

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

MONITORAMENTO DE ALTA FREQUÊNCIA DO VENTO NA BARRAGEM DO LAGO PARANOÁ – DF

Alice Rocha Pereira¹ & Sergio Koide²

Abstract: Monitoring the wind near lakes is essential given its influence on the hydrodynamics of lentic ecosystems. It is the driving force behind turbulence and circulation, determining periods of mixing and stratification, causing changes in the distribution of particles and nutrients. This study aimed to characterise the wind field at the monitoring station located near the Paranoá Lake Dam using high-frequency monitoring data. The results indicated that the winds were most intense and variable during the wet season (October to February), with the least intensity and variability occurring in June and July. The greatest variations and speeds occurred throughout the day. In addition, there was a greater predominance of winds from the southeast (SE) and northwest (NO) directions throughout the day, with a slight reduction in the influence of these two directions at night, with the influence of the north (N) and south (S) directions also evident.

Resumo: O monitoramento do vento nas proximidades de lagos é essencial tendo em vista sua influência sobre a hidrodinâmica dos ecossistemas lântico, sendo a força motora que produz turbulência e circulação, podendo determinar períodos de mistura e estratificação ocasionando alterações na distribuição de partículas e nutrientes. Dessa forma, o presente estudo teve como objetivo caracterizar o campo de vento na Estação anemométrica localizada nas proximidades da Barragem do lago Paranoá a partir de dados de monitoramento de alta frequência. Os resultados indicaram ventos mais intensos e variáveis no período úmido (outubro a fevereiro), enquanto os meses de junho e julho foram os meses com menor intensidade e variabilidade. Quanto aos turnos, as maiores variações e velocidades ocorrem ao longo do dia. Além disso, observou-se a maior predominância de ventos nas direções SE e NO ao longo do dia, com leve redução da influência dessas duas direções durante a noite, turno no qual a maior predominância é SE e NO mas também se nota a influência das direções N e L.

Palavras-Chave – velocidade do vento, direção, monitoramento in situ.

INTRODUÇÃO

O vento é uma forçante meteorológica que influencia diretamente a hidrodinâmica de lagos grandes, sendo, por muitas vezes, a força motora primária e determinante para a mistura vertical nesses corpos d'água. O vento age principalmente no epilímnio (camada superficial), gerando turbulência e alterando a circulação, distribuição dispersão e transporte de partículas e nutrientes (Le *et al.*, 2023; Jalil *et al.*, 2020). Consequentemente, tais processos podem resultar em alterações nas comunidades biológicas, macro invertebrados e, inclusive, na distribuição e floração de cianobactérias (Peng *et al.*, 2019; Guan *et al.*, 2025; Mesman *et al.*, 2022).

A atuação do vento sobre as massas d'água é heterogênea, tendo em vista sua grande variabilidade espaço-temporal. Portanto, inclinações na termoclina, o aprofundamento do epilímnio,

¹) Universidade de Brasília, Campus Darcy Ribeiro, alice_rp@hotmail.com

²) Universidade de Brasília, Campus Darcy Ribeiro.

geração de ondas e, até mesmo, a mistura podem acontecer de forma complexa e desigual ao longo do lago. Dessa forma, as séries temporais de vento constituem dados de entrada essenciais aos modelos numéricos utilizados na simulação hidrodinâmica e de qualidade da água (Van Haren, 2020; Cannon *et al.*, 2021; Sprules *et al.*, 2022; Xue *et al.*, 2024).

