



Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Oceanografia

Gabriella Zaranza Teixeira

**Monitoramento de alta frequência no reservatório de Ribeirão das Lajes:
Análise da estabilidade térmica e química da coluna d'água entre os anos de
2018 a 2020**

Rio de Janeiro

2022

Gabriella Zaranza Teixeira

Monitoramento de alta frequência no reservatório de Ribeirão das Lajes: Análise da estabilidade térmica e química da coluna d'água entre os anos de 2018 a 2020

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Oceanografia, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

Orientadora: Prof.^a Dra. Cássia de Oliveira Farias

Coorientador: Prof. Dr. Friedrich Wilhelm Herms

Rio de Janeiro

2022

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/C

T266 Teixeira, Gabriella Zaranza.
Monitoramento de alta frequência no reservatório de Ribeirão das Lajes: análise da estabilidade térmica e química da coluna d'água entre os anos de 2018 a 2020. / Gabriela Zaranza Teixeira. – 2022.
147 f. : il.

Orientadora: Cássia de Oliveira Farias.
Coorientador: Friedrich Wilhelm Herms
Dissertação (Mestrado) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Oceanografia.

1. Biologia Marinha – Rio de Janeiro (RJ) – Teses. 2. Limnologia – Reservatórios – Teses. 3. Oceanografia física – Matéria Orgânica Dissolvida Fluorescente – Teses. 4. Água – Poluição – Teses. 5. Ribeirão das Lajes, Reservatório (RJ) – Teses. I. Farias, Cássia de Oliveira. II. Herms, Friedrich Wilhelm. III. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. IV. Faculdade de Oceanografia. V. Título.

CDU 574.5(815.3)

Bibliotecária responsável: Fernanda Lobo / CRB-7:5265

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta dissertação, desde que citada a fonte.

Assinatura

Data

Gabriella Zaranza Teixeira

Monitoramento de alta frequência no reservatório de Ribeirão das Lajes: Análise da estabilidade térmica e química da coluna d'água entre os anos de 2018 a 2020

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Oceanografia, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

Aprovada em 29 de abril de 2022.

Orientadora: Prof. Dra. Cássia de Oliveira Farias

Faculdade de Oceanografia — UERJ

Banca Examinadora: _____

Prof. Dr. Friedrich Wilhelm Herms (Coorientador)

Faculdade de Oceanografia - UERJ

Prof. Dra. Claudia Hamacher

Faculdade de Oceanografia - UERJ

Prof. Dr. Ramiro Neves

Universidade de Lisboa

Prof. Dr. Alexandre Macedo Fernandes

Faculdade de Oceanografia - UERJ

Prof. Dr. Guilherme Franz

Universidade Federal do Paraná

Rio de Janeiro

2022

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho ao meu falecido avô João, o qual sempre demonstrou seu grande amor à família nos proporcionando momentos maravilhosos e de muitas risadas.

AGRADECIMENTOS

Agradeço principalmente aos meus pais, Ana Virgínia e Marcelo, por todo o amor e carinho dedicados a mim e por sempre me apoiarem nos estudos. Sem o incentivo deles e o privilégio dado a mim através da batalha deles em poder me dedicar somente aos estudos, eu não teria chegado onde cheguei.

À minha orientadora Dr^a. Cássia de Oliveira Farias e ao meu co-orientador Dr. Friedrich Wilhelm Herms, por todo o apoio, incentivo, ajuda e por sempre estarem dispostos a responderem minhas milhares de dúvidas. Além, é claro, de todo o conhecimento me transferido durante essa dissertação.

Ao professor Alexandre Macedo Fernandes por toda a ajuda referente a parte física necessária e por todo o conhecimento me passado.

Às minhas amigas de vida, Elise Natário, Juliana Biancardi e Monike Lourinho que, além de estarem ao meu lado por toda a minha jornada de vida, sempre vibraram com as minhas conquistas.

Aos meus grandes amigos que fiz durante minha trajetória na graduação de oceanografia na UERJ e que seguem comigo até hoje, Guilherme Marques, João Victor Bittar, Júlia Arouca, Marcela Valença e Victor Cardozo.

Aos docentes da Faculdade de Oceanografia da UERJ por todo o aprendizado desde a graduação.

À Light Energia S.A. pelo financiamento do projeto e disponibilização dos dados.

Por fim, a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro - FAPERJ pela concessão de bolsa de mestrado, a qual, sem ela, eu não conseguiria me dedicar somente à pesquisa.

RESUMO

ZARANZA, Gabriella Teixeira. **Monitoramento de alta frequência no reservatório de Ribeirão das Lajes**: análise da estabilidade térmica e química da coluna d'água entre os anos de 2018 a 2020. 2022. 147 f. Dissertação (Mestrado em Oceanografia) – Faculdade de Oceanografia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2022.

Medições de temperatura, oxigênio dissolvido, pH e fDOM através de perfilagens contínuas de alta frequência da coluna d'água foram realizadas com o objetivo de estudar as variações das condições limnológicas da coluna d'água do reservatório de Ribeirão das Lajes localizado no Rio de Janeiro para caracterizar as condições físicas e químicas nos diferentes cenários de estabilidade da coluna d'água durante o período de outubro de 2018 a fevereiro de 2020. Também foi avaliada a influência das frentes frias sobre o padrão de estratificação de curtas durações do reservatório. As relações de associação entre as variáveis físicas e químicas da água em Lajes foram verificadas por meio de aplicação de testes como Shapiro-Wilk, Mann-Whitney, Kuskal-Wallis e Correlação de Spearman. A estabilidade térmica foi avaliada utilizando os indicadores: temperatura, RWCS, RTR e Estabilidade de Schmidt. O oxigênio dissolvido, pH e fDOM foram utilizados para o estudo das características químicas das águas do reservatório. Os resultados obtidos utilizando-se os parâmetros físicos evidenciaram que o reservatório de Lajes possui períodos de forte estabilidade e instabilidade da coluna d'água, variando ao longo do tempo, mostrando uma sazonalidade acoplada ao regime climatológico, estratificação térmica da coluna d'água bastante pronunciada nos meses de verão com duração de 3 meses (dezembro a março) em 2018/2019 e de 2 meses (janeiro e fevereiro) de 2019/2020. O RWCS, RTR e a Estabilidade de Schmidt apresentaram os mesmos resultados, com maiores estabilidades durante o verão e períodos de instabilidade nos meses de inverno. As condições climáticas da região são os principais fatores responsáveis pelo padrão de estratificação da coluna d'água da área do reservatório e as entradas de frentes frias foram importantes para mudanças em curtos períodos na estabilidade da coluna d'água do reservatório. Foram constatadas passagens de frentes frias, as quais influenciaram o enfraquecimento das fortes estratificações térmicas existentes durante o verão, o que fez com que a coluna d'água se encontrasse instável durante poucos dias e em um maior período durante o inverno. Esses períodos de instabilidade foram associados como resultados das baixas temperaturas existentes durante as passagens dessas frentes. A concentração da fDOM apresentou correlação negativa com o oxigênio dissolvido e com o pH demonstrando grande poder de decomposição nos primeiros metros da coluna d'água. Assim, foi possível concluir que o reservatório de Ribeirão das Lajes se mantém estratificado durante todo o ano com períodos de forte estabilidade térmica que são interrompidos pelas entradas de frentes frias que enfraquecem as camadas existentes na coluna d'água, mas não ao ponto de ocorrer uma mistura d'água completa desta coluna. A estratificação da coluna d'água também foi verificada pelos parâmetros oxigênio e o pH, os quais se encontram estratificados mesmo durante os períodos de desestratificação térmica, diferentemente do fDOM que se encontra estratificado inversamente ao oxigênio e ao pH.

Palavras-chave: Estratificação Térmica. Estratificação Química. Reservatórios. Matéria Orgânica Dissolvida Fluorescente. Frentes Frias.

ABSTRACT

ZARANZA, Gabriella Teixeira. **High frequency monitoring in the Ribeirão das Lajes reservoir**: analysis of the thermal and chemical stability of the water column between the years 2018 to 2020. 2022. 147 f. Dissertação (Mestrado em Oceanografia) – Faculdade de Oceanografia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2022.

Measurements of temperature, dissolved oxygen, pH and fDOM through continuous high frequency logging of the water column were carried out with the objective of studying the variations in the limnological conditions of the water column of the Ribeirão das Lajes reservoir located in Rio de Janeiro. to characterize the physical and chemical conditions in the different stability scenarios of the water column during the period from October 2018 to February 2020. The influence of cold fronts on the short-term stratification pattern of the reservoir was also evaluated. The association relationships between the physical and chemical variables of the water in Lajes were verified by applying tests such as Shapiro-Wilk, Mann-Whitney, Kuskal-Wallis and Spearman Correlation. Thermal stability was evaluated using the indicators: temperature, RWCS, RTR and Schmidt stability. Dissolved oxygen, pH and fDOM were used to study the chemical characteristics of the reservoir waters. The results obtained using the physical parameters showed that the Lajes reservoir has periods of strong stability and instability of the water column, varying over time, showing a seasonality coupled with the climatological regime, thermal stratification of the water column quite pronounced in the summer months lasting 3 months (December to March) in 2018/2019 and 2 months (January and February) of 2019/2020. The RWCS, RTR and Schmidt Stability showed the same results, with greater stability during the summer and periods of instability in the winter months. The climatic conditions of the region are the main factors responsible for the stratification pattern of the water column of the reservoir area and the entrances of cold fronts were important for changes in short periods in the stability of the water column of the reservoir. Passages of cold fronts were observed, which influenced the weakening of the strong thermal stratifications existing during the summer, which made the water column unstable for a few days and for a longer period during the winter. These periods of instability were associated as a result of the low temperatures existing during the passage of these fronts. The concentration of fDOM showed a negative correlation with dissolved oxygen and with pH, demonstrating great power of decomposition in the first meters of the water column. Thus, it was possible to conclude that the Ribeirão das Lajes reservoir remains stratified throughout the year with periods of strong thermal stability that are interrupted by the entrance of cold fronts that weaken the existing layers in the water column, but not to the point of occurrence. a complete water mixture from this column. The stratification of the water column was also verified by the oxygen and pH parameters, which are stratified even during periods of thermal destratification, unlike fDOM, which is stratified inversely with oxygen and pH.

Keywords: Thermal Stratification. Chemical Stratification. reservoirs. Fluorescent Dissolved Organic Matter. Cold Fronts.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Zonas longitudinais de um reservatório	22
Figura 2 –	Estratificação vertical de um reservatório	23
Figura 3 –	Mapa e localização geográfica do reservatório de Ribeirão das Lajes ..	46
Figura 4 –	Barragem do reservatório de Ribeirão das Lajes	46
Figura 5 –	Imagem de satélite da bacia hidrográfica do Reservatório de Ribeirão das Lajes	47
Figura 6 –	Localização do perfilador no reservatório de Ribeirão das Lajes	48
Figura 7 –	Imagem do perfilador próximo à barragem, sua área de coleta no reservatório de Ribeirão das Lajes	49
Figura 8 –	Diagrama Esquemático do Sistema de Perfilagem Automático	50
Figura 9 –	Sensores da série WXT-530	54
Figura 10 –	Esquema de aquisição de dados	56
Figura 11 –	Etapas de compilação automática dos dados coletados pelo sistema automático de perfilagem	57
Figura 12 –	Climograma de Ribeirão das Lajes – RJ no período de novembro de 2018 a fevereiro de 2020	62
Figura 13 –	Variação da temperatura do ar (°C) versus velocidade do vento ($m.s^{-1}$) no reservatório de Ribeirão das Lajes no período de novembro de 2018 a fevereiro de 2020	63
Figura 14 –	Variação da temperatura média mensal da água (°C) em toda a extensão da coluna d'água versus a diferença de temperatura da água (°C) entre a superfície (1 m) e o fundo (37 m) no reservatório de Ribeirão das Lajes durante o período de outubro de 2018 a fevereiro de 2020	64
Figura 15 –	Variação da temperatura média mensal da água (°C) em relação às diferentes profundidades na coluna d'água do reservatório de Ribeirão das Lajes durante o período de outubro de 2018 a fevereiro de 2020 ...	66
Figura 16 –	Variação da temperatura da água (°C) em relação às diferentes camadas da coluna d'água do reservatório de Ribeirão das Lajes durante o período de outubro de 2018 a fevereiro de 2020	67

Figura 17 –	Variação das temperaturas médias mensais (°C) da água em 1, 5 e 31 metros de profundidade versus a temperatura mensal média do ar (°C) e a velocidade mensal média do vento (m. s ⁻¹) no reservatório de Ribeirão das Lajes durante o período de novembro de 2018 a fevereiro de 2020	69
Figura 18 –	Regressão linear da temperatura média da água (°C) nas camadas de 1, 5 e 37 metros versus a temperatura média do ar (°C)	70
Figura 19 –	Variação da Estabilidade Relativa da Coluna D'água (RWCS) em relação às diferentes camadas existentes na coluna d'água do reservatório de Ribeirão das Lajes no período de outubro de 2018 a fevereiro de 2020	72
Figura 20 –	Variação mensal da Resistência Térmica Relativa – RTR das diferentes camadas de água do reservatório de Ribeirão das Lajes no período de outubro de 2018 a fevereiro de 2020	75
Figura 21 –	Variação mensal da densidade (kg.m ⁻³) versus a profundidade (m) no reservatório de Ribeirão das Lajes durante o período de outubro de 2018 a fevereiro de 2020	77
Figura 22 –	Variação mensal da curva de Estabilidade no período de outubro de 2018 a fevereiro de 2020 no reservatório de Ribeirão das Lajes	80
Figura 23 –	Variação mensal da estabilidade de Schmidt (Ws) (kg.m ² .s ⁻²) no reservatório de Ribeirão das Lajes no período de outubro de 2018 a fevereiro de 2020	81
Figura 24 –	Variação mensal do oxigênio dissolvido no reservatório de Ribeirão das Lajes durante o período de outubro de 2018 a fevereiro de 2020 ...	83
Figura 25 –	Variação mensal da saturação do oxigênio (%) em relação à profundidade no reservatório de Ribeirão das Lajes durante o período de outubro de 2018 a fevereiro de 2020	85
Figura 26 –	Variação mensal da saturação do oxigênio (%) nas diferentes camadas da coluna d'água do reservatório de Ribeirão das Lajes durante o período de outubro de 2018 a fevereiro de 2020	86
Figura 27 –	Variação das médias mensais de pH em em relação à profundidade no reservatório de Ribeirão das Lajes durante o período de outubro de 2018 a fevereiro de 2020	88

Figura 28 –	Variação média mensal do pH nas diferentes camadas da coluna d'água do reservatório de Ribeirão das Lajes durante o período de outubro de 2018 a fevereiro de 2020	90
Figura 29 –	Variação média mensal da matéria orgânica colorida fluorescente (fDOM) no período de março de 2019 a fevereiro de 2020 em toda a coluna d'água do reservatório de Ribeirão das Lajes	92
Figura 30 –	Variação média mensal da matéria orgânica dissolvida colorida fluorescente (fDOM) em relação à profundidade no período de março de 2019 a fevereiro de 2020 no reservatório de Ribeirão das Lajes	94
Figura 31 –	Correlação de Spearman	95
Figura 32 –	Matéria orgânica dissolvida colorida fluorescente (fDOM)	96
Figura 33 –	Variação da estabilidade térmica relativa (RWCS) da coluna d'água do reservatório de Ribeirão das Lajes no período de 01 a 30 de novembro de 2018	99
Figura 34 –	Variação diária da precipitação (mm) e da velocidade média do vento ($m.s^{-1}$) no reservatório de Ribeirão das Lajes no período de 01 a 30 de novembro de 2018	99
Figura 35 –	Variação da temperatura da água ($^{\circ}C$) em determinadas profundidades do reservatório de Ribeirão das Lajes e temperatura atmosférica no período de 01 a 30 de novembro de 2018	101
Figura 36 –	Variação da estabilidade térmica relativa (RWCS) da coluna d'água do reservatório de Ribeirão das Lajes no período de 22 a 29 de novembro de 2018	102
Figura 37 –	Variação da estabilidade térmica relativa (RWCS) da coluna d'água do reservatório de Ribeirão das Lajes no período de 01 a 28 de Fevereiro de 2019	104
Figura 38 –	Variação diária da precipitação (mm) e da velocidade média do vento ($m.s^{-1}$) no reservatório de Ribeirão das Lajes no período de 01 a 28 de fevereiro de 2019	104
Figura 39 –	Variação da temperatura da água ($^{\circ}C$) em determinadas profundidades do reservatório de Ribeirão das Lajes e temperatura atmosférica no período de 01 a 28 de fevereiro de 2019	105
Figura 40 –	Variação da estabilidade térmica relativa (RWCS) da coluna d'água	

	do reservatório de Ribeirão das Lajes no período de 01 a 07 de fevereiro de 2019	106
Figura 41 –	Variação da estabilidade térmica relativa (RWCS) da coluna d’água do reservatório de Ribeirão das Lajes no período de 12 a 20 de fevereiro de 2019	107
Figura 42 –	Variação da estabilidade térmica relativa (RWCS) da coluna d’água do reservatório de Ribeirão das Lajes no período de 01 a 30 de abril de 2019	109
Figura 43 –	Variação diária da precipitação (mm) e da velocidade média do vento ($m.s^{-1}$) no reservatório de Ribeirão das Lajes no período de 01 a 30 de abril de 2019	109
Figura 44 –	Variação da temperatura da água ($^{\circ}C$) em determinadas profundidades do reservatório de Ribeirão das Lajes e temperatura atmosférica no período de 01 a 30 de abril de 2019	111
Figura 45 –	Variação da estabilidade térmica relativa (RWCS) da coluna d’água do reservatório de Ribeirão das Lajes no período de 01 a 31 de Julho de 2019	112
Figura 46 –	Variação diária da precipitação (mm) e da velocidade média do vento ($m.s^{-1}$) no reservatório de Ribeirão das Lajes no período de 01 a 31 de julho de 2019	113
Figura 47 –	Variação da temperatura da água ($^{\circ}C$) em determinadas profundidades do reservatório de Ribeirão das Lajes e temperatura atmosférica no período de 01 a 31 de julho de 2019	114
Figura 48 –	Variação da estabilidade térmica relativa (RWCS) da coluna d’água do reservatório de Ribeirão das Lajes no período de 01 a 30 de setembro de 2018	116
Figura 49 –	Variação diária da precipitação (mm) e da velocidade média do vento ($m.s^{-1}$) no reservatório de Ribeirão das Lajes no período de 01 a 30 de setembro de 2019	116
Figura 50 –	Variação da temperatura da água ($^{\circ}C$) em determinadas profundidades do reservatório de Ribeirão das Lajes e temperatura atmosférica no período de 01 a 30 de setembro de 2019	118
Figura 51 –	Variação da estabilidade térmica relativa (RWCS) da coluna d’água	

	do reservatório de Ribeirão das Lajes no período de 01 a 31 de Janeiro de 2020	120
Figura 52 –	Variação diária da precipitação (mm) e da velocidade média do vento ($m.s^{-1}$) no reservatório de Ribeirão das Lajes no período de 01 a 31 de janeiro de 2020	121
Figura 53 –	Variação da temperatura da água ($^{\circ}C$) em determinadas profundidades do reservatório de Ribeirão das Lajes e temperatura atmosférica no período de 01 a 31 de janeiro de 2020	122

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Dados fornecidos pelo Sistema Profiler 1	51
Tabela 2 –	Dados fornecidos pelo Sistema Profiler 2	52
Tabela 3 –	Dados fornecidos pelo Sistema Meteorologia	55
Tabela 4 –	Características dos sensores de qualidade de água utilizados nas sondas do sistema de monitoramento automático	58
Tabela 5 –	Valores de profundidade da densidade média (m), valores de densidade desta profundidade (kg.m^{-3}) e valores da estabilidade total (Ws) ($\text{kg.m}^2.\text{s}^{-2}$)	79
Tabela 6 –	Datas, valores de RWCS, temperaturas atmosféricas ($^{\circ}\text{C}$) e variações de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) dos pontos mostrados na Figura 36	102
Tabela 7 –	Datas e horários, valores de RWCS, de temperatura atmosférica ($^{\circ}\text{C}$) e variação dos valores de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) dos primeiros metros da coluna d'água nos dias de diminuição da estabilidade segundo as Figuras 40 e 41	107

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

fDOM	Matéria Orgânica fluorescente
MOD	Matéria Orgânica Dissolvida
OD	Oxigênio Dissolvido
RFU	Relative Fluorescence Unit
RTR	Resistência Térmica Relativa da Água
RWCS	Relative Water Column Stability (Estabilidade Relativa da Coluna D'água)

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentagem
°C	Grau Celsius
$m^3.d^{-1}$	Metro cúbico por densidade
$g.cm^{-3}$	Gramma por centímetro cúbico
D	Densidade
T	Temperatura
m^2	Metro ao quadrado
$kg.m^{-3}$	Kilograma por metro cúbico
$m.s^{-2}$	Metro por segundo ao quadrado
km	Kilometro
$mg.L^{-1}$	Miligramma por litro
km^2	Kilometro ao quadrado
$m^3.s^{-1}$	Metro cúbico por segundo
m^3	Metro cúbico
m	Metro
QSU	Unidades de sulfato de quinina
mm	Milímetro
mS/cm	MilliSiemens por segundo
O ₂	Oxigênio
ppb	Parte por bilhão

SUMÁRIO

	INTRODUÇÃO	17
1	OBJETIVOS	20
1.1	Geral	20
1.2	Específicos	20
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
2.1	Reservatórios de água	21
2.2	Tempo de residência	25
2.3	Estabilidade dos corpos d'água	26
2.4	Processos de estratificação	28
2.5	Qualidade da água nos reservatórios	31
2.6	Estabilidade Relativa da Coluna D'água	32
2.7	Resistência Térmica Relativa da Água (RTR)	33
2.8	Estabilidade de Schmidt	34
2.9	Variáveis Meteorológicas	35
2.9.1	<u>Efeitos das frentes frias sobre os reservatórios</u>	36
3	PARÂMETROS	38
3.1	Temperatura	38
3.2	pH	39
3.3	Oxigênio Dissolvido	40
3.4	Matéria Orgânica Dissolvida (MOD)	42
4	ÁREA DE ESTUDO	44
5	METODOLOGIA	47
5.1	Ponto de Coleta de Dados	47
5.2	Coleta de Dados	48
5.2.1	<u>Perfilador Vertical Automático</u>	48
5.2.2	<u>Parâmetros de Qualidade</u>	49
5.2.3	<u>Parâmetros Meteorológicos</u>	54
5.2.4	<u>Transmissão e Recepção dos Dados</u>	55
5.3	Estatística	58

5.4	Processamento Dos Dados	59
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	61
6.1	Aspectos Climáticos E Temperatura Da Água	61
6.2	Estabilidades Térmicas	71
6.2.1	<u>Estabilidade Relativa da Coluna D'água (RWCS)</u>	71
6.2.2	<u>Resistência Térmica Relativa</u>	73
6.2.3	<u>Estabilidade de Schmidt</u>	76
6.3	Oxigênio	82
6.4	pH	87
6.5	Matéria Orgânica Dissolvida (Cdom)	91
6.6	Análise Das Oscilações De Curta Duração	96
	CONSIDERAÇÕES FINAIS	124
	REFERÊNCIAS	127
	APÊNDICE A	138
	APÊNDICE B	139
	APÊNDICE C	141

INTRODUÇÃO

A preservação dos recursos hídricos é uma necessidade atual em todo o mundo. A demanda existente hoje por água doce já preocupa muitos países, mas a situação é mais alarmante em relação à demanda futura. Os recursos hídricos são finitos, assim, sua preservação é de extrema importância (Fernandes et al., 2008).

Em algumas partes do mundo, como no continente africano, por exemplo, a demanda por água doce se encontra acima de sua disponibilidade. 35% da população mundial não têm acesso à água tratada e 43% não contam com serviços adequados de saneamento básico. Diante desses dados, estima-se que dez milhões de pessoas morrem anualmente em decorrência de doenças intestinais transmitidas pela água (Cetesb, 2021).

O Brasil é dono de cerca de 12% das reservas de água doce superficial do mundo e de alguns dos maiores destes reservatórios subterrâneos de água líqüida (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, 2019).

A água é utilizada no Brasil principalmente para irrigação, abastecimento humano e animal, indústria, geração de energia, mineração, aquicultura, navegação, recreação e lazer. As retiradas de águas superficiais e subterrâneas pela agricultura, pecuária, produção florestal, pesca e aquicultura em 2017 foram de 5% na região norte, 22% na região nordeste, 12% no centro-oeste, 26% no sudeste e 35% na região sul (Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil, 2020).

Segundo a Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil de 2020, o consumo total de água no Brasil em 2019 por atividade foi de $746,5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ para a irrigação, $101,1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ para o abastecimento urbano, $108,7 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ para as indústrias, $26,9 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ para o abastecimento rural, $10,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ para a mineração, $3,1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ para as termelétricas e $130,9 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ para dessedentação de animais.

A demanda por água no Brasil é crescente, com aumento estimado de aproximadamente 80% no total retirado nas últimas duas décadas. A previsão é de que até 2030, a retirada aumente 23%. O histórico da evolução dos usos da água está diretamente relacionado ao desenvolvimento econômico e ao processo de urbanização do país (Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil, 2020).

O crescimento das demandas hídricas no Brasil, a partir do aumento da população e das atividades econômicas intensivas em uso de água, contribui para o aumento do stress hídrico¹ com o passar dos anos. As regiões brasileiras mais críticas são a sudeste, onde se destaca o uso da água para abastecimento humano, irrigação e na indústria e a sul, em que a retirada de água para irrigação de grandes lavouras de arroz pelo método de inundação é expressiva. O gerenciamento do uso da água é de fundamental importância para a formulação de políticas públicas que, em última instância, tragam segurança hídrica ao setor, com sustentabilidade econômica e ambiental. Dentro da sustentabilidade, o aumento da eficiência no uso dos recursos naturais, notadamente da água, deve ser meta constante na agenda do produtor e do poder público (Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil, 2020).

Os múltiplos usos da água, o despejo de resíduos sólidos e líquidos em mananciais e a destruição das áreas alagadas e das matas ciliares têm produzido contínua e sistemática deterioração e perdas extremamente elevadas em quantidade e qualidade da água (Tundisi, 2003). Segundo Fernandes et al (2008), as expectativas para o próximo século são preocupantes quanto à disponibilidade de água potável para o consumo humano, tanto pelo crescimento populacional como, principalmente, pela poluição dos reservatórios naturais, rios, lagos, depósitos subterrâneos, etc.

Convencionalmente, para atender a escassez hídrica são utilizadas águas subterrâneas profundas e o armazenamento de águas superficiais em reservatórios. Segundo a Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil de 2020, reservatórios artificiais são construídos para armazenar água e aumentar a segurança hídrica de forma a atender aos diversos usos da água.

A qualidade das águas dos reservatórios tem sido objeto de estudo para vários pesquisadores, sobretudo quando o foco são os seus múltiplos usos (Carpenter et al., 2011). As águas represadas estão sujeitas à deterioração de sua qualidade devido à alta taxa de evaporação e aos aportes de nutrientes oriundos da agricultura e esgotos domésticos (Liu et al., 2011 apud De Lima, 2017).

A qualidade da água dos reservatórios é um aspecto importante, pois é a chave para o desenvolvimento e a conservação de organismos aquáticos e mantém possíveis os

¹ O nível de stress hídrico é a proporção entre a retirada e o total dos recursos de água doce disponíveis no país (Conjuntura dos Recursos Hídricos do Brasil, 2020).

diversos usos da água. A qualidade da qualidade da água pode ser avaliada através de propriedades químicas, como formas inorgânicas ou orgânicas, ou físicas, como transparência, temperatura, pH e condutividade (Mwaura, 2006).

Normalmente, os reservatórios são divididos em três zonas em função de suas características físicas, químicas e biológicas, de acordo com seus diferentes padrões longitudinais: zona fluvial, zona de transição e zona lacustre. Diversos fatores influenciam o tamanho e os limites entre essas zonas, como morfometria, estratificação térmica, localização geográfica e tempo de retenção da água.

Verticalmente, a coluna d'água dos reservatórios está submetida às dinâmicas de estabilidade e mistura, o que reflete na qualidade da água. Outros processos que também ocorrem na coluna d'água são decorrentes da variação da temperatura da camada superficial, que geralmente reflete a temperatura do ar (Gantzer et al., 2009).

O conhecimento da dinâmica física dos reservatórios é de fundamental relevância para estudos hidrológicos e de qualidade da água, uma vez que esta dinâmica atua como controle físico da estrutura biótica nesses ambientes (Uhlmann, 1998).

1 OBJETIVOS

1.1 Geral

Este trabalho teve como objetivo estudar a estrutura térmica do reservatório de Ribeirão das Lajes através das análises de estabilidade da coluna d'água e das oscilações de estratificação térmica de curta duração (semanais e diárias) e analisar a distribuição das variáveis de oxigênio dissolvido, pH e matéria orgânica frente a essas estratificações.

1.2 Objetivos Específicos

- a) Avaliar a variação temporal da estabilidade da coluna d'água do reservatório de Ribeirão das Lajes;
- b) Comparar a Estabilidade Relativa da Coluna d'Água (RWCS – sigla em inglês) com a Resistência Térmica Relativa (RTR) e a Estabilidade de Schmidt, a fim de se confirmar os períodos de estabilidade e instabilidade da coluna d'água do reservatório de Ribeirão das Lajes;
- c) Identificar a influência dos fenômenos atmosféricos em relação ao RWCS através das oscilações de estratificação térmica de curto período;
- d) Analisar a distribuição de oxigênio dissolvido e pH na coluna d'água do reservatório de Ribeirão das Lajes durante o período de estudo.
- e) Analisar a distribuição da matéria orgânica a partir dos dados de fDOM e possíveis alterações em relação às estratificações térmicas que ocorrem na coluna d'água do reservatório de Ribeirão das Lajes.

1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Reservatórios de água

Reservatórios são áreas construídas para o armazenamento da água para sua utilização posterior. Também podem servir para impedir que inundações ocorram em vales a jusante do represamento, designar um ambiente aquático ou para alterar as propriedades da água. Um reservatório pode ser criado construindo uma barragem através do vale ou usando depressões (Votruba e Broza, 1989).

Os reservatórios podem ser de armazenamento ativo (acumulação ou conservação), os quais ajudam a superar a dependência do regime hidrológico natural de um território durante as secas, ou podem ser de controle (ou retenção) de enchentes, para que o território seja protegido de inundações aumentando a vazão da margem ou aumentando o volume do reservatório para conter o excedente de água. Os reservatórios de retenção em riachos geralmente têm um propósito duplo: abastecimento de água e proteção contra enchentes (Votruba e Broza, 1989).

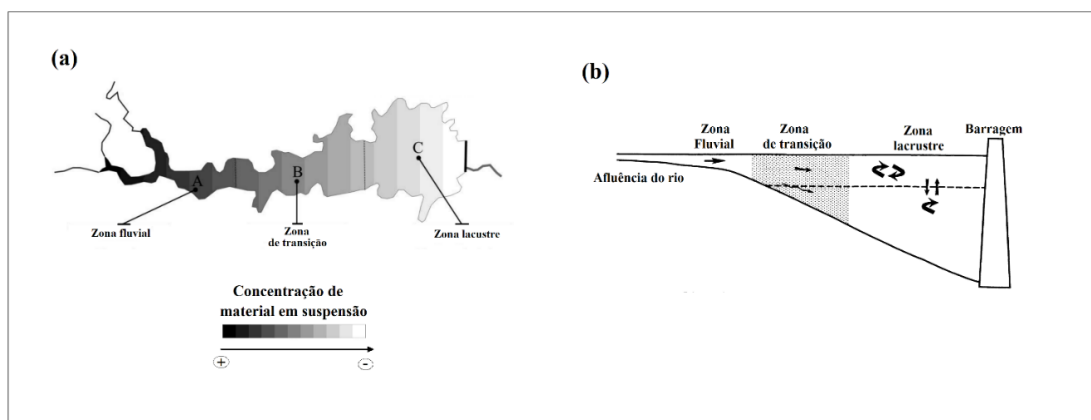
A água acumulada em reservatórios de armazenamento pode ser retirada para diversos fins como irrigação, abastecimento industrial, agrícola e público, geração de energia, como também podem ser utilizadas para a manutenção da profundidade de navegação, diluição para fins sanitários e outros. Um ambiente aquático adequado, uma vez estabelecido no reservatório, pode servir para fins recreativos e esportes aquáticos, piscicultura e criação de patos, cultivo de plantas aquáticas, tratamento da água e melhoria do ambiente natural (Votruba e Broza, 1989).

O efeito de um reservatório na qualidade da água a jusante da barragem (poluição, temperatura, etc.) e o impacto das atividades humanas na qualidade da água de entrada e nos processos mecânicos, químicos e biológicos no reservatório tornam os parâmetros qualitativos da água tão importantes quanto os parâmetros quantitativos (Votruba e Broza, 1989).

Segundo Lowe-McConnell (1966), lago artificial é um nome alternativo para reservatório, pois ambos os corpos d'água possuem similaridade limnológica, apesar de existirem características presentes em reservatórios que não se encontram em lagos.

Tomando os reservatórios como uma generalização, a maior parte da água, nutrientes e cargas de sedimentos que adentram o reservatório são provenientes de tributários principais localizados a uma maior distância da barragem (Thorton et al., 1990). Então, de acordo com seus diferentes padrões longitudinais, os reservatórios, segundo Tundisi (1999), podem ser divididos em três zonas de acordo com suas características físicas, químicas e biológicas: zona fluvial ou zona de rio, zona de transição e zona lacustre (Figura 1).

Figura 1- Zonas longitudinais de um reservatório.



Legenda: (a) Zona longitudinal de um reservatório visto de cima e (B) Zona longitudinal de um reservatório em uma seção transversal.

Fonte: (a) Adaptado de Wachholz, 2011 apud Cordeiro, 2013; (b) Adaptado de Wetzel, 2001.

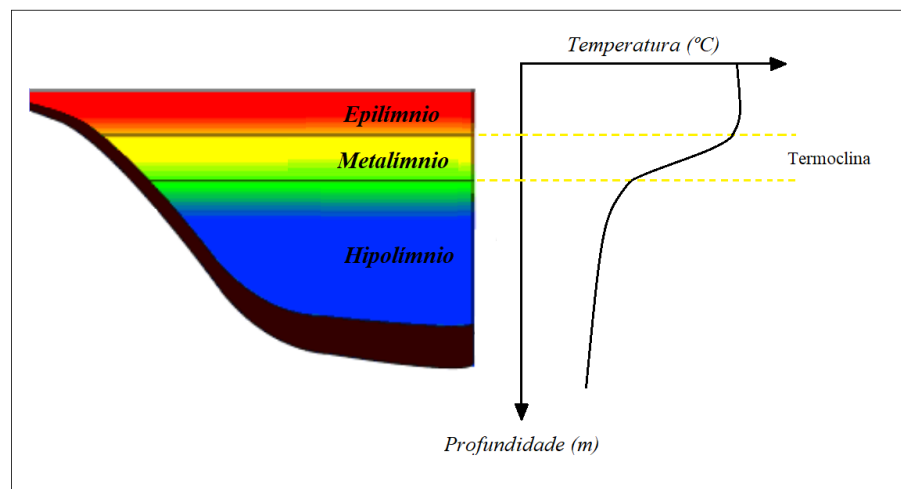
A zona fluvial é a primeira zona e é a região mais distante da barragem e a mais impactada pela entrada de água dos afluentes, caracterizada por um intenso fluxo de nutrientes e altas concentrações de materiais em suspensão resultando em uma área turbulenta e com grande turbidez e consequente redução da penetração de luz solar, que resulta em uma menor produção primária. À medida que a água se desloca em direção à barragem, atinge a zona de transição, onde a sedimentação de partículas maiores aumenta e se tem maior penetração de radiação solar fotossintética ativa, resultando em maior produção primária e consumo dos nutrientes. Já na parte final do reservatório e mais próxima à barragem, se encontra uma região chamada de zona lacustre. Devido a lentidão das correntes ocorre a limitação de nutrientes causada pela intensa sedimentação de materiais em suspensão, que pode inibir o crescimento do fitoplâncton, e também a estratificação da coluna d'água devido ao maior aquecimento das águas superficiais. Porém, é uma região com águas menos turvas, o que pode levar a um

aumento na produtividade primária que, neste caso, estaria limitada pelos nutrientes (Tundisi, 1999).

Diversos fatores influenciam o tamanho e os limites entre essas zonas, como morfometria, estratificação térmica, localização geográfica, tempo de retenção da água e a vazão dos rios afluentes. A principal função a qual um reservatório será submetido afetará seu tamanho, determinado pela seleção do local para a construção da barragem, sua profundidade, determinada pela morfometria do vale, o volume armazenado e a capacidade relativa ao fluxo que determinará o tempo de retenção das suas águas (Straskraba, Tundisi e Duncan, 1993).

Quando um corpo d'água está submetido à condição de estabilidade térmica, não há mistura das massas d'água em função do gradiente crescente de densidade, favorecendo a existência de três camadas ao longo do perfil vertical: epilímnio, metalímnio e hipolímnio (Figura 2) (Kalf, 2002).

Figura 2 - Estratificação vertical de um reservatório.



Fonte: Adaptado de <http://www.ufrj.br/institutos/it/de/acidentes/tem.htm>

O epilímnio é a camada superior, mais aquecida e menos densa, normalmente é a mais homogênea, com maior turbulência em função da ação dos ventos, do aquecimento diurno e do resfriamento noturno. É nesta região que há maior produtividade primária, com maior produção que consumo de oxigênio, o que torna um ambiente propício para animais e bactérias heterotróficas (Kalf, 2002). Nesta zona, a temperatura e os níveis de oxigênio dissolvido tendem a serem altos devido a maior

intensidade da radiação solar que gera alta produtividade primária existente nesta camada que é responsável pela manutenção da oxigenação dessas águas.

O metalímnio é a região reconhecida por apresentar a maior variação de temperatura, cognominado de termoclina (Imberger e Hamblin, 1982). Há um grande gradiente de densidade que impede a ocorrência de uma mistura efetiva (Kalff, 2002).

O hipolímnio é caracterizado por ser a região de águas mais profundas e mais frias, com densidades mais elevadas. Reservatórios que apresentam elevados tempos de residência, com prolongados períodos de estratificação, regularmente apresentam nesta região um ambiente com reduzidas concentrações de oxigênio ou até mesmo uma anoxia em função da predominância dos processos de respiração e de degradação da matéria orgânica oriunda do epilímnio e dos valores de condutividade elétrica relativamente elevados em função da interação com o sedimento (Kalff, 2002; Esteves, 2011).

À medida que a estratificação se torna mais estável, o contraste na temperatura da água e no oxigênio dissolvido entre o epilímnio e o hipolímnio tende a se tornar mais pronunciado e a posição da termoclina tende ser mais rasa, aumentando efetivamente o tamanho do hipolímnio (Rodrigues, 2016).

Segundo Perks (2006), uma das causas comuns de problemas para as operações de recursos hídricos é quando a termoclina se encontra acima do nível de extração designado e seja retirada água de má qualidade do reservatório.

Deixar de realizar o monitoramento adequado e desenvolver uma compreensão contínua das qualidades da qualidade da água dentro do perfil de um reservatório pode criar riscos e problemas consideráveis para as autoridades hídricas urbanas. Alguns dos problemas mais comuns que podem ser associados à estratificação do reservatório são descritos abaixo (Perks, 2006):

- a) os processos de tratamento de água podem se tornar difíceis de gerenciar e o custo do tratamento pode aumentar substancialmente;
- b) a capacidade de atender aos padrões regulatórios em relação à qualidade da água potável pode ser comprometida;
- c) a liberação do fluxo ambiental pode ser prejudicada, pois a liberação de água fria ou anaeróbica pode ter impactos adversos na saúde do rio a jusante ou em outros usuários beneficiados;

- d) efeitos adversos no ecossistema dentro do reservatório podem ocorrer como resultado da formação de minerais devido aos baixos níveis de oxigênio dissolvido, impactos potenciais sobre a vida aquática (como a morte de peixes) e o potencial de proliferação de algas também pode aumentar;
- e) em casos extremos, um reservatório severamente estratificado pode potencialmente precisar ser isolado de um sistema de abastecimento de água devido à má qualidade da água.

2.2 Tempo de residência

O tempo de residência ou de retenção das águas também é conhecido como tempo de permanência na água, tempo de retenção hidráulica, taxa de retenção ou taxa de descarga e pode influenciar os padrões longitudinais e verticais observados em um reservatório (Straskraba, 1999). O tempo de residência R , em dias, é definido como:

$$R = \frac{V}{Q} \quad (1)$$

Onde V é o volume de água no reservatório em m^3 e Q é o fluxo médio anual de água que atravessa o reservatório em $m^3.d^{-1}$. V e Q variam ao longo do ano, tanto sazonalmente quanto em relação à operação do reservatório.

O tempo de residência é um conceito teórico que não diz nada sobre os tempos médios de retenção de partículas de água dentro do reservatório. Pode haver ocasiões em que as parcelas de água percorrem o caminho de entrada e saída em tempos muito menores que o calculado teoricamente. Porém, o tempo de retenção é uma medida útil limnologicamente e permite a comparação entre diferentes reservatórios (Straskraba, Tundisi e Duncan, 1993).

Em alguns casos, o tempo de residência é maior nos reservatórios de estratificação profunda quando comparado com os de estratificação superficial. Isso ocorre porque o fluxo fluvial se limita às águas superficiais e este fluxo tem um forte

efeito de mistura, então, ao adentrar nas águas do reservatório, uma coluna d'água com estratificação mais superficial será amplamente misturada, diferentemente da coluna d'água com uma estratificação mais profunda, onde esta estratificação impede a mistura das camadas d'águas, fazendo com que o fluxo fluvial misture somente as águas superficiais e as águas profundas continuem sem alteração, tendo maior tempo de retenção (Straskraba, Tundisi e Duncan, 1993).

Em reservatórios rasos e com menores tempos de retenção de suas águas, a camada superior da coluna d'água não irá absover grande quantidade de calor provinda da atmosfera, e da contribuição direta da radiação solar devido à rápida troca de água local e, com isso, as águas hipolimnéticas não possuirão grandes variações de temperatura em relação às águas do epilímnio, o que acarretará em um reservatório com estratificação menos pronunciada ou inexistente. Quando o tempo de retenção das águas é maior, a diferença de temperatura entre essas camadas aumenta, pois o tempo em que o calor emanado pela radiação solar é absorvido pelas águas do epilímnio aumenta (Straskraba, Tundisi e Duncan, 1993).

Reservatórios com tempos de residência distintos são marcados por diferenças químicas, biológicas, em seus movimentos de mistura, estratificação, zonação horizontal, mistura vertical e horizontal e fluxos internos. As características hidrodinâmicas resultantes serão decisivas para a distribuição de substâncias conservativas, ou seja, substâncias cujas concentrações permanecem constantes. O mesmo não acontece com substâncias não conservativas e organismos vivos do plâncton, pois estes interagem biologicamente e reagem ao regime de mistura, ao fluxo de água ou às condições de luz, além de reagirem também à disponibilidade de nutrientes na coluna d'água. Organismos maiores como peixes também reagem a luz, temperatura, concentração de oxigênio dissolvido e disponibilidade de alimentos e, indiretamente, também são afetados pelo tempo de residência da água (Straskraba, Tundisi e Duncan, 1993).

2.3 Estabilidade dos corpos d'água

Diversos mecanismos e forças físicas atuam na estrutura vertical e horizontal dos reservatórios com consequente impacto nas espécies químicas e biológicas e no funcionamento do ecossistema. Dentre eles, destacam-se as ações dos ventos, pressão barométrica, transferência de calor, descargas na superfície, fluxo à jusante (natural ou artificial), força de Coriolis², descarga na superfície, estratificação, mistura vertical, retirada ou perda seletiva à jusante (natural ou artificial), correntes de densidade e formação de ondas internas (Tundisi & Matsumura-Tundisi, 2008 apud Serafim, 2020).

A radiação solar é o principal indutor dos processos fotossintéticos, determinado pelas latitudes que provocam diferentes quantidades de calor recebidas anualmente, provocando assim um gradiente de aquecimento sobre a Terra (Kalff, 2002). O impacto no clima, em função do gradiente de aquecimento, é observado nas intensidades de precipitações, ações dos ventos e aquecimento subaquático em diferentes latitudes, sendo determinantes na estabilidade da coluna de água (Kalff, Op. Cit.).

Segundo Kalff (2002) e Esteves (2011) grande parte da energia proveniente da radiação solar é absorvida nos primeiros metros da coluna d'água, sendo que as radiações de ondas longas (infravermelho), são absorvidas nos primeiros centímetros (Tundisi e Matsumura-Tundisi, 2008 apud Serafim, 2020). Em alguns casos, onde não há ação turbulenta do vento, pode haver um declínio exponencial da temperatura com o aumento da profundidade. O aquecimento de um sistema aquático é um dos principais fatores que influenciam a variabilidade da densidade da água, o que faz com que um gradiente vertical seja gerado na coluna d'água (Dodds, 2002; Tundisi e Matsumura-Tundisi, 2008 apud Serafim, 2020).

A variabilidade na densidade da água é importante, pois é responsável por controlar o comportamento físico da água e pode levar à formação de diferentes camadas, que formam uma barreira física dificultando a distribuição uniforme do calor, criando a condição de estabilidade térmica (Dodds, 2002; Esteves, 2011). Essa estabilidade é responsável por determinar as características básicas dos processos

² Força de Coriolis é uma força inercial que age sobre corpos que estão em movimento em um referencial não inercial que, em relação a um referencial inercial, possui movimento de rotação. Neste caso, seriam os movimentos horizontais de massas de águas provocados pela rotação da Terra.

físicos, químicos e biológicos em um sistema aquático continental, como a estratificação e a desestratificação de um corpo d'água.

Para que o processo de mistura vertical ocorra em reservatórios estratificados, é necessário que a ação de algumas forçantes ambientais, como o resfriamento da camada superficial ou a ação dos ventos, sejam suficientemente fortes para quebrar a barreira física formada pela diferença de densidade entre camadas d'água e, assim, provocar a mistura completa do corpo d'água (Macintyre et al., 2009).

Sem uma barreira física à circulação de água, o reservatório se encontra em instabilidade térmica. Porém, nem sempre a circulação durante o período de desestratificação ocorre de forma completa (Lewis, 1996). Além das forças ambientais, a descarga dos rios é o principal processo que leva a desestratificação desses sistemas, pois são descargas com menores temperaturas do que as massas de água dos reservatórios, que acabam tendo suas estratificações quebradas pela mistura forçada das águas de diferentes densidades existentes na coluna d'água neste momento (Kalff, 2002).

Segundo Tundisi e Matsumura-Tundisi (2008), os processos físicos de estratificação e mistura vertical são cruciais para a estrutura e composição dos processos químicos e biológicos em lagos e reservatórios. Os processos de estratificação e mistura são consequências das dinâmicas envolvendo diversas forças ambientais, como trocas de calor e das entradas de energia, da absorção da radiação solar com a profundidade da coluna d'água, da ação dos ventos, da direção da energia cinética das entradas de água e da direção e força de saída da água.

2.4 Processos de estratificação

Segundo Lewis (1996), o regime de estratificação é o fator hidroclimático mais importante que regula os processos bióticos nos ecossistemas lacustres. Em um reservatório, as correntes induzidas pelo vento e a estrutura da termoclina controlam principalmente a distribuição vertical de calor, de material dissolvido e particulado e processos de mistura nas colunas de água (Elçi, 2008; Reynolds, 1984).

Os reservatórios tropicais são particularmente sensíveis às mudanças nas condições climáticas, principalmente as fortes chuvas que podem destruir ou até impedir a estratificação (Imevbore, 1967; Arumugam e Furtado, 1980). Além disso, diferenças relativamente pequenas de temperatura podem definir uma termoclina. Sendo assim, pode-se dizer que a densidade é um dos fatores determinantes para a estratificação de um reservatório (Symons et al., 1965). Variações químicas nos reservatórios são atribuídas a uma variedade de fatores associados a dinâmica de fluxo e atividade biológica.

A estrutura térmica da coluna d'água traz diversas implicações para a circulação da água no reservatório (Wetzel, 2001). Quando a estratificação térmica é verticalmente estável, a camada inferior da coluna d'água é mais densa do que a camada superior, o que resulta em duas principais consequências: a ausência de circulação vertical no reservatório (em larga e pequena escala) e o favorecimento da formação de ondas internas que podem se propagar por longas distâncias, distribuindo energia cinética e momentum. Entretanto, quando a estratificação do reservatório é instável, a parte superior da coluna d'água é mais densa do que a parte inferior, dando origem a movimentos verticais, contribuindo para a mistura da coluna d'água (Curtarelli, 2012).

Segundo Branco et al. (2007) as temperaturas da água em ambientes tropicais estabelecem um gradiente térmico de alguns graus centígrados, cerca de 2 a 3°C, o qual é suficiente para separar as massas de água e produzir estratificações térmicas relativamente estáveis. Segundo o mesmo autor, estas estratificações produzem gradientes físicos e químicos verticais.

Uma estratificação de verão altamente estável atua como uma barreira que restringe a mistura das águas e dificulta o transporte de oxigênio das águas superficiais oxigenadas para as águas hipolimnéticas, o que pode resultar em um déficit de oxigênio nessa camada, chegando a uma possível condição de anoxia (Zhang et al., 2015). Tal condição faz com que metais pesados e nutrientes sejam liberados dos sedimentos, de materiais particulados ou através de transformações das formas oxidadas para as reduzidas (Mackenthun e Stefan, 1995) e se difundam na água do hipólímnio levando a uma queda da qualidade dessas águas. Esses metais pesados representam risco à saúde pública, aumentando assim o tempo e os gastos no processo de tratamento da água (Gerling et al., 2014; Visser et al., 2016). Durante o outono, as águas superficiais esfriam, assentam e são substituídas por águas mais quentes vindas de baixo, isso

devido ao processo de circulação convectiva, que produz condições isotérmicas em toda a coluna d'água do reservatório (Petts, 1986).

Em reservatórios rasos, a existência de circulação completa da coluna d'água durante a maior parte do ano mantém os níveis de oxigênio por toda a coluna de água do reservatório e o processo de decomposição da matéria orgânica é caracterizado por reação aeróbica. Entretanto, em reservatórios profundos, há pouca mistura abaixo da termoclina e a luz solar não penetra no hipolímnio, então, não ocorre dispersão de oxigênio e este poderá ser consumido até o seu esgotamento. O processo de decomposição envolvendo a matéria orgânica gerada no epilímnio e os detritos orgânicos alóctones da bacia hidrográfica, torna-se anaeróbico e são estabelecidas condições redutoras. Então, o sulfeto de hidrogênio é produzido, o dióxido de carbono é liberado, o pH diminui, a condutividade aumenta e a dissolução de ferro e manganês ocorre a partir dos sedimentos do fundo (Petts, 1986).

Segundo Liu et al. (2012), quando ocorre a desestratificação, há uma homogeneização vertical das variáveis bióticas, provocando a redução dos níveis de oxigênio dissolvido e aumentando a concentração de nutrientes, metais e material em suspensão no epilímnio, o que desencadearia a proliferação de algas, com o possível crescimento de cianobactérias tóxicas e que, conseqüentemente, causariam uma queda na qualidade da água (Branco et al., 2007).

A queda noturna da temperatura do ar faz com que haja uma diminuição na temperatura das camadas superficiais da coluna d'água e pode resultar na instabilidade da densidade das águas do reservatório e em movimentos convectivos no epilímnio. A turbulência conduzida por convecção dentro da camada de superfície aumenta e, adicionada à turbulência induzida pelo vento, resulta no aprofundamento dessa camada superficial (Fischer et al., 1979).

Ciclos sazonais na estratificação térmica de um reservatório podem variar de acordo com sua localização geográfica, parâmetros batimétricos e regime de chuva na bacia na qual o reservatório está inserido (Imberger, 1994; Assireu et al., 2011). Em regiões tropicais do hemisfério sul, os reservatórios ganham calor quando a radiação de ondas curtas aumenta significativamente, alcançando a máxima estratificação térmica no fim do verão. Tais condições levam a uma termoclina mais pronunciada e estável e a uma mistura mínima ou ausente entre as águas do epilímnio e hipolímnio. Já nos meses

de outono e inverno, os reservatórios perdem calor, podendo chegar a situações de mistura completa da coluna d'água (Saber et al., 2018; Alcântara et al., 2010b).

Condições climáticas variáveis podem resultar na falta de um padrão sazonal térmico, de acordo com localização geográfica, tanto em termos de latitude, quanto associada a topografia e morfometria da bacia do reservatório e ao tempo de retenção do mesmo (Petts, 1984; Petts 1986). A permanência ou não da estratificação térmica em lagos profundos da região tropical determina que à esta se superponha as estratificações químicas e biológicas. Havendo a ocorrência de gradientes verticais decrescentes de oxigênio dissolvido, com hipolímnio permanentemente anóxico e com altas concentrações de ferro e gás sulfídrico.

2.5 Qualidade da água nos reservatórios

A avaliação da qualidade da água nos reservatórios é essencial porque estes corpos de água são frequentemente uma das principais fontes de água para o abastecimento público. Desta maneira, avaliar a qualidade do suprimento de água dos reservatórios e identificar as várias fontes de contaminantes tornou-se obrigatório a fim de averiguar problemas de contaminação.

Os reservatórios são ambientes que podem ser utilizados para estudos de soluções adequadas para os mecanismos e problemas associados à poluição, bem como os impactos antrópicos (Asante et al., 2008).

O gerenciamento da qualidade da água dos reservatórios é uma questão complexa devido à natureza dinâmica dos reservatórios, à interferência do homem e às condições naturais ambientais. Os problemas decorrentes da quantidade de água, da operação e da natureza multifuncional de um reservatório são diversos e podem ser ecológicos, econômicos e/ou sociais (Straskraba, Tundisi e Duncan, 1993). Múltiplas funções em reservatórios podem criar

condições que facilitam a dispersão de doenças transmitidas pela água, aumentando assim os problemas de saúde.

Para cada uso da água, há a exigência de uma determinada qualidade. Ou seja, a água para beber deve obedecer a critérios mais rígidos do que a água utilizada na

recreação ou para fins paisagísticos, por exemplo. A qualidade desejável para a água usada na irrigação varia em função dos tipos de culturas. Culturas alimentícias exigem uma qualidade de água superior à de culturas não alimentícias. O mesmo acontece com a água destinada às indústrias, cujas características dependem dos tipos de processamentos e produtos das fábricas. Alguns usos provocam alterações nas características da água, tornando imprópria para outras finalidades. A irrigação, com o uso de fertilizantes e pesticidas, pode provocar a poluição de mananciais, causando prejuízos a outros usos. Assim, há a necessidade do manejo adequado dos recursos hídricos de acordo com seus diversos usos de forma que garanta água com qualidade e na quantidade desejáveis aos seus diversos fins (Fernandes et al., 2008).

Como falado nos tópicos acima, devido à existência de estratificação térmica, podem ocorrer gradientes verticais decrescentes de oxigênio dissolvido, com o hipolímnio se encontrando permanentemente anóxico e com altas concentrações de ferro e gás sulfídrico. Os nutrientes resultantes do processo de decomposição da matéria orgânica permanecem no hipolímnio, retornando de forma muito lenta para o epilímnio pelo mecanismo da difusão molecular, tendo como consequência um empobrecimento da zona eufótica, com a limitação da produção primária em função das baixas concentrações de nutrientes. Nessas circunstâncias, a qualidade da água do epilímnio é significativamente diferente da encontrada no hipolímnio (Porto et al., 1991).

Devido aos períodos de estiagem, ocorre a redução do volume de água dos reservatórios e, de acordo com a equação do tempo de residência (1), caso a vazão de retirada seja mantida, o tempo de residência irá diminuir. Caso a vazão de retirada também seja diminuída, o tempo de residência pode ser mantido constante, pois este vai depender da redução de seu volume e do aporte de água. Estes fatos intensificam o processo de eutrofização, resultando em aumento da turbidez, condutividade ou salinidade, concentração de nutrientes e biomassa fitoplanctônica, incluindo a ocorrência de blooms de cianobactérias (Bouvy et al., 2003). Além disso, devido a menor profundidade da água, o fósforo, que antes estava armazenado no sedimento, pode ser remobilizado por vários processos, como a ação dos ventos e dos peixes bentívoros por exemplo, intensificando a fertilização interna e levando, por consequência, à eutrofização (Beklioglu et al., 2007; Araújo et al., 2016).

2.6 Estabilidade Relativa da Coluna D'água

Verticalmente, a coluna de água dos reservatórios tropicais está sujeita a dinâmica de estabilidade e mistura que, por sua vez, influenciam a qualidade da água (Branco et al., 2009). A Estabilidade Relativa da Coluna d' Água, da sigla em inglês RWCS (Relative Water Column Stability), é um parâmetro adimensional que indica o grau de estabilidade da coluna d'água como um todo e foi calculado de acordo com Padisák et al. (2003), onde é realizada a razão entre a diferença de densidade entre a água de fundo (D_b) e a da superfície (D_s), pois assim é possível conhecer a estabilidade da coluna d'água como um todo, e a diferença de densidade da água pura a 4°C (D_4) e 5°C (D_5), usando a fórmula da equação (2):

$$RWCS = \frac{D_b - D_s}{D_4 - D_5} \quad (2)$$

As densidades da água a 4°C e 5°C são utilizadas como referências, pois são as densidades onde a água ocupa o maior volume e possuem maior expansão (Esteves, 1998).

A densidade da água (D) (g.cm^{-3}) foi calculada em função da temperatura da água (T) (°C) usando a equação de Krambeck (Rodríguez-Rodríguez et al., 2004 apud Xu et al., 2011):

$$D = 0,999869 + 6,67413 \times 10^{-5} T - 8,85556 \times 10^{-6} T^2 + 8,23031 \times 10^{-8} T^3 - 5,51577 \times 10^{-10} T^4 \quad (3)$$

Valores altos de RWCS estão associados a uma estratificação térmica mais intensa e maior estabilidade da coluna d'água. Caso o RWCS apresente valores cada vez mais baixos, a estabilidade se torna cada vez mais fraca e a coluna d'água cada vez mais instável. Quando o valor do RWCS for zero, a água se encontra completamente misturada.

2.7 Resistência Térmica Relativa da Água (RTR)

A Resistência Térmica Relativa (RTR) da água parte do mesmo princípio que o RWCS, porém, os cálculos da estabilidade são feitos camada a camada por toda a coluna d'água. Esta resistência é calculada como a razão entre a variação de densidade entre duas camadas de água em profundidades adjacentes e a diferença de densidade da água pura entre 4 °C e 5 °C (Silva, 2016), como mostra a fórmula abaixo:

$$RTR = \frac{D_{T_1} - D_{T_2}}{D_4 - D_5} \quad (4)$$

Onde D_{T_1} e D_{T_2} indicam as densidades da água nas temperaturas T_1 e T_2 , respectivamente, e D_4 e D_5 indicam as densidades da água pura nas temperaturas de 4 e 5 °C, respectivamente (Tundisi & Matsumura-Tundisi, 2008).

2.8 Estabilidade de Schmidt

É uma equação que descreve a estabilidade de um lago e foi definida conceitualmente por Schmidt com o propósito de fornecer informações sobre a contribuição de cada camada do lago para a estabilidade. Essa estabilidade é análoga, em sua forma, à expressão derivada por Birge (1916) para seu conceito de trabalho direto do vento e pode ser combinada com o mesmo para produzir uma curva para o trabalho total direto (trabalho necessário para provocar a mistura completa das camadas de água) em função da profundidade do lago.

Birge (1916) definiu o trabalho do vento como o trabalho mínimo necessário para superar as forças de flutuabilidade na distribuição de um lago não estratificado de conteúdo mínimo de calor (geralmente considerado em associação a uma temperatura de 4 °C), de modo a produzir uma estratificação de densidade observada.

Schmidt (1928) definiu a estabilidade de um lago como o trabalho adicional que seria necessário para transformar essa distribuição de densidade em uma nova distribuição com uniformidade sem adição ou subtração de calor. Embora ambas as

quantidades sejam apenas partes pequenas, variáveis e desconhecidas do trabalho total do vento realizado contra forças viscosas na geração de turbulência, elas têm desfrutado de uma longa história de uso significativo em limnologia, já que a fórmula de Schmidt fornece apenas informações sobre a estabilidade total do lago e não é análoga à formulação de Birge, que fornece trabalho do vento em função da profundidade.

Idso (1973) reformulou o conceito de Schmidt de uma forma análoga à de Birge e é através desta analogia que serão realizados os cálculos da Estabilidade de Schmidt neste trabalho.

Birge (1916) mostrou que em uma base de unidade de área, o trabalho do vento pode ser expresso como:

$$W_s = \frac{g}{A_0} \int_0^{z_m} (z - z^*) (\rho_z - \rho^*) A_z dz \quad (5)$$

Onde A_0 é a área da superfície do lago (m^2), A_z é a área do lago na profundidade z (m), ρ_z é a densidade ($kg.m^{-3}$) calculada a partir da temperatura na profundidade z , ρ^* é a média ponderada por volume densidade da coluna de água, z^* é a profundidade onde ocorre a densidade média, dz é o intervalo de profundidade e g é a aceleração da gravidade ($m.s^{-2}$).

2.9 Variáveis meteorológicas

Os reservatórios respondem continuamente à ação de forçantes externas, como vento, radiação solar incidente, vazão de entrada e saída de água, pressão e temperatura atmosféricas e umidade (Wetzel, 2001). Em virtude disso, a ocorrência de eventos hidrometeorológicos de curta duração, como a passagem de uma frente fria, por exemplo, pode causar alterações nos processos físicos da coluna d'água e alterar a qualidade dessa água (Alcântara et al., 2010c; Morais et al., 2010; Tundisi et al., 2004 apud Curtarelli, 2012).

A passagem de uma frente fria sobre um reservatório é acompanhado por uma queda da pressão atmosférica, temperatura e umidade do ar, com alterações da direção e velocidade do vento. O aumento da nebulosidade e precipitação frequentemente são

observados durante a atuação deste tipo de sistema frontal (Varejão Silva, 2006 apud Curtarelli, 2012).

A ação de frentes frias sobre reservatórios altera o balanço de calor entre a superfície da água e a atmosfera, com influência direta nos processos de estratificação e mistura na coluna d'água (Liu et al., 2009; Alcântara et al., 2010c). As alterações no campo de vento induzidas pela passagem das frentes podem modificar o padrão de circulação do sistema aquático (Laval et al., 2003).

“Um sistema frontal atmosférico é formado quando ocorre o encontro entre duas massas de ar com propriedades físicas (como temperatura e umidade, por exemplo) distintas. Devido a estas diferenças em suas propriedades físicas, as massas de ar tendem a se manter individualizadas, como fluidos imiscíveis (Donn, 1978). Contudo, geralmente entre elas ocorre uma camada de transição, conhecida como superfície frontal podendo ter vários quilômetros de comprimento” (Varejão Silva, 2006 apud Curtarelli, 2012).

As frentes são classificadas de acordo com as características térmicas da massa de ar que a compõe, podendo ser quentes ou frias. As frentes frias tendem a se deslocar no sentido pólo-equador e as frentes quentes no sentido oposto (Donn, 1978). As frentes quentes possuem baixa ocorrência no Brasil e só são observados na região sul do país (Lima, 1985). Esta frente é frequentemente fraca e limitada em extensão horizontal (Mass, 1991). Já a frente fria é uma interface ou uma zona de transição, que pode variar entre 25 km a 250 km de extensão, entre massas de ar heterogêneas, onde o ar frio, seco e mais denso avança em direção ao ar quente, úmido e mais leve. A passagem destas frentes ocasiona a diminuição da temperatura do ar e da pressão atmosférica e modificação da direção e velocidade do vento (Hsu, 1988; Donn, 1978 apud Curtarelli, 2012). As frentes frias que atingem o Brasil se formam na região sul do continente americano, atingindo a região sudeste do Brasil a cada seis dias no inverno e entre onze a quatorze dias no verão (Stech e Lorenzetti, 1992). Andrade (2005) e Andrade e Cavalcanti (2004) citam que alguns estudos mostram que no Brasil há uma diminuição na ocorrência das frentes frias nos meses de verão e em regiões em direção às baixas latitudes. Nos meses de inverno, as frentes frias se sucedem com maior frequência e maior velocidade de deslocamento, o que causa nebulosidade principalmente no litoral (Stech e Lorenzetti, 1992).

2.9.1 Efeitos das frentes frias sobre os reservatórios

Os efeitos das passagens de frentes frias sobre os reservatórios causam grandes modificações nos processos físicos, químicos e biológicos e, devido a isto, estudos em relação a esses efeitos são de grande importância para que o manejo neste corpo d'água seja realizado de forma potencializada e aperfeiçoada (Tundisi et al., 2004; Alcântara et al., 2010c).

A passagem de frentes frias sobre reservatórios pode alterar a estrutura termal e ocasionar mistura parcial ou completa da coluna d'água (Alcântara et al., 2010c), o que pode alterar a hidrodinâmica e a qualidade da água nos reservatórios. Além disso, pode ocorrer redução do conteúdo de calor armazenado na coluna d'água deste corpo de água.

Os maiores efeitos com relação a qualidade da água são verificados 2 a 3 dias após a chegada da frente fria, quando a intensidade do vento é maior. Após a sua passagem, há uma diminuição da velocidade do vento e, conseqüentemente, estabilização da coluna d'água, alterando a concentração de oxigênio dissolvido nas camadas hipolímnéticas do reservatório (Morais et al., 2010). Pode haver também alterações na cor e odor da água associados à liberação de substâncias do fundo do reservatório.

3 PARÂMETROS

Neste parágrafo será comentado sobre os parâmetros utilizados neste estudo como forma de conhecimento inicial e geral da forma que estes interferem na estabilidade da coluna d'água de um reservatório.

3.1 Temperatura

É considerado um dos parâmetros chave para o entendimento da dinâmica de sistemas aquáticos por ser determinante na manutenção da qualidade da água e da qualidade de vida dos organismos existentes ali (Horne e Goldman, 1994). Nesse contexto, é importante conhecer o regime térmico do corpo d'água, pois a temperatura afeta os processos físicos, químicos e biológicos nos corpos d'água.

A densidade da água é função da temperatura e, por consequência, influencia os processos de transporte de substâncias e na mistura vertical do corpo d'água. A variação da temperatura com a profundidade, por exemplo, pode ser utilizada para caracterizar a estrutura das características físicas dos reservatórios. Em razão disso, o conhecimento da variação da temperatura de um corpo de água é relevante e pode ser usado como parâmetro de calibração para as variáveis relacionadas ao transporte difusivo e advectivo (Corrêa e Da Cunha, 2013; Colombo e Mannich, 2017).

Os corpos d'água sofrem variações sazonais ou diárias de temperatura em decorrência das mudanças das condições térmicas da atmosfera. A temperatura das águas superficiais é influenciada pela latitude, altitude, hora do dia, circulação do ar, profundidade do corpo d'água, dentre outros fatores (Chapman, 1996).

O aumento da temperatura em ambientes lacustres pode ser um indicador de mudanças na água desses ambientes. A alteração no padrão de temperatura dos reservatórios pode afetar as velocidades de reações químicas que geralmente aumentam juntamente com a evaporação, a volatilização de substâncias da água, a diminuição da solubilidade de gases na água e alterações de macronutrientes (nitrogênio e fósforo),

podendo, assim, afetar os organismos que dependem desses compostos (Chapman, 1996).

Em aplicações de modelos de hidrodinâmica e qualidade da água em reservatórios, monitoramentos dos perfis de temperatura da água em profundidade são necessários por refletirem o regime de mistura e influenciarem diretamente a distribuição de oxigênio dissolvido, nutrientes e outros componentes químicos na água (Arruda, 2014).

3.2 pH

O pH é uma variável importante na avaliação da qualidade da água, pois tem influência sobre muitos processos biológicos e químicos dentro de um corpo d'água e todos os processos associados com o suprimento e tratamento de água (Chapman, 1996).

Em águas não poluídas, este parâmetro é controlado principalmente pelo equilíbrio entre os íons de dióxido de carbono, carbonato e bicarbonato e outros compostos naturais, como os ácidos húmico e fúlvico. O equilíbrio ácido-base natural de uma massa d'água pode ser afetado por efluentes industriais e deposição atmosférica de substâncias formadoras de ácido. As variações diárias no pH podem ser causadas pelos ciclos de fotossíntese e respiração das algas em águas eutróficas (Chapman, 1996).

A Resolução CONAMA 357/05 estabelece que em águas de abastecimento, o pH deve estar entre 6 e 9, para a adequada manutenção da vida aquática e para minimizar os problemas de incrustação e corrosão das redes de distribuição. Alterações no valor de pH influem na distribuição das formas livre e ionizada de diversos compostos químicos, além de contribuir para um maior ou menor grau de solubilidade das substâncias e de definir o potencial de toxicidade de vários elementos. O pH de águas naturais se encontra entre 6,0 e 8,5, mas podem ser encontrados valores mais baixos em águas diluídas com alto conteúdo orgânico e valores mais altos em águas eutróficas (Chapman, 1996).

O pH também pode influenciar no crescimento de cada espécie vegetal, sendo que cada vegetal pode apresentar uma maior ou menor tolerância aos íons que estão dissolvidos em água (De Lima et al., 2014).

Segundo Chapman (1996), os valores de pH refletem o poder solvente da água, indicando, desse modo, suas possíveis reações químicas sobre rochas e solos. A dissolução de rochas, absorção de gases da atmosfera, oxidação da matéria orgânica e a fotossíntese são processos naturais que alteram o pH. Possíveis alterações antropogênicas decorrem do lançamento de despejos domésticos e industriais. É um parâmetro importante nas diversas etapas do tratamento de água para abastecimento e nas estações de tratamento de esgoto.

Valores de pH longe da neutralidade podem afetar os microrganismos responsáveis pelo tratamento biológico em estações de tratamento de água e para a vida aquática como um todo. Esteves (1998) diz que na maioria das águas naturais, o pH é influenciado pela concentração de íons H^+ originado da dissociação do ácido carbônico, que gera valores baixos de pH, e das reações de íons carbonato e bicarbonato com a molécula de água, que elevam os valores de pH para a faixa alcalina. Apesar de se inter-relacionarem, as variáveis físico-químicas podem ser influenciadas pelo meio externo, como a ocorrência de precipitação (Silva et al., 2008).

Carvalho et al. (2000) afirmam que com o aumento das chuvas, há maior lavagem do solo que tem como efeito uma maior diluição de compostos dissolvidos e que, em decorrência do volume e da velocidade da água, há um escoamento mais rápido. Estes processos somados podem diminuir a acidez das águas, resultando em um aumento do pH que pode se aproximar da neutralidade.

3.3 Oxigênio Dissolvido

O oxigênio é essencial para todas as formas de vida aquáticas aeróbicas. O teor de oxigênio das águas naturais varia principalmente com a temperatura, salinidade, turbulência, atividade fotossintética e pressão atmosférica. A solubilidade do oxigênio diminui à medida que a temperatura e a salinidade aumentam. Em águas doces, os

valores de oxigênio dissolvido ao nível do mar variam de 15 mg.L⁻¹ a 0°C para 8 mg.L⁻¹ a 25°C (Chapman, 1996).

Estabelecido pela Resolução CONAMA 357/05, o valor mínimo de oxigênio dissolvido para a preservação da vida aquática é de 5,0 mg.L⁻¹, mas existe uma variação na tolerância entre as diferentes espécies de animais aquáticos. Valores de oxigênio dissolvido menores que 2 mg.L⁻¹ representam a uma condição perigosa, denominado de hipoxia, ou seja, baixa concentração de oxigênio dissolvido na água (CETESB, 2021).

O oxigênio dissolvido pode ser expresso em termos de porcentagem de saturação em relação à quantidade máxima possível de ser dissolvido em uma determinada temperatura e salinidade. Variações nos teores de oxigênio dissolvido podem ocorrer sazonalmente ou até mesmo diariamente em função da temperatura e das atividades biológicas, como a fotossíntese e a respiração (Chapman, 1996).

Segundo Chapman (1996), a respiração, incluindo aquelas relacionadas aos processos de decomposição da matéria orgânica, reduz as concentrações de oxigênio dissolvido, assim como descargas de resíduos com alto teor de matéria orgânica e nutrientes, pois aumentam a atividade microbiana (respiração) durante a oxidação da matéria orgânica. Em águas paradas, podem ocorrer bolsões de altas e baixas concentrações de oxigênio dissolvido, dependendo das intensidades dos processos biológicos em cada local. Em casos graves, com concentrações de oxigênio muito reduzidas podem ocorrer condições anaeróbicas, principalmente perto da interface água-sedimento, como resultado da decomposição do material orgânico sedimentado.

A oxidação de compostos orgânicos dissolvidos, a morfometria, a temperatura da água e até mesmo uma baixa produtividade na zona eufótica pode influenciar o teor de oxigênio no hipolímnio (Nürnberg 1995 e 2004). Situações constantes de anoxia no hipolímnio indicam a existência de condições redutoras permanentes em profundidade, havendo um grande potencial para o aumento da produção de sulfeto de hidrogênio e elevados níveis de metais em solução, como ferro e manganês. Estas condições redutoras também podem liberar metil-mercúrio sequestrado no sedimento para a coluna d'água e também proporcionar um ambiente favorável a metilação do mercúrio. Com isso, a água proveniente do fundo de um hipolímnio anóxico pode transportar, caso ocorra a mistura das camadas, uma série de micropoluentes que podem inviabilizar os usos deste reservatório, já que, especialmente os metais, podem se acumular na biota (Branco et al., 2007).

A determinação das concentrações de oxigênio dissolvido é fundamental para a avaliação da qualidade da água, já que o oxigênio está envolvido ou influencia quase todos os processos químicos e biológicos que ocorrem nos corpos d'água. Concentrações baixas de oxigênio podem afetar negativamente o funcionamento e a sobrevivência das comunidades biológicas e em condições extremas podem levar a maioria dos peixes à morte. A determinação dos teores de oxigênio também pode ser usada para indicar o grau de poluição por matéria orgânica e o nível de autopurificação da água (Chapman, 1996).

A quantificação do oxigênio dissolvido em reservatórios pode ser útil para a previsão da diversidade biológica e abundância de espécies no ambiente (Nürnberg, 1995). As principais fontes de oxigênio para a água são a atmosfera e o processo de fotossíntese. Já as perdas de oxigênio ocorrem pela decomposição de matéria orgânica, transferência para a atmosfera, pela respiração de organismos aquáticos e pela oxidação de íons metálicos (Esteves, 2011). A dissolução na interface ar-água geralmente ocorre em condições de intensa circulação vertical ou em um processo lento de difusão e transporte por convecção.

3.4 Matéria Orgânica Dissolvida (MOD)

A matéria orgânica dissolvida, conhecida como MOD ou DOM (do inglês, dissolved organic matter), tem papel essencial na química e na biologia de águas naturais. Ela é caracterizada pela transformação microbiológica de resíduos vegetais e animais presentes no ambiente, onde fatores ambientais e físico-químicos exercem papel fundamental (Stumm, 1992).

A MOD constitui-se de um conjunto de substâncias provenientes da excreção, secreção e de processos da decomposição de organismos terrestres e aquáticos (Mantovani, 1996). É composta principalmente por proteínas, aminoácidos, ácidos graxos, resinas e compostos conhecidos como substâncias húmicas, e suas concentrações dependem de sua origem, das condições físicas do meio aquático, da bacia de drenagem e dos organismos decompositores presentes (Wetzel, 1975; Bianchini Jr., 1985).

No ecossistema aquático, a matéria orgânica está presente naturalmente como parte da cadeia alimentar e no processo de ciclagem de nutrientes, e pode ser encontrada nas formas dissolvida, particulada, nos sedimentos e na biota (Knapik et al., 2014).

A MO em excesso nos ecossistemas aquáticos pode ocasionar uma redução na concentração de oxigênio dissolvido e influenciar a estrutura das comunidades aquáticas, além de alterar outras características dessas águas como pH, alcalinidade e transparência (Westerhoff e Anning, 2000; Mostofa et al., 2013).

A matéria orgânica dissolvida possui fundamental importância no destino e biodisponibilidade de metais pesados em corpos aquáticos naturais. Ela interage com diferentes metais formando complexos organometálicos, tornando-os mais ou menos solúveis e, assim, influenciando sua biodisponibilidade.

A biota pode interagir com a MOD como fonte de energia ou carbono orgânico para algas e bactérias; como fator acessório de crescimento, fornecendo vitaminas, por exemplo; pode exercer efeitos tóxicos em larvas e algas; formar complexos orgânicos com elementos traço ou com poluentes sintéticos, de efeitos benéficos ou não; reduzir a radiação eletromagnética (REM) no meio aquático, prejudicando os organismos que dela necessitam (Wetzel, 1975; Witte et al., 1982), dentre outras formas de interação.

Em altas concentrações, a matéria orgânica dissolvida colorida (CDOM) filtra a penetração de luzes UV na superfície da água, o que preserva o DNA dos organismos, porém, diminui a profundidade da zona eufótica e compete contra a clorofila-a (presente no fitoplâncton) pela absorção da fração azul, regulando a produção primária (Arrigo; Brown, 1996; Bricaud; Morel; Prieur, 1981; Carder et al., 1991; Kirk, 1994). Em contrapartida provoca o fotobranqueamento da coluna d'água que consiste na perda de coloração da água devido à fotodegradação do CDOM, o que expõe os organismos às radiações nocivas (Del Vecchio e Blough, 2002).

A matéria orgânica dissolvida fluorescente (fDOM) é a fração fluorescente da MOD e fornece informações sobre dois grandes grupos de substâncias: aquelas derivadas de substâncias húmicas, ou aquelas com uma alta concentração de compostos nitrogenados, geralmente aminoácidos livres ou proteínas (Coble, 1996).

4. ÁREA DE ESTUDO

O reservatório de Ribeirão das Lajes (Barragem: Latitude: 22°42'8,40''S e Longitude: 43°52'55,47''O) encontra-se no sudeste do Brasil (Figura 3), em uma região de clima tropical entre as vertentes da Serra do Mar e os municípios de Pirai e Rio Claro. A construção do reservatório de Ribeirão das Lajes se iniciou em 1905, foi concluída em 1908 e foi feita a partir do barramento do Ribeirão das Lajes. A bacia contribuinte tem uma área de 305 km² (Lightger S/A, 2021).

O formato do reservatório é dendrítico, contendo diversos braços e ilhas, seu comprimento e largura máximos são 20 km e 5 km, respectivamente. O reservatório abrange uma área de 30 km² na cota de 415 metros, com perímetro aproximado de 230 km. O nível mínimo da água se situa na cota de 405 metros e o máximo na cota de 419 metros. A profundidade média é de 15 metros, havendo locais próximos à barragem com 40 metros e, dependendo do período do ano, esta profundidade pode chegar a 60 metros. É o maior reservatório de água doce do estado do Rio de Janeiro, com um volume útil de água armazenada de 445 hm³, com tempo de retenção médio de aproximadamente 282 dias (INEA, 2016), o que contribui para sua estratificação térmica e química durante praticamente todo o ano e desestratificação térmica nos meses mais frios (maio/junho a agosto) (Branco, et al., 2007).

A represa de Lajes merece especial atenção devido a sua significativa contribuição ao sistema de abastecimento do estado do Rio de Janeiro através da CEDAE (Companhia Estadual de Águas e Esgotos do Rio de Janeiro), sendo captados 5 m³ s⁻¹ de água para o abastecimento de 1,6 milhão de habitantes distribuídos em 6 municípios: Itaguaí, Japeri, Paracambi, Queimados, Rio de Janeiro e Seropédica (SEA e INEA, 2014) e integra um sistema de reservatórios e usinas hidroelétricas responsável por fornecer 78% de toda a energia elétrica consumida no estado do Rio de Janeiro. É considerada também uma importante interface entre os ambientes terrestre e aquático, pois se encontra cercada pela Mata Atlântica conservada, a qual, devido a sua faixa ciliar, é responsável pela manutenção de um excelente padrão de qualidade de suas águas (LIGHT, 2019) oligotróficas para mesotróficas (Guarino et al., 2005), com concentrações relativamente baixas de nitrogênio e fósforo.

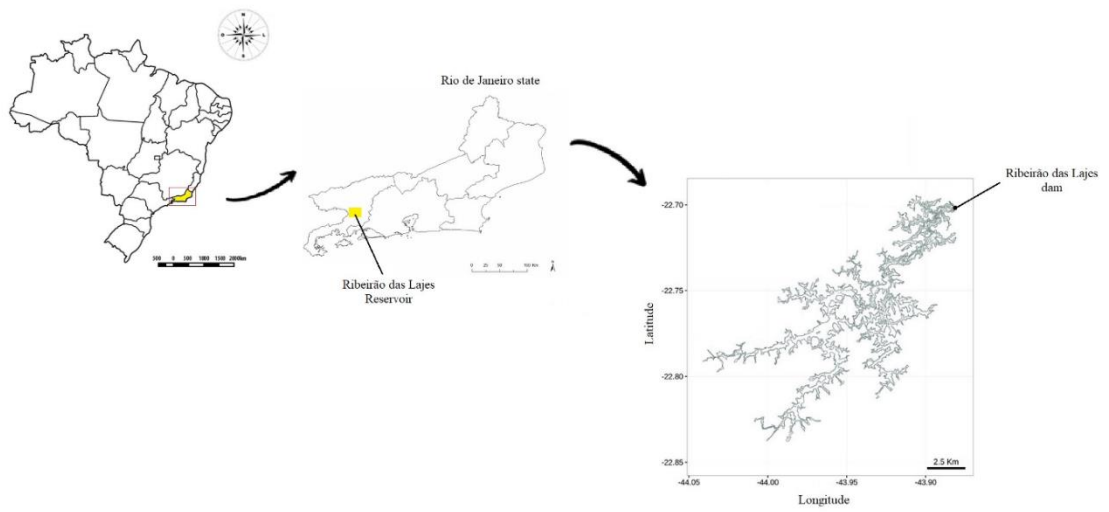
As baixas concentrações de nitrogênio e fósforo fazem com que suas águas possuam uma zona fótica de 3 metros de profundidade, podendo chegar até 5 metros em algumas épocas do ano (Duarte et al. 2002). Isto é devido ao fato de ser um ambiente que sofre muito pouco com a interferência antrópica e de fontes poluidoras (Barroso, 1989), permitindo o desenvolvimento de diversas espécies de peixes e organismos (Oliveira et al., 1986).

O principal aporte de água ocorre através do Túnel de Tocos, o qual é classificado como Classe I e seus braços e afluentes são classificados como classe especial segundo a resolução do Conselho Estadual de Recursos Hídricos nº 127 (CERHI, 2014).

As águas do Rio Piraí são barradas na represa de Tocos, situada à montante da cidade de Rio Claro (RJ), que tem um armazenamento útil de 3.200.000 m³. Esta barragem armazena água do Rio Piraí em seu reservatório, de onde parte um canal que leva as águas até as comportas, onde se inicia o túnel que conduz as águas do Rio Piraí para a represa de Lajes. O vertimento máximo é de 27 m³.s⁻¹ e o médio de 12,8 m³.s⁻¹, sendo essa vazão variável em função das condições operacionais e climáticas de acordo com a época do ano (Projeto PLANÁGUA SEMADS/GTZ, 2001).

Muitos acreditam que o reservatório de Lajes seja apenas para a produção de energia elétrica, mas ele possui múltiplos usos, como a captação para o abastecimento público, através da CEDAE, dos municípios de Rio Claro, Piraí e Barra do Piraí, abriga um clube de pesca, onde as pessoas utilizam o reservatório como fonte de lazer e pesca esportiva, e também uma área onde ocorre a piscicultura de tilápia em tanques-rede (AGEVAP, 2007).

Figura 3 - Mapa e localização geográfica do reservatório de Ribeirão das Lajes.



Fonte: Google – Adaptado pela autora, 2022.

Figura 4 - Barragem do reservatório de Ribeirão das Lajes.



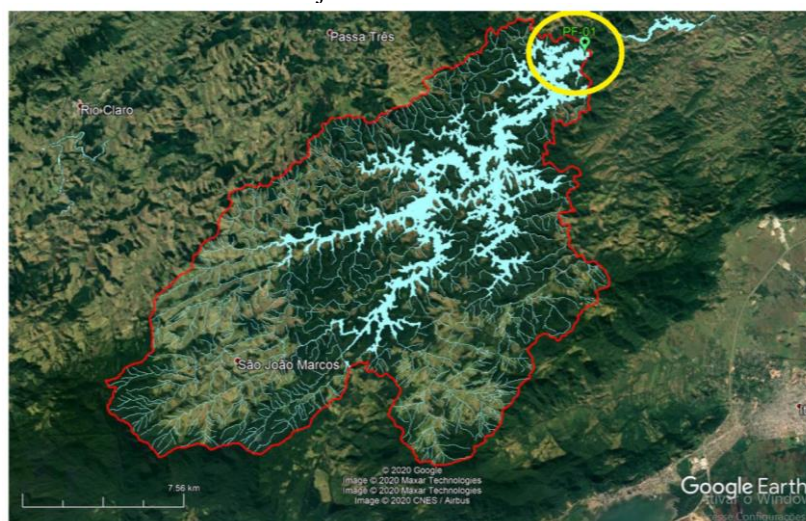
Fonte: Prefeitura de Piraí, 2016 (<https://pirai.rj.gov.br/noticias/reservatorio-de-ribeirao-das-lajes>).

5. METODOLOGIA

5.1 Ponto de Coleta de Dados

O perfilador foi situado em uma região próxima à barragem (PF-01), como pode ser observado nas Figuras 5 e 6, pois é a região mais profunda do reservatório, apresentando cerca de 40 metros de profundidade. Essa profundidade possibilita o estudo de toda a coluna d'água sendo possível observar todo o processo de estratificação.

Figura 5 - Imagem de satélite da bacia hidrográfica do reservatório de Ribeirão das Lajes.



Legenda: A linha vermelha marca o limite da bacia hidrográfica do reservatório de Lajes.

Ponto PF1 (verde) - Ponto de monitoramento (balsa de perfilagem).

Fonte: Google Earth - Adaptado por Friedrich Herms e autora, 2019.

Figura 6 - Localização do perfilador no reservatório de Ribeirão das Lajes.



Legenda: As coordenadas localizadas no mapa são referentes a localização da barragem.

Fonte: Google Earth - Adaptado por Friedrich Herms e Autora, 2019.

5.2 Coleta de Dados

Os dados utilizados no trabalho foram coletados no período de outubro de 2018 a fevereiro de 2020 e os parâmetros medidos foram temperatura, oxigênio dissolvido, pH, e matéria orgânica dissolvida fluorescente (fDOM), os quais foram medidos a cada 2 horas e a cada 2 metros de profundidade na coluna d'água.

5.2.1 Perfilador Vertical Automático

Neste estudo foram realizadas medições de parâmetros físico-químicos da água do reservatório de Ribeirão das Lajes através de um perfilador vertical automático YSI. Seu sistema de coleta de dados remoto é uma combinação de hardware e software integrados, montados em uma plataforma flutuante no corpo do reservatório.

Na plataforma ainda está instalada uma estação meteorológica de marca Vaisala, modelo W536, que permite ao sistema coletar dados de temperatura, pressão,

vento e chuva e, assim, realizar estatísticas como totais, médias, valores máximos e mínimos, em intervalos de tempo de 5 minutos.

O sistema completo (Figura 7) conta com sensores suficientes para a determinação das condições climáticas, condições da qualidade da água superficial a 1 metro de profundidade, condições da qualidade de água na coluna d'água e condições hidrodinâmicas da superfície e também de toda a coluna de água.

Todo o sistema foi montado em duas plataformas flutuantes com alimentação elétrica por baterias recarregáveis através de painéis solares.

Figura 7 - Imagem do perfilador próximo à barragem.

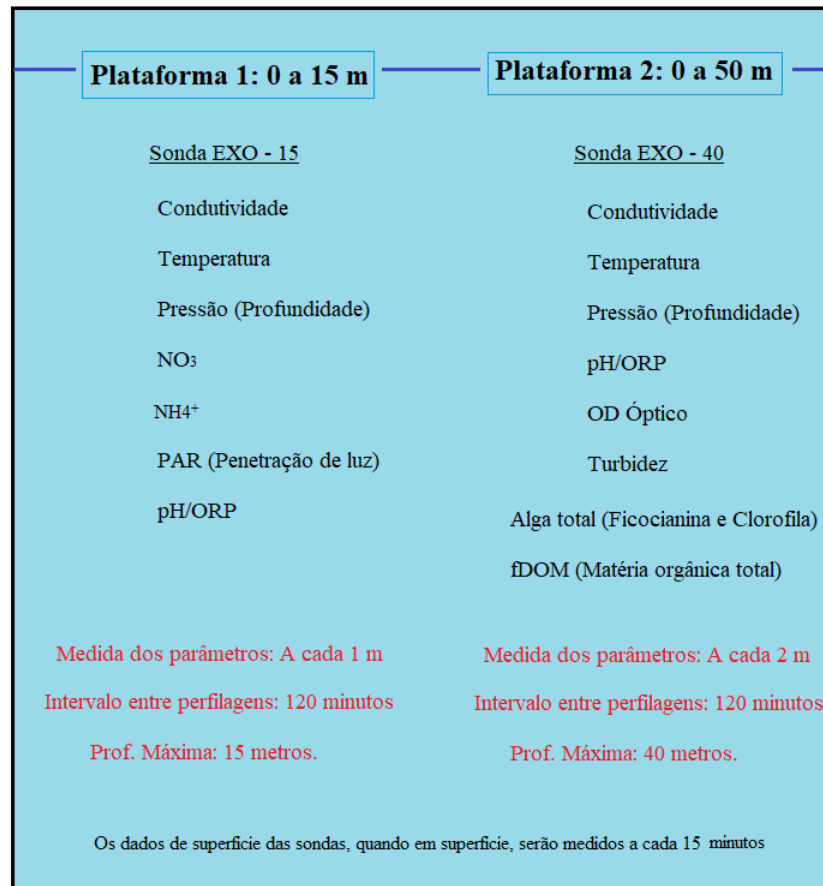


Nota: Área de coleta no reservatório de Ribeirão das Lajes.
Fonte: Friedrich Herms (Fotógrafo, 2019).

5.2.2 Parâmetros de Qualidade

Considerando que existem restrições de profundidade para alguns sensores (nitrato e amônia), foi definido que o sistema seria constituído de duas sondas, uma para perfilagem até a profundidade de 15 metros (limite de profundidade dos sensores de nitrato e amônia) denominada Exo-15 e outra para perfilagem do total da profundidade do ponto de amostragem denominada Exo-40. Cada sonda possui uma segunda sonda designada de YSI EXO-2, com sistema de limpeza automática e os seguintes sensores (Figura 8):

Figura 8 - Diagrama Esquemático do Sistema de Perfilagem Automático.



Nota: Para medição das condições de qualidade de água superficial e da coluna d'água, das condições hidrodinâmicas, das condições meteorológicas e das concentrações de gases.

Fonte: Friedrich Herms (Comunicação pessoal, 2019).

- Sonda Exo-40: temperatura, pressão (profundidade), condutividade, oxigênio dissolvido, pH/ORP, ficocianina, clorofila, turbidez e matéria orgânica dissolvida.

O sistema Profiler 1 com a sonda Exo-40 (Tabela 1) é responsável por gerenciar o sistema de perfilagem da coluna d'água até a profundidade máxima do reservatório e coleta dos dados de superfície (1 metro de profundidade) nos intervalos da perfilagem. Este sistema é responsável por um total de 5.040 dados diários da coluna d'água, perfilados a cada 2 horas, (21 parâmetros x 20 profundidades x 12 perfis por dia) e 2.016 dados da água superficial, medidos a cada 15 minutos, (21 parâmetros x 1 profundidade x 96 vezes ao dia), totalizado assim 7.056 dados por dia.

Tabela 1 - Dados fornecidos pelo Sistema Profiler 1.

Sensor	Parâmetro	Unidade	Identificação
EXO 40	Temperatura	°C	Temp_C
EXO 40	Profundidade	m	Depth_m
EXO 40	Condutividade	µS/cm	Sp_Cond_µS_cm
EXO 40	pH		pH
EXO 40	pH	mV	pH_mv
EXO 40	ORP	mV	ORP_mV
EXO 40	Concentração de O ₂	mg/L	DO_mg_L
EXO 40	% de saturação	%	DO_%_Sat
EXO 40	TDS	mg/L	TDS_mg_L
EXO 40	Salinidade		Sal
EXO 40	Turbidez	NTU	Turbidity_NTU
EXO 40	Turbidez	FNU	Turbidity_FNU
EXO 40	TSS	mg/L	TSS_mg_L
EXO 40	Clorofila	RFU	Chlorophyll_RFU
EXO 40	Clorofila	µg/L	Chlorophyll_µm_L
EXO 40	Clorofila	celulas/ml	Chlorophyll_cells_ml
EXO 40	Ficocianina	RFU	Phycocyanin_RFU
EXO 40	Ficocianina	µg/L	Phycocyanin_µg_L
EXO 40	Ficocianina	celulas/ml	Phycocyanin_cells/ml
EXO 40	fDOM	RFU	fDOM_RFU
EXO 40	fDOM	QSU	fDOM_QSU

Fonte: Friedrich Herms (Comunicação pessoal, 2019).

- Sonda Exo-15: temperatura, pressão (profundidade), condutividade, oxigênio dissolvido, pH/ORP, nitrato e amônia;

O sistema Profiler 2 com a sonda Exo-15 (Tabela 2) é responsável por gerenciar o sistema de perfilagem da coluna d'água até a profundidade 15 metros e coleta dos dados de superfície (1 metro de profundidade) nos intervalos da perfilagem. Este sistema é responsável por um total de 3.060 dados diários da coluna d'água, perfilados a cada 2 horas, (17 parâmetros x 15 profundidades x 12 perfis por dia) e 1.632 dados da água superficial, medidos a cada 15 minutos, (17 parâmetros x 1 profundidade x 96 vezes ao dia), totalizado assim 4.692 dados por dia.

Tabela 2 - Dados fornecidos pelo Sistema Profiler 2.

Sensor	Parâmetro	Unidade	Identificação
EXO 15	Temperatura	°C	Temp_C
EXO 15	Profundidade	m	Depth_m
EXO 15	Condutividade	µS/cm	Sp_Cond_µS_cm
EXO 15	pH		pH
EXO 15	pH	mV	pH_mv
EXO 15	ORP	mV	ORP_mv
EXO 15	Concentração de O ₂	mg/L	DO_mg_L
EXO 15	% de saturação	%	DO_%_Sat
EXO 15	TDS	mg/L	TDS_mg_L
EXO 15	Salinidade		Sal
EXO 15	NH ₃	mg/L	NH3_mg_L
EXO 15	NH ₄	mg/L	NH4-N_mg_L
EXO 15	NH ₄	mV	NH4-N_mv
EXO 15	NO ₃	mg/L	NO3-N_mg_L
EXO 15	NO ₃	mV	NO3-N_mv
EXO 15	PAR	µmol/seg/m ²	PARChannel_1_down_µmol*s-1*m-2
EXO 15	PAR	µmol/seg/m ²	PARChannel2_up_µmol*s-1*m-2

Fonte: Friedrich Herms (Comunicação pessoal, 2019).

Os sensores utilizados neste trabalho e sua forma de medição são descritos a seguir:

A profundidade da água é estimada a partir de uma medida de tensão. Um transdutor de medida de tensão mede a pressão com um lado do transdutor exposto à água e o outro lado à vácuo. Calcula-se a profundidade a partir da pressão exercida pela coluna de água menos a pressão atmosférica. Fatores que influenciam a medição de profundidade incluem pressão barométrica, densidade da água e temperatura. A calibração na atmosfera “zera” o sensor em relação a pressão barométrica local.

As medidas de temperatura são realizadas através de um termistor, que é um semicondutor sensível à temperatura e altamente estável. A resistência do termistor muda com a temperatura. A resistência medida é então convertida em temperatura usando um algoritmo. O sensor de temperatura recebe uma calibração úmida rastreável NIST, com precisão de 0,01 °C.

A medida de pH é realizada com dois eletrodos combinados na mesma sonda, um para íons de hidrogênio e um como referência. O sensor é uma lâmpada de vidro cheia com uma solução de pH estável (geralmente 7) e o interior da superfície do vidro sofre uma ligação constante de íons H^+ . A parte externa do bulbo é exposta à amostra, onde a concentração de íons de hidrogênio varia. O diferencial do potencial elétrico resultante é lido pelo medidor versus o potencial estável da referência.

A medida do oxigênio dissolvido é baseado no conceito de que o mesmo extingue tanto a intensidade quanto a vida útil da luminescência associada a um corante químico cuidadosamente escolhido. O sensor EXO opera através do brilho de uma luz azul do comprimento de onda apropriado neste corante luminescente que é imobilizado em uma matriz e formado em um disco. A luz azul faz com que o corante imobilizado se acenda e o tempo de vida desta luminescência de corante é medido através de um fotodiodo na sonda. Para aumentar a precisão e estabilidade da técnica, o corante também é irradiado com luz vermelha durante parte do ciclo de medição para atuar como referência na determinação da vida útil da luminescência. Quando não há oxigênio presente, a vida útil do sinal é máxima. À medida que o oxigênio é introduzido na superfície da membrana do sensor, a vida útil fica mais curta. Portanto, o tempo de vida da luminescência é inversamente proporcional a quantidade de oxigênio presente.

Para a medição do fDOM é utilizado o sulfato de quinina, que, em solução ácida, fluoresce de forma semelhante à matéria orgânica dissolvida. As unidades de fDOM são unidades de sulfato de quinina (QSUs) onde $1 \text{ QSU} = 1 \text{ ppb}$ de sulfato de quinina e, portanto, o sulfato de quinina é realmente um substituto indireto para o

parâmetro fDOM desejado. O sensor EXO fDOM mostra linearidade virtualmente perfeita ($R^2=1,0000$) na diluição em série de uma solução incolor de sulfato de quinina. No entanto, na diluição em série de amostras de campo de água, o sensor mostra alguma sublinearidade. O ponto de sublinearidade em amostras de campo varia e é afetado pela absorbância UV do DOM na água.

5.2.3 Parâmetros Meteorológicos

Procurando minimizar a manutenção necessária em estações meteorológicas buscou-se a definição de um sistema de medição sem partes móveis. Nesse sentido, adotou-se a estação WXT-530 que fornece seis dos parâmetros meteorológicos mais importantes: pressão do ar, temperatura, umidade, precipitação, velocidade do vento e direção (Figura 9). Estes parâmetros são medidos continuamente a cada 5 minutos.

Para medir o vento, os sensores ultrassônicos são aplicados para determinar a velocidade e a direção do vento horizontal.

As medições de umidade, pressão barométrica e temperatura são combinadas usando medições capacitivas para cada parâmetro. A precipitação líquida é medida com o sensor acústico de impacto.

Figura 9 - Sensor meteorológico da série WXT-530.



Fonte: Vaisala, 2020.

O sistema de meteorologia (Tabela 3) é responsável por gerenciar toda a aquisição de dados da estação meteorológica. Este sistema é responsável por um total de 2.016 dados diários, medidos a cada 5 minutos (7 parâmetros x 12 medidas por hora x 24 horas).

Tabela 3 - Dados fornecidos pelo Sistema Meteorologia.

Sensor	Parâmetro	Unidade
Meteorologia	Temperatura	°C
Meteorologia	Velocidade abs	cm/s
Meteorologia	Direção	Deg.M
Meteorologia	Pluviosidade	mm

Fonte: Friedrich Herms (Comunicação pessoal, 2019).

5.2.4 Transmissão e Recepção dos Dados

A configuração do sistema de transmissão de dados também foi idealizada de forma que todo o processo se desse de forma automatizada. Para isso foi concebido um sistema de comunicação baseado no armazenamento de dados em pequenas centrais de dados, chamadas de dataloggers, interligados a sistemas de rádios de comunicação de dados.

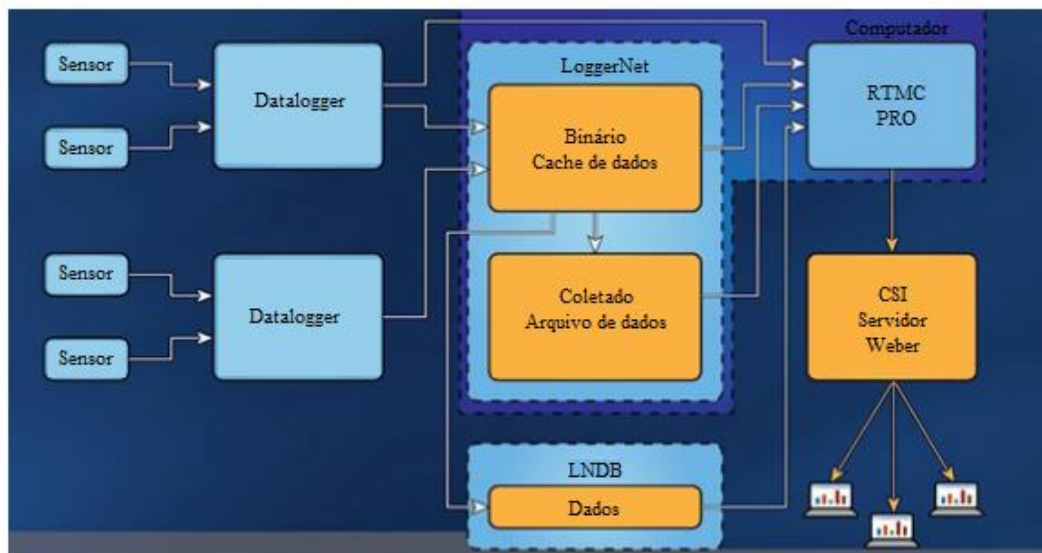
Em terra firme, foi montado um sistema de comunicação de dados rádio/internet de forma a possibilitar a comunicação do programa de coleta de dados que faz automaticamente a comunicação com os sistemas Profiler 1, Profiler 2 e Meteorologia, sucessivamente a cada 5 minutos de intervalo, armazenando os dados em arquivos de dados tipo “.dat” e em seguida os transforma para um banco de dados tipo SQL.

Todo o sistema em terra está ligado a sistemas de nobreaks, possibilitando o seu funcionamento sem interrupções por pequenos períodos de falta de energia elétrica (máximo de 2 horas). Caso a falta de energia permaneça por mais tempo, todos os dados permanecem armazenados nos dataloggers por até cerca de 20 dias e são

automaticamente transmitidos para o sistema de dados logo assim que a energia elétrica for restabelecida.

Todo o sistema é automatizado através de diversos softwares fornecidos pela Campbell Scientific, fornecedora dos dataloggers e pode ser resumida no diagrama da Figura 10, que conta com o programa de transmissão - LoggerNet, de construção do banco de dados SQL (LNDB) e com o software de controle dos dados de monitoramento em tempo real (RTMC). Este sistema conta ainda com a ferramenta de publicação de imagens no sistema WEB de internet através de um servidor do tipo CSI.

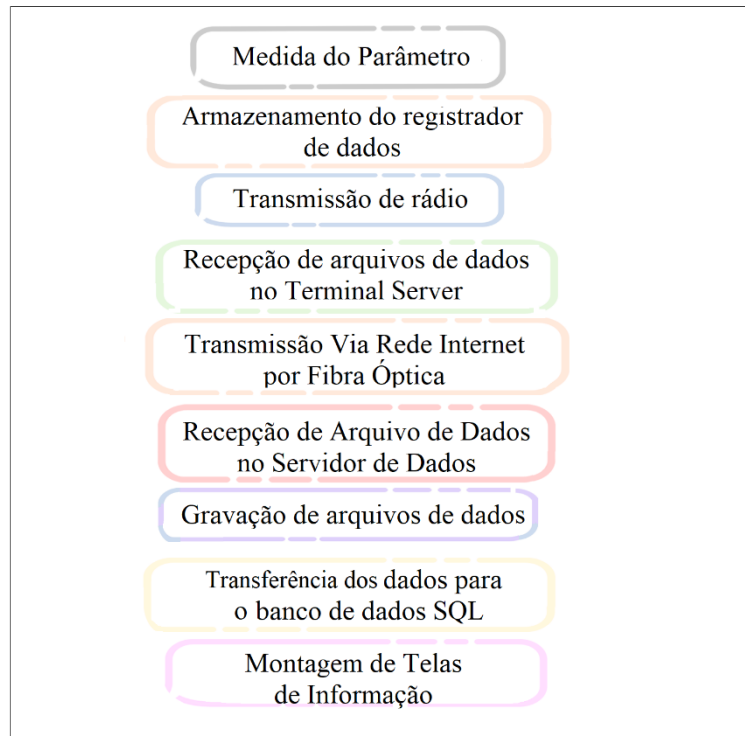
Figura 10 - Esquema de aquisição de dados.



Fonte: Friedrich Herms (Comunicação pessoal, 2019).

Este processo pode ser apresentado de forma resumida na Figura 11 abaixo, onde estão as etapas da sequência de ações necessárias para consolidação dos dados ambientais obtidos pelo sistema.

Figura 11 - Etapas de compilação automática dos dados coletados pelo sistema automático de perfilagem.



Fonte: Friedrich Herms (Comunicação pessoal, 2019).

A escolha dos sensores para a determinação da qualidade da água, tanto em superfície quanto durante a perfilagem da coluna d'água, foi feita de modo a se obter uma resposta de alta precisão, alta acuracidade e baixo tempo de resposta, e são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Características dos sensores de qualidade de água utilizados nas sondas do sistema de monitoramento automático.

SENSOR	FAIXA	ACURACIDADE	RESPOSTA	RESOLUÇÃO
CONDUTIVIDADE	0 a 200 mS/cm	± 0,0001 mS/cm	< 2 segundos	0,01 mS/cm
OXIGÊNIO DISSOLVIDO	0 a 500% de saturação 0 a 50 mg/L	± 1% de saturação ± 0,1 mg/L	< 5 segundos	0,1% de saturação 0,01 mg/L
POTENCIAL HIDROGÊNICO	0 a 14 unidades	± 0,1 unidades	< 3 segundos	0,01 unidades
PROFUNDIDADE	0 a 100 m	± 0,0004 m	< 2 segundos	0,001 m
TEMPERATURA	- 5 a 50 °C	-5 a 35 °C = ± 0,01 °C 35 a 50 °C = ± 0,05 °C	< 1 segundo	0,001 °C
MATÉRIA ORGÂNICA (fDOM)	0 a 300 ppb	Linearidade de R ² = 0,999	< 2 segundos	0,01 ppb

Fonte: Friedrich Herms (Comunicação pessoal, 2019).

Com os parâmetros acima definidos, foi estabelecida uma condição de serem obtidos dados que permitiria o estudo do comportamento físico do reservatório (estabilidade e instabilidade) bem como o comportamento físico-químico da coluna d'água.

5.3 Estatística

Os dados foram submetidos ao teste de Shapiro-Wilk com o objetivo de verificar a normalidade destes. Uma vez feita essa verificação, onde os dados foram considerados não normais, utilizou-se a estatística não paramétrica para testar algumas hipóteses.

O teste de Mann-Whitney foi aplicado quando o objetivo foi comparar períodos diferentes de coleta dos dados: verão e inverno. Já o teste de Kuskal-Wallis foi aplicado para identificar variações entre as profundidades e meses do ano.

E para completar foi feita a correlação de Spearman entre as variáveis com o objetivo de complementar a interpretação e avaliar possíveis processos.

5.4 Processamento dos dados

Após todo o processo de coleta de dados explicado no tópico anterior, os dados armazenados no banco de dados foram extraídos para um arquivo texto separado por vírgulas (.csv), onde foram escolhidos os parâmetros com os quais se queria trabalhar.

Este arquivo foi aberto em um programa de Bloco de Notas, onde os valores se encontraram dispostos em forma de tabela com cabeçalho de características do DataLogger de acordo com os parâmetros coletados. Esses valores foram armazenados no formato americano e por isso tiveram que ser ajustados para o sistema internacional.

Na segunda etapa do processamento dos dados, os dados foