as médias mensais de cada variável antes da aplicação da análise estatística.

Figura 1- Evolução espaço-temporal do uso e cobertura da terra na Bacia Hidrográfica do Rio Itacaiúnas.
Fonte: Autores (2025).



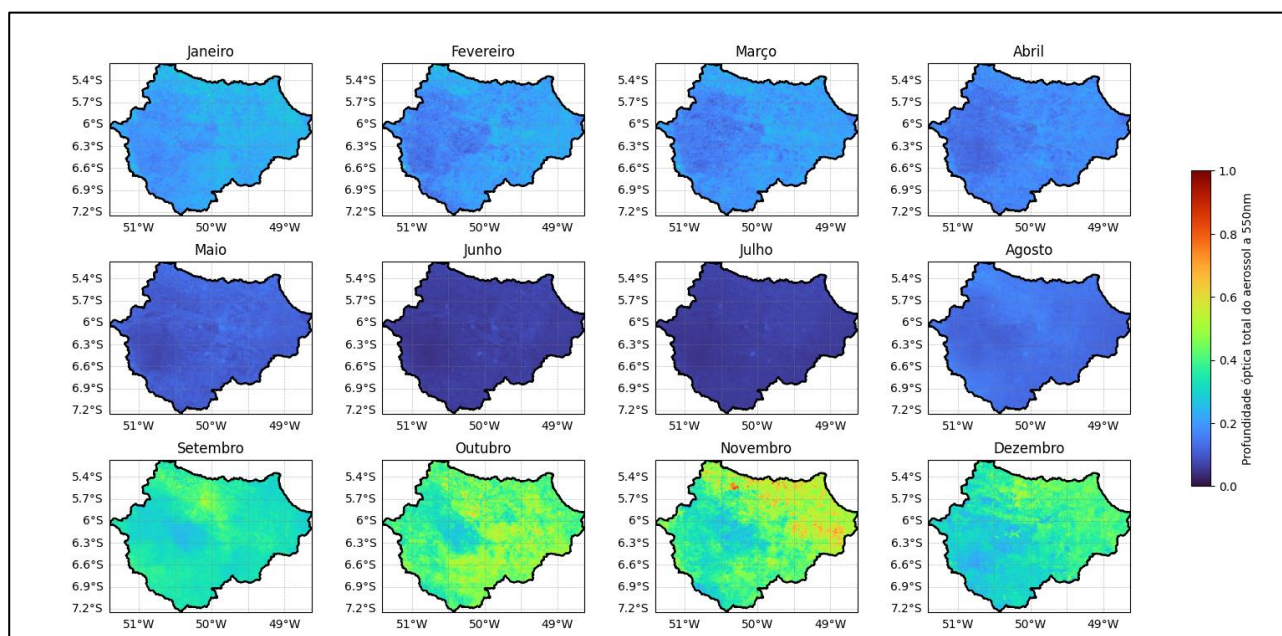
A correlação entre as variáveis foi avaliada utilizando o Coeficiente de Correlação de Spearman (equação 1), indicado para dados não paramétricos e variáveis ordinais. Para cada par de observações, a diferença d_i entre os postos das variáveis x_i e y_i é determinada, e o quadrado dessas diferenças é somado ($\sum d_i^2$). O coeficiente final é obtido ao substituir esses valores na fórmula, refletindo a força e a direção da relação entre as variáveis ordenadas (Guimarães, 2017). Para verificar se essa correlação difere significativamente de zero, utilizou-se o **teste t**, que considera a correlação e o número de pares de dados (graus de liberdade = $n - 2$), gerando um valor de t e um **p-valor**. Quando esse p -valor é menor que o nível de significância adotado (geralmente $\alpha = 0,05$), pode-se concluir que a correlação observada é estatisticamente significativa. O método assegura que não somente a força da associação seja quantificada, mas também sua confiabilidade estatística. Essa medida avalia o grau de associação entre duas variáveis, considerando suas posições relativas, em vez de seus valores absolutos (Guimarães, 2017).

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n d_i^2}{n^3 - n} \quad (1)$$

RESULTADOS

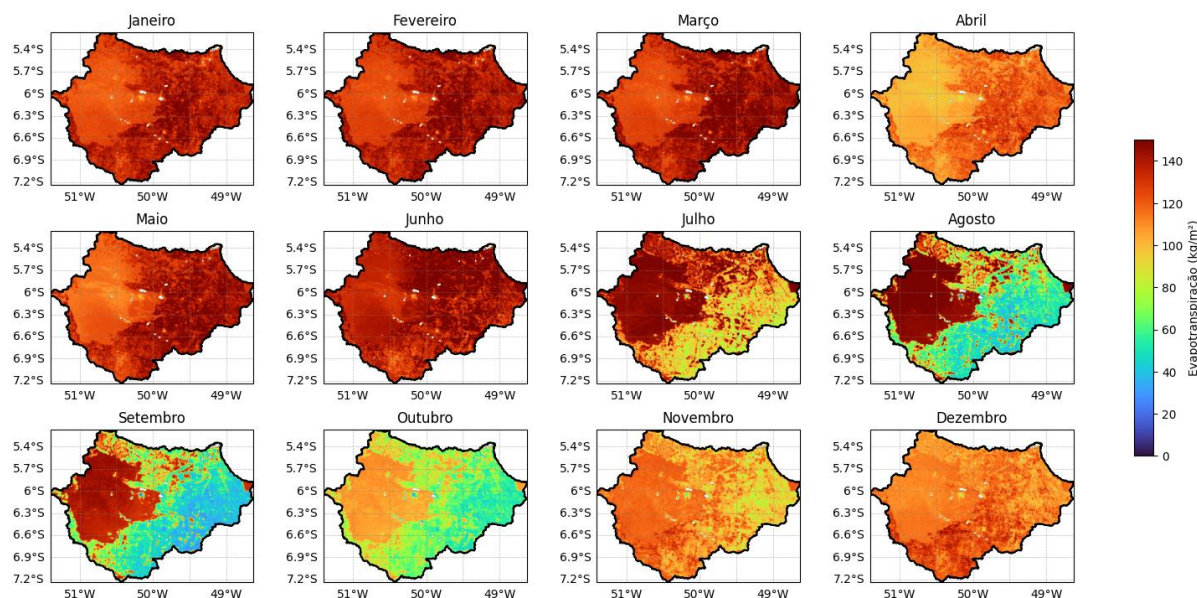
Na figura 2 é possível observar que a AOD sobre a bacia de janeiro a abril possui valores baixos (entre 0,08 a 0,2), podendo ter a influência de aerossóis antropogênicos (como queima de combustível por veículos automotores) e de origem natural oriundos da fauna de carajás e retirada dessas partículas da atmosfera por deposição úmida (Artaxo et al., 2002). A partir do mês de maio é possível observar uma queda dos valores de AOD que se prolonga até os meses de junho e julho. Já em agosto nota-se um leve aumento nessa variável, com valores ainda mais elevados nos meses de setembro a novembro com valores chegando próximo ao valor máximo (1,0), principalmente sobre as regiões onde há ocupação urbana e áreas de pastagem e subsequente redução da AOD em dezembro. Esse comportamento pode se dar em função das queimadas na estação seca, especialmente em áreas urbanas e de pastagem, que emitem grande quantidade de fumaça e partículas, e com a entrada da estação chuvosa retornam a diminuir devido a deposição úmida (Artaxo et al., 2002).

Figura 2 - Média mensal da variação espaço-temporal da AOD do período de 2001 a 2024



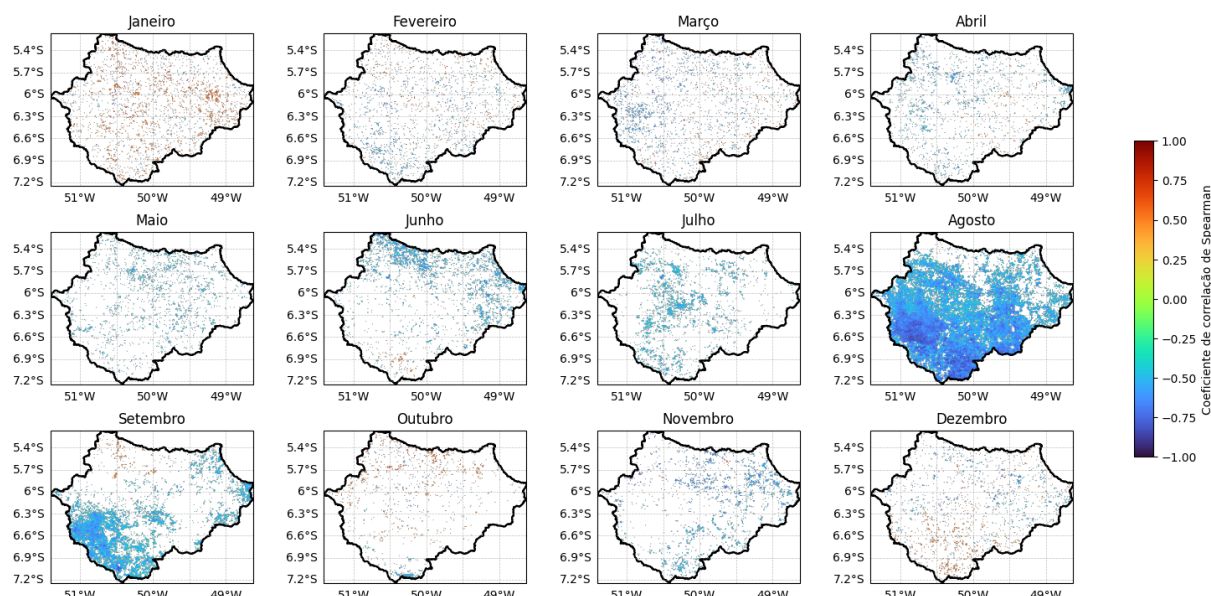
Na figura 3 é possível observar que durante grande parte do período mais chuvoso na BHRI, os valores de ET sobre a região antropizada foram superiores aos observados sobre a área florestal da Floresta Nacional de Carajás, atingindo valores de até 210 kg/m² entre os meses de janeiro a junho, este padrão pode ser justificado por diferentes mecanismos que controlam a perda de água para a atmosfera em ambientes naturais e urbano. Nas áreas urbanas, a presença de superfícies impermeáveis como asfalto e concreto favorece o acúmulo e rápida evaporação da água das chuvas, especialmente com a contribuição do efeito de ilha de calor urbano (Oke, 1982; Grimmond, 2007). Por outro lado, na floresta, a evapotranspiração é regulada por processos fisiológicos das plantas e pela capacidade de interceptação das copas (Trenberth, 1999; Shuttleworth, 1989). Observa-se que, a partir de julho até outubro, há uma redução da evapotranspiração sobre as áreas antropizadas, enquanto a cobertura florestal mantém níveis relativamente mais elevados, especialmente em agosto e setembro. Esse comportamento é consistente com o papel das áreas florestais como reguladoras da umidade atmosférica, mesmo durante o período seco (Marengo et al., 2001). Nos meses de novembro e dezembro, verifica-se um aumento geral nos valores de ET, acompanhando o início da estação chuvosa na bacia.

Figura 3 - Média mensal da distribuição espaço-temporal da ET sobre a BHRI do período de 2001 a 2024.



A correlação de Spearman entre AOD e ET revela padrões heterogêneos. No período chuvoso (meses de dezembro a maio) é possível observar tantos valores de correlação significativa positiva e negativa na extensão da bacia, podendo indicar uma relação entre aerossóis naturais beneficiando ou prejudicando os padrões de ET. Durante os meses menos chuvosos (agosto–outubro), as regiões com alta AOD – associadas a queimadas – apresentam correlação negativa estatisticamente significativa ($\rho < -0,5$, $p < 0,05$) com ET, indicando uma possível influência entre as partículas em suspensão e a radiação direta, o que se justificaria, pois é possível observar uma diminuição de ET nas regiões antropizadas.

Figura 4 - Coeficiente de correlação de Sperman entre as variáveis de AOD e ET no período de 2001 a 2024



CONCLUSÃO

Os resultados demonstram um padrão sazonal entre AOD e ET na bacia do Itacaiúnas. Durante a estação chuvosa (janeiro–maio), a AOD mantém-se baixa devido à possível remoção de partículas por deposição úmida e a pouca influência de aerossóis na região, enquanto a evapotranspiração urbana permanece elevada por conta do calor armazenado em superfícies impermeáveis. Já na estação seca (agosto–outubro), o aumento acentuado da AOD, em especial em áreas urbanas e de pastagem, coincide com correlações negativas significativas ($p < -0,5$, $p < 0,05$), podendo estar afetando a ET e alterando o ciclo hidrológico local. As áreas florestais, por outro lado, mantêm uma ET mais constante durante o período seco, reforçando o papel das copas vegetais na regulação da umidade.

Esses resultados destacam que a interação entre aerossóis e evapotranspiração pode sim ser influenciada por fatores sazonais, uso do solo e dinâmicas atmosféricas locais. A correlação negativa durante a seca reforça a existência de um possível impacto das partículas em variáveis como a evapotranspiração.

REFERÊNCIAS

- ARTAXO, Paulo et al. Efeitos climáticos de partículas de aerossóis biogênicos e emitidos em queimadas na Amazônia. *Revista brasileira de meteorologia*, v. 21, n. 3a, p. 168-22, 2006.
- ARTAXO, Paulo et al. Physical and chemical properties of aerosols in the wet and dry seasons in Rondônia, Amazonia. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, v. 107, n. D20, p. LBA 49-1-LBA 49-14, 2002.
- ARTAXO, Pedro; LARA, L. B. L. S.; PAULIQUEVIS, T. M. Dry and wet deposition in Amazonia: from natural biogenic aerosols to biomass burning impacts. *Int. Glob. Atmos. Chem. Newsl*, v. 27, p. 12-16, 2003.
- BRUTSAERT, Wilfried. *Hydrology*. Cambridge university press, 2023.
- Dias, L. B. A., da Silva Garcia, P., Pereira, L. C., & Júnior, A. P. (2021). Análise multitemporal de desflorestamento e queimadas na sub-bacia do rio Itacaiúnas, Marabá–Pará. *Research, Society and Development*, 10(3), e34010313255-e34010313255.
- EHTASHAM, Laraib; SHERANI, Sadia Hassan; NAWAZ, Faheem. Acceleration of the hydrological cycle and its impact on water availability over land: an adverse effect of climate change. *Meteorology Hydrology and Water Management*, 2024.
- GRIMMOND, S. U. E. Urbanization and global environmental change: local effects of urban warming. *The Geographical Journal*, v. 173, n. 1, p. 83-88, 2007.
- GUIMARÃES, Paulo Ricardo B. *Análise de Correlação e medidas de associação*. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, p. 1-26, 2017.

- LYAPUSTIN, Alexei; WANG, Yujie. MODIS Multi-angle Implementation of Atmospheric Correction (MAIAC) data user's guide. NASA: Greenbelt, MD, USA, v. 6, n. June, p. 1-19, 2018.
- MARENGO, José A. et al. Onset and end of the rainy season in the Brazilian Amazon Basin. *Journal of Climate*, v. 14, n. 5, p. 833-852, 2001
- OKI, Taikan; KANAE, Shinjiro. Ciclos hidrológicos globais e recursos hídricos mundiais. *Science*, v. 313, n. 5790, p. 1068-1072, 2006.
- OKE, Timothy R. The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly journal of the royal meteorological society*, v. 108, n. 455, p. 1-24, 1982.
- PONTES, Paulo RM et al. The role of protected and deforested areas in the hydrological processes of Itacaiúnas River Basin, eastern Amazonia. *Journal of environmental management*, v. 235, p. 489-499, 2019.
- ROMERA, Kelly Sousa et al. Variabilidade interanual das propriedades óticas de aerossóis em biomas distintos na Amazônia Legal. *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 25, 2019.
- RUNNING, Steven W. et al. Produto de evapotranspiração terrestre global (ET) MODIS (MOD16A2/A3 e MOD16A2GF/A3GF preenchido com lacunas de fim de ano) Sistema de Observação da Terra da NASA Algoritmo MODIS Land (para a coleção 6). Administração Nacional de Aeronáutica e Espaço, Washington, DC, EUA [conjunto de dados], <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD16A2>, v. 6, 2019.
- SEINFELD, John H.; PANDIS, Spyros N. *Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change*. John Wiley & Sons, 2016.
- SHUTTLEWORTH, WJ Micrometeorologia de florestas temperadas e tropicais. *Philosophical Transactions da Royal Society of London. B, Ciências Biológicas*, v. 324, n. 1223, p. 299-334, 1989.
- SOUZA-FILHO, P. W. M., de Souza, E. B., Júnior, R. O. S., Nascimento Jr, W. R., de Mendonça, B. R. V., Guimarães, J. T. F., ... & Siqueira, J. O. (2016). Four decades of land-cover, land-use and hydroclimatology changes in the Itacaiúnas River watershed, southeastern Amazon. *Journal of environmental management*, 167, 175-184.
- TRENBERTH, Kevin E. Atmospheric moisture recycling: Role of advection and local evaporation. *Journal of Climate*, v. 12, n. 5, p. 1368-1381, 1999.
- TUNDISI, José Galizia. Ciclo hidrológico e gerenciamento integrado. *Ciência e Cultura*, v. 55, n. 4, p. 31-33, 2003.