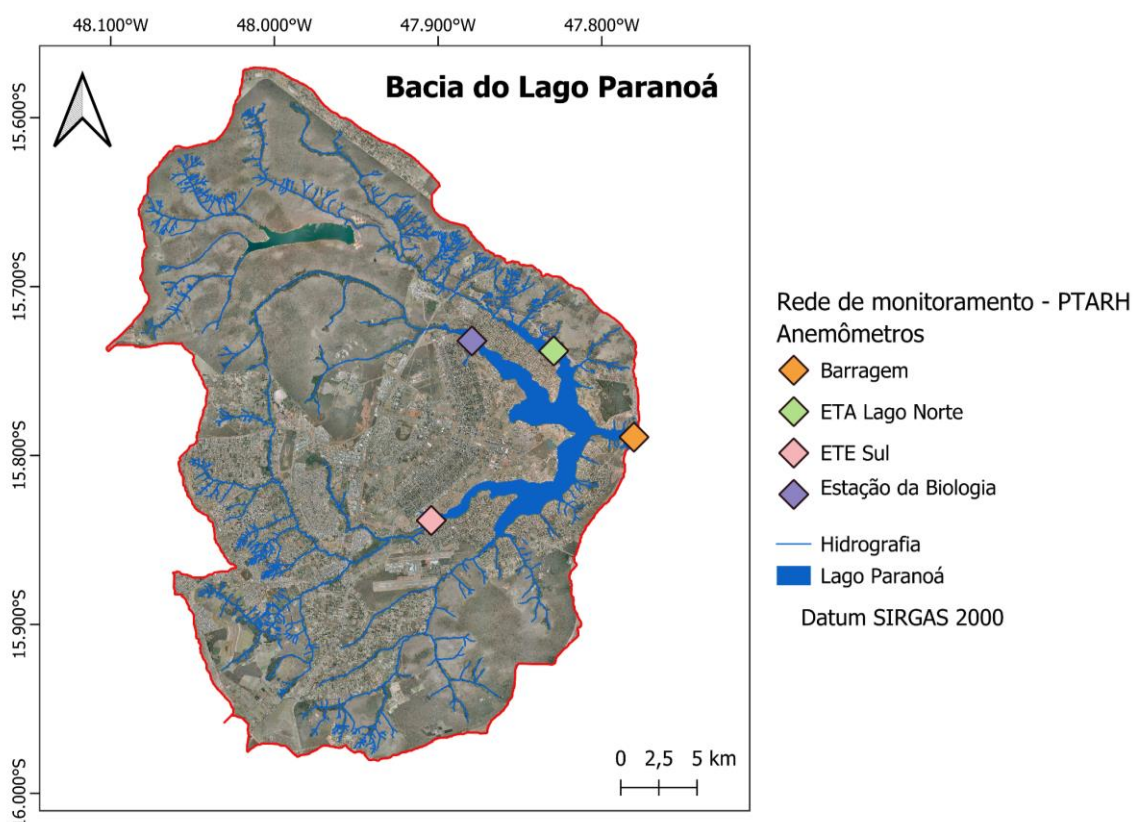
No caso do Lago Paranoá, reservatório localizado no Distrito Federal, devido aos seus múltiplos usos, complexidade morfológica e influência de forçantes meteorológicas, é de suma importância o monitoramento do vento e o entendimento das condições e dos padrões anemométricos locais, sobretudo em áreas estratégicas como a região da Barragem, para a compreensão e previsão de processos físicos e de qualidade da água.

Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo caracterizar o campo de vento (velocidade e direção) na estação da Barragem, localizada às margens do lago Paranoá, a partir de dados de monitoramento de alta frequência.

METODOLOGIA

O monitoramento de vento foi realizado na Estação anemométrica da Barragem localizada às margens do braço central (C) do lago Paranoá, em Brasília, Distrito Federal. Essa Estação pertence a rede de monitoramento anemométrico do Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos da Universidade de Brasília (PTARH-UnB) (Figura 1).

Figura 1 - Rede de monitoramento do PTARH-UnB e localização da Estação anemométrica da Barragem na bacia do lago Paranoá.



O monitoramento de 2018 a meados de 2020 foi realizado por Nunes (2022) e, posteriormente, pelos autores seguindo a mesma metodologia.

O anemômetro utilizado mede velocidades de até 67 m/s em todas as direções (360°) com resolução e precisão iguais a 22.5°. O *logger* do equipamento permite a configuração do intervalo de medição (nesse caso, 5 min), a captura e o armazenamento dos dados de velocidade média, rajada e direção média do vento (RainWise Inc., 2009).

Os dados de velocidade do vento na estação da Barragem são medidos a 2 m e, portanto, foram convertidos para velocidades a 10 m por meio da equação 1 (Tubelis e Nascimento, 1986), na qual U_1 é a velocidade do vento a 10 m, U_2 é a velocidade do vento medida, z_1 e z_2 são as alturas correspondentes das medições de velocidade.

$$\frac{U_1}{U_2} = \left(\frac{z_2}{z_1} \right)^{0.143} \quad (1)$$

A classificação das direções a partir dos valores medidos em graus foi feita considerando-se o posicionamento e a precisão dos anemômetros. Os intervalos adotados correspondentes às direções cardeais são:

- 0° a 11.25°: N
- 11.25° a 78.75°: NE
- 78.75° a 101.25°: L
- 101.25° a 168.75°: SE
- 168.75° a 191.25°: S
- 191.25° a 258.75°: SO
- 258.75° a 281.25°: O
- 281.25° a 348.75°: NO
- 348.75° a 360°: N

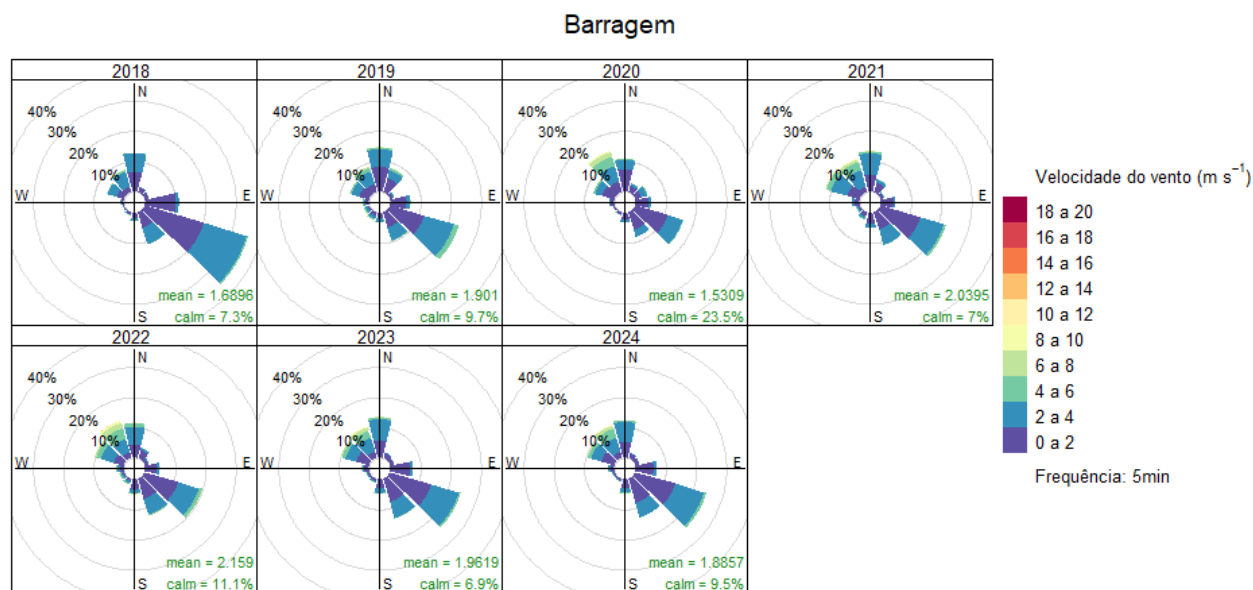
A caracterização do comportamento do vento no local foi feita mediante análise da distribuição de velocidade do vento para o período total, seco e úmido, além dos turnos (diurno e noturno). Já as direções do vento foram analisadas por meio da frequência relativa considerando também os mesmos períodos e turnos. O período de seca considerado engloba os meses de 4 a 9, enquanto o período de chuva compreende os meses 10 a 12 e de 1 a 3 do mesmo ano hidrológico (que se inicia em outubro e vai até setembro).

O *software* R e os pacotes *dplyr* (Wickham *et al.*, 2022), *lubridate* (Grolemund e Wickham, 2011), *ggplot2* (Wickham, 2016) e *openair* (Carslaw e Ropkins, 2012) foram utilizados para o tratamento de dados, confecção de gráficos e geração das rosas dos ventos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A série temporal dos dados de velocidade do vento (a 10 m) monitorados compreende o período de 2018 a 2024. A velocidade do vento na estação da Barragem apresenta padrão bem definido, com maiores velocidades nos meses úmidos, de janeiro, fevereiro, novembro e dezembro, condições mais amenas com de março a outubro, e predominância da direção SE (Figura 2). A maior frequência da direção SE que aparece na Figura 2 provavelmente se deve às falhas na série temporal no ano de 2018.

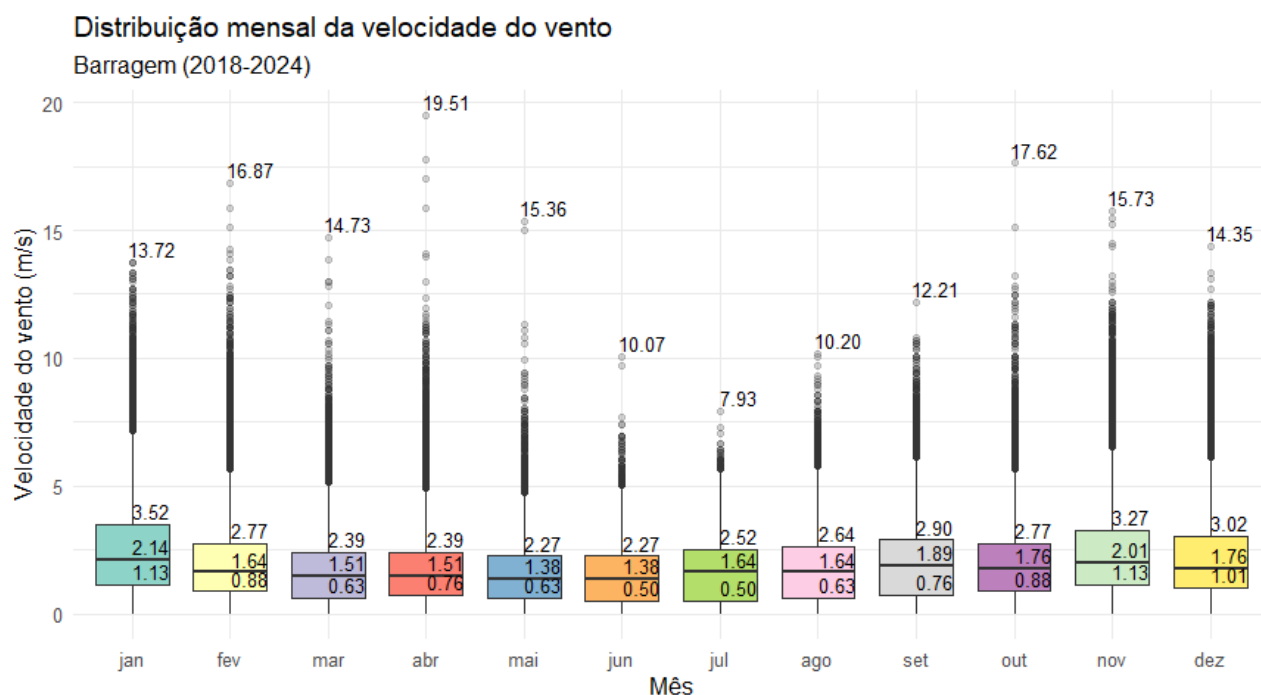
Figura 2 - Rosas dos ventos (10 m) anuais para a Estação da Barragem, às margens do lago Paranoá, de 2018 a 2024.



Frequência de contagens pela direção do vento (%)

A distribuição mensal da velocidade do vento na Estação da Barragem (2018-2024) é apresentada na Figura 3. A distribuição varia sazonalmente, contendo ventos mais fortes e variáveis no período úmido de outubro a fevereiro. Os maiores valores de velocidade (outliers máximos) ocorreram nos meses de abril, outubro e fevereiro, enquanto os meses de junho e julho apresentam menor intensidade e variabilidade da velocidade do vento.

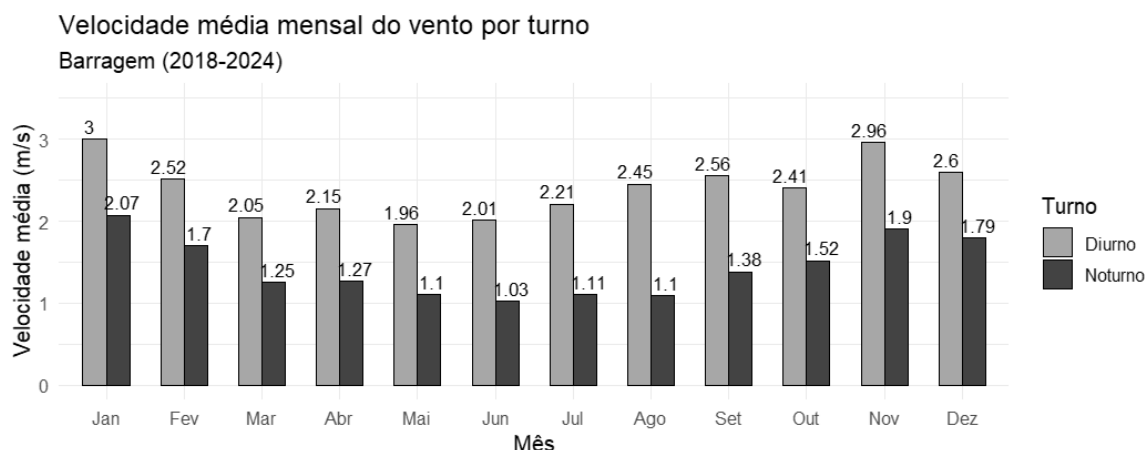
Figura 3 - Distribuição mensal da velocidade vento para a Estação da Barragem, às margens do lago Paranoá, de 2018 a 2024.



As velocidades médias do vento por turno (diurno e noturno) e por mês são apresentadas na Figura 4. As velocidades noturnas correspondem em média a 0.59 vezes o valor das velocidades

diurnas, ou seja, são 41% menores. As maiores velocidades médias em ambos os turnos ocorreram nos meses de novembro e janeiro. Já os meses de março a junho apresentaram as menores velocidades médias diurnas, enquanto as menores velocidades médias noturnas ocorreram nos meses de maio a agosto (Figura 4).

Figura 4 - Velocidade média mensal do vento para a Estação da Barragem, às margens do lago Paranoá, de 2018 a 2024.



No período diurno é evidente a predominância dos ventos na direção sudeste (SE) e noroeste (NO), sendo responsável por uma frequência média de aproximadamente 70% no ano. Os ventos na direção SE possuem máxima influência no mês de junho (com frequência relativa de 58.3%). Enquanto a frequência relativa na direção SE tende a aumentar e atingir seu máximo até o mês de junho, a frequência dos ventos na direção NO tendem diminuir quando se aproxima de junho e a aumentar no período de outubro a março (Figura 5).

No período noturno há uma redução média de 14% da predominância dos ventos na direção SE e de 2% ventos na direção NO. Observa-se um aumento médio de 11% dos ventos na direção norte e de 5% na direção leste, sendo os aumentos mais expressivos nos meses de maio a agosto (Figura 5).

Observa-se também um padrão de aumento da frequência da direção leste (L) ao longo do ano: de Janeiro até o mês de Junho a frequência relativa dos ventos na direção Leste aumentam atingindo 20% e depois volta a reduzir para ordem de 5% ao final do ano, assim como para a direção Norte (N) e, contrariamente ao comportamento da frequência dos ventos na direção Noroeste (NO) (Figura 5).

Além de avaliar o comportamento da velocidade e direção do vento quanto aos meses e turnos, também foram avaliados os padrões relativos aos períodos seco e úmido. A Figura 6 apresenta distribuição da velocidade do vento por período (seco/úmido) e por turno (diurno/noturno) para a Estação da Barragem.

O maior valor de velocidade do vento (19.51 m/s) ocorreu no período seco diurno (no dia 13/04/2022 13:25, com direção NO), no entanto, é possível observar que o período úmido diurno apresenta uma distribuição mais dispersa para os valores de velocidade do vento mais altos, que se encontram entre a mediana (2.14 m/s) e o 3º quartil (3.27 m/s), além de apresentar outliers mais frequentes do que o período seco diurno (Figura 6).

Quanto aos turnos, é evidente que o período diurno apresenta maior intensidade e variabilidade do que noturno. No período de seca as velocidades e variabilidade do vento são mais amenas do que no período úmido.

Figura 5 - Frequência relativa da direção do vento por mês e turno para a Estação da Barragem, às margens do lago Paranoá, de 2018 a 2024.

Frequência relativa da direção do vento por mês e turno
Barragem (2018-2024)

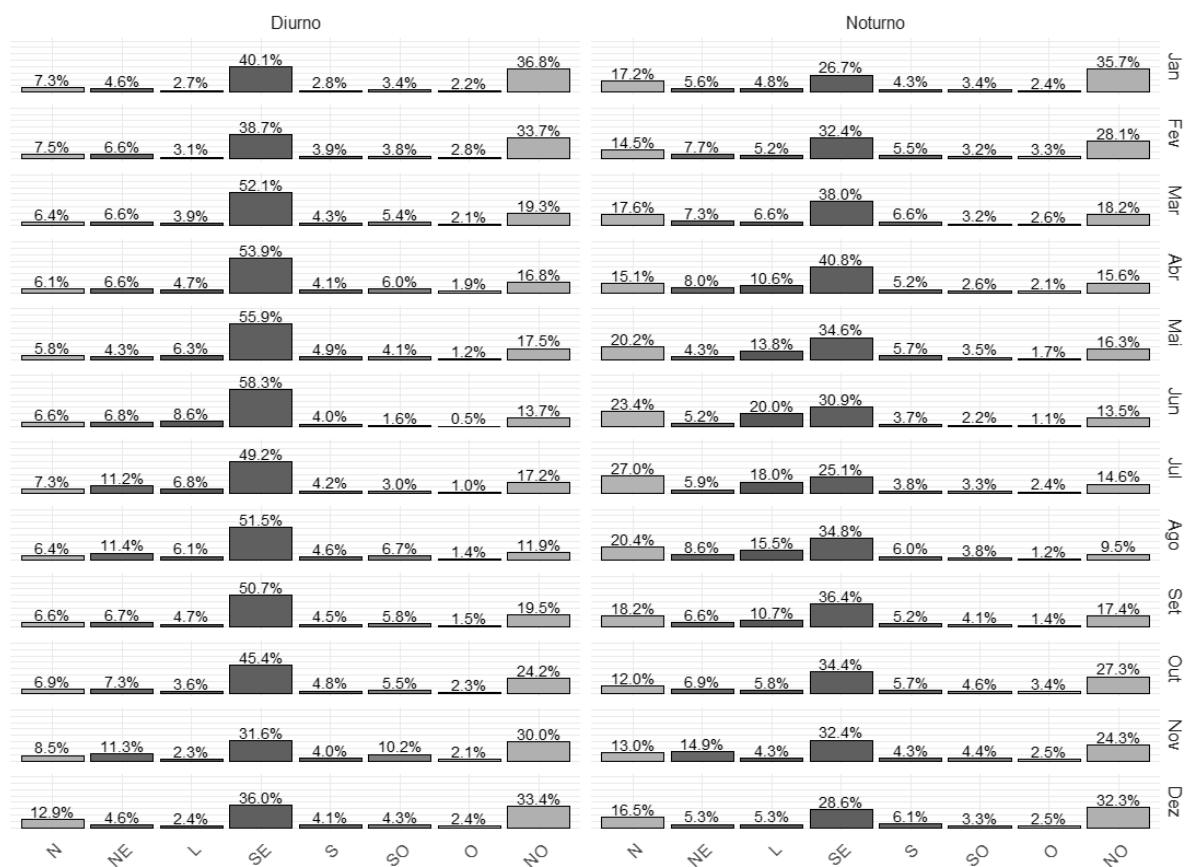
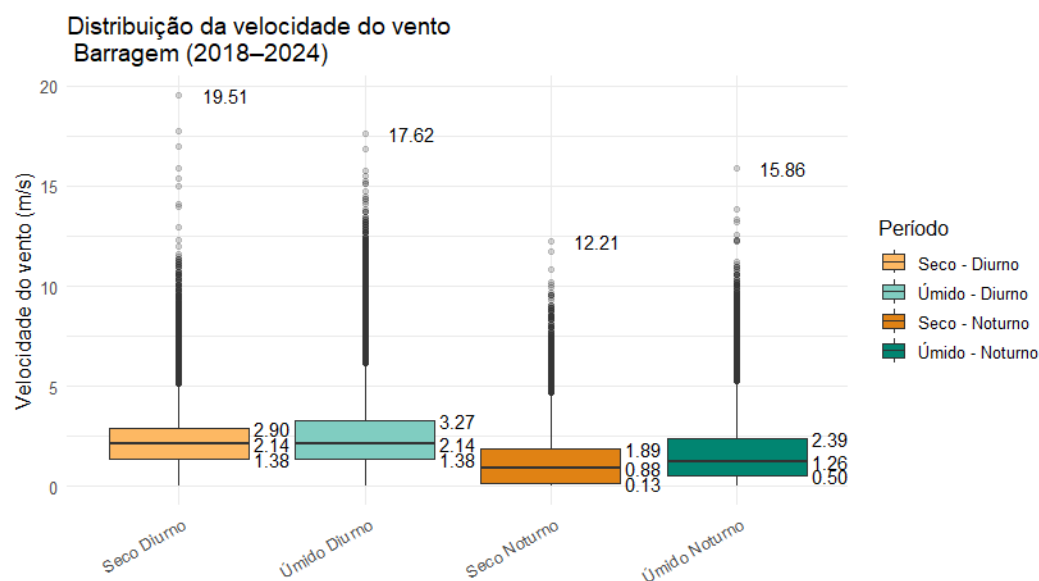


Figura 6 - Distribuição da velocidade do vento a 10 m quanto ao turno (diurno/noturno) e período (seco/úmido) para a Estação da Barragem (2018-2024), lago Paranoá.



As velocidades médias por estação e turno em cada ano hidrológico são mostradas na Figura 7. O ano hidrológico de 2017 corresponde aos dados de outubro/2017 a setembro/2018, sendo o período úmido de outubro/2017 a março/2018 e o período seco de abril/2018 a setembro/2018 e assim por diante. As velocidades do período úmido diurno são maiores que as do período seco diurno.

O ano hidrológico de 2021 apresentou a maior velocidade média global, no período úmido diurno e igual a 2.87 m/s. A menor velocidade média global se deu no período seco noturno e no ano hidrológico de 2019 com valor de 0.55 m/s.

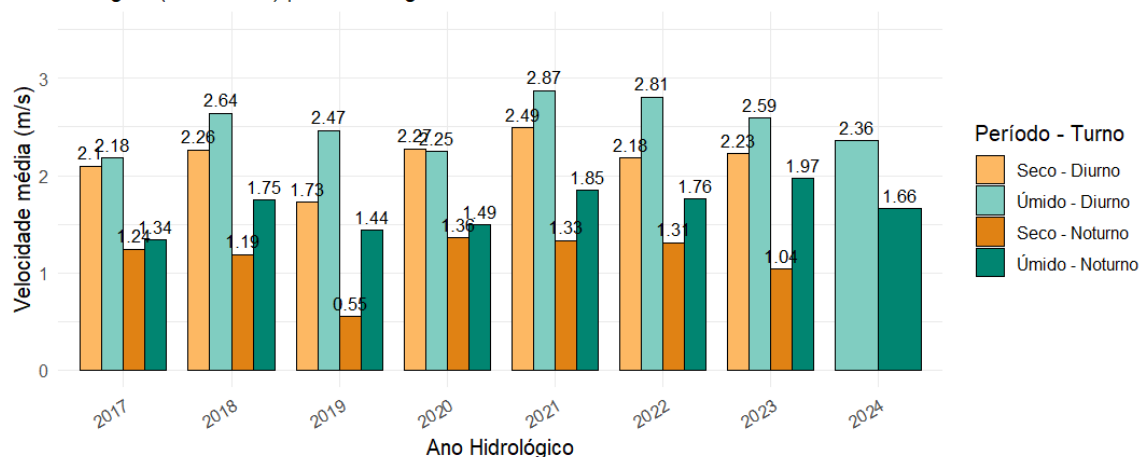
De modo geral, as velocidades médias no período úmido diurno são maiores que as velocidades do período seco diurno. As maiores diferenças entre as velocidades médias dos períodos úmido e seco diurno se deram nos anos hidrológicos de 2019 e 2022, sendo igual a 0.74 m/s e 0.63 m/s, respectivamente, enquanto, no turno da noite, as maiores diferenças se deram para os anos 2019 (0.89 m/s) e 2023 (0.93 m/s).

As velocidades médias do período seco diurno são, em média, 2 vezes maiores que as velocidades médias para o turno da noite, enquanto, no período úmido esse valor é de aproximadamente 1.6 vezes. Comparando os períodos, a época de chuva apresenta velocidades médias diurnas em torno de 1.2 vezes maiores que o período seco diurno, já as velocidades médias para o período úmido noturno são, em média, 1.6 vezes a velocidade do período seco noturno.

Figura 7 - Velocidade média do vento por ano hidrológico, período sazonal e turno para a Estação da Barragem.

Velocidade média do vento por ano hidrológico, estação e turno

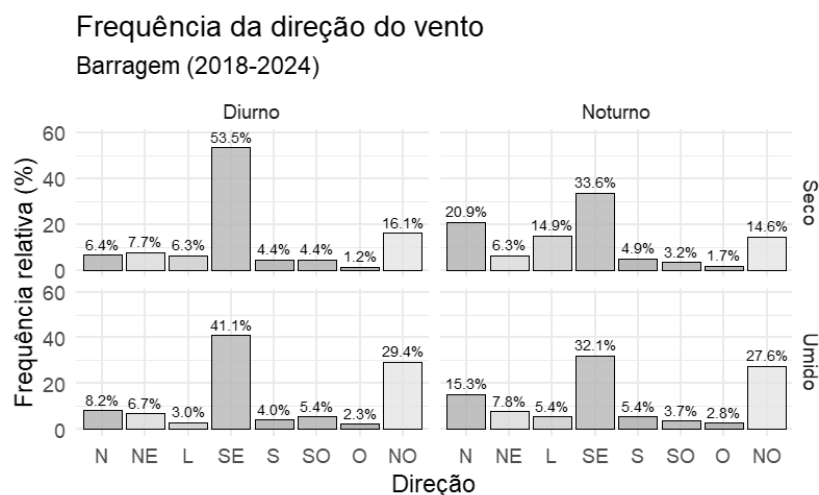
Barragem (2018–2024) | Ano hidrológico: Outubro a Setembro



As direções do vento predominantes na Estação Barragem são, respectivamente, SE e NO, principalmente ao longo do dia na estação seca (53.5% e 16.1%). Já no período noturno, há uma redução dos ventos a SE e NO, enquanto os ventos no sentido N e L aparecem com aproximadamente 2 a 3 vezes a frequência do período diurno (Figura 8).

No período seco observa-se o aumento da predominância dos ventos na direção SE, tanto ao longo do dia quanto da noite (Figura 8), e menor frequência dos ventos na direção NO, quando comparado com o período úmido.

Figura 8 - Frequência da direção do vento quanto ao turno e aos períodos: seco e úmido para a Estação da Barragem, lago Paranoá.



Comparando-se os padrões gerais encontrados nos resultados desse estudo, realizado às margens do lago Paranoá para o período de 2018 a 2024, com o estudo de Maggiotto *et al.* (2013), realizado na Fazenda Água Limpa (FAL) da Universidade de Brasília para o período de 2010 a 2013, observa-se comportamentos distintos para o campo de vento.

As direções predominantes diurnas na FAL período foram NE e E, e durante a noite, S e SE, enquanto na Estação da Barragem, no lago Paranoá, as direções predominantes durante o dia foram SE e NO, e durante a noite, SE, NO e N. Os maiores valores de velocidade máxima observados por Maggiotto *et al.* (2013) ocorreram nas direções O ou NE e a máxima velocidade observada foi de 14.49 m/s no mês de outubro, enquanto no presente estudo os maiores valores de velocidade máxima observados se deram nas direções NO e SE, iguais a 19.51 m/s (NO) em abril/2022, 17.75 m/s (SE) em abril/2022 e 17.62 m/s (NO) em outubro/2022.

A velocidade noturna observada por Maggiotto *et al.* (2013) é 48% menor que durante o dia, tendo maior diferença em setembro. Nesse estudo, as velocidades noturnas são em média 41% menores que as velocidades diurnas, com maior diferença nos meses de dezembro, janeiro e fevereiro.

Na FAL, as maiores velocidades médias coincidiram com o final do período mais seco (agosto e setembro). Para a Estação da Barragem os maiores valores de velocidade média se encontram nos meses de novembro e janeiro.

CONCLUSÕES

A partir do monitoramento de alta frequência de velocidade e direção do vento na Estação da Barragem do Lago Paranoá, Brasília – DF, foi possível caracterizar o campo de vento. A distribuição de velocidade do vento varia sazonalmente, apresentando ventos mais fortes e variáveis no período úmido de outubro a fevereiro, enquanto os meses seca, em especial junho e julho, apresentam menor intensidade e variabilidade da velocidade do vento.

Quanto ao comportamento do vento nos diferentes turnos, as maiores velocidades médias, em ambos os turnos (diurno e noturno), ocorreram nos meses de janeiro (diurno: 3.0 m/s e noturno: 2.07 m/s) e novembro (diurno: 2.96 m/s e noturno: 1.9 m/s). As velocidades médias noturnas são, em média, 41% menores que as velocidades médias diurnas. Além disso, o período diurno é caracterizado por maior intensidade e variabilidade do que o noturno.

Nos dois turnos observa-se também a maior predominância das direções SE e NO ao longo do dia totalizando uma frequência média de aproximadamente 70%, enquanto durante a noite a predominância dessas duas direções é reduzida em aproximadamente 16%, que se distribui basicamente entre as direções N e L.

Já no que diz respeito aos períodos de seca e chuva, as velocidades e variabilidade do vento são maiores no período úmido. Tanto no período de seca quanto no período chuvoso, no período diurno, as direções predominantes são SE e NO. No período de seca há maior predominância dos ventos a SE (diurno: 53.5% e noturno: 33.6%), principalmente no período diurno, quando comparado ao período úmido (diurno: 41.1% e noturno: 32.1%), enquanto durante a noite, além das direções SE e NO, também aparece uma maior frequência das direções N e L chegando a totalizar aproximadamente 36% no período seco.

Comparando-se os resultados obtidos a partir das medições na Estação anemométrica localizada nas proximidades da Barragem do Lago Paranoá com os resultados obtidos por Maggiotto *et al.* (2013), a partir do monitoramento realizado na Fazenda Água Limpa (FAL) da Universidade de Brasília para o período de 2010 a 2013, observa-se diferentes comportamentos de velocidade e direção vento indicando a variação do campo de vento na bacia hidrográfica.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq pela bolsa concedida, a FAP-DF, ANA e CAPES pelo financiamento do projeto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. CANNON, D.J.; TROY, C.; BOOTSMA, H.; LIAO, Q.; MACLELLAN-HURD, R.-A. (2021). Characterizing the seasonal variability of hypolimnetic mixing in a large, deep lake. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 126, e2021JC017533. DOI: 10.1029/2021JC017533
2. CARSLAW, D.C.; ROPKINS, K. (2012). *openair* – An R package for air quality data analysis. *Environmental Modelling & Software*, 27-28, p. 52-61.
3. GROLEMUND, G.; WICKHAM, H. (2011). Dates and Times Made Easy with lubridate. *Journal of Statistical Software*, 40(3), p. 1–25.
4. GUAN, M.; ZHANG, Y.; LI, W. *et al.* Quantifying the effects of wind wave on cyanobacterial blooms in large shallow lake from 10 years high frequency satellite observation. *Hydrobiologia* **852**, 891–908 (2025). DOI: 10.1007/s10750-024-05735-8
5. JALIL, A.K.; ZHANG, L.; QI, Y.; LI, M. Aleem. 2020. Phytoplankton response to long-term wind dynamics at large shallow Lake Taihu (shallow lake phytoplankton response to long-term wind dynamics). *Int. J. Environ. Sci. Technol.* **18**:341–352. DOI: 10.1007/s13762-020-02827-5
6. LE, H. N.; SHINTANI, T.; NAKAYAMA, K. (2023). A Detailed Analysis on Hydrodynamic Response of a Highly Stratified Lake to Spatio-Temporally Varying Wind Field. *Water*, 15(3), 565. DOI: 10.3390/w15030565
7. MAGGIOTTO, S.R.; FERREIRA, F.M.S.; MAXIMIANO, C.V. (2013). Um estudo da velocidade e direção predominante do vento em Brasília, DF. XVIII Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, Belém – PA, Brasil.
8. MESMAN, J.P.; AYALA, A.I.; GOYETTE, S. *et al.* (2022), Drivers of phytoplankton responses to summer wind events in a stratified lake: A modeling study. *Limnol Oceanogr*, 67: 856-873. DOI: 10.1002/lno.12040
9. NUNES, G. (2022). *Estudo das variáveis intervenientes no balanço quali-quantitativo de um sistema bacia-lago: O caso do lago Paranoá - DF*. Tese de Doutorado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Publicação PPGTARH. TD-027/2022, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 230p.

10. PENG, K.; CAI, Y.; QIN, B.; GONG, Z. (2019). The effect of wind speed decline on macroinvertebrates in Lake Taihu, China. *Science of The Total Environment*, 662, 481-489, ISSN 0048-9697. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.01.267.
11. SPRULES, W.G.; CYR, H.; MENZA, C.W. (2022). Multiscale effects of wind-induced hydrodynamics on lake plankton distribution. *Limnol Oceanogr*, 67: 1631-1646. DOI: 10.1002/lno.12158
12. VAN HAREN, H.; PICCOLROAZ, S.; AMADORI, M.; TOFFOLON, M.; DIJKSTRA, H. A. (2020). Moored observations of turbulent mixing events in deep Lake Garda, Italy. *Journal of Limnology*, 80(1). DOI: 10.4081/jlimnol.2020.1983
13. VENABLES, W.N.; RIPLEY, B.D. (2002). *Modern Applied Statistics with S*, Fourth edition. Springer, New York. ISBN 0-387-95457-0, <https://www.stats.ox.ac.uk/pub/MASS4/>.
14. WICKHAM, H. (2016). *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*. Springer-Verlag New York. ISBN 978-3-319-24277-4, <https://ggplot2.tidyverse.org>.
15. WICKHAM, H.; FRANÇOIS, R.; HENRY, L.; MÜLLER, K. (2022). *dplyr: A Grammar of Data Manipulation*. Disponível em: <https://dplyr.tidyverse.org>.
16. XUE, Z.; ZHU, W.; CHENG, L.; LV, Y.; FENG, G. (2024). Wind-driven hydrodynamic characteristics of Lake Taihu, a large shallow lake in China. *Environ Sci Pollut Res Int.*;31(17), 26123-26140. DOI: 10.1007/s11356-024-32930-w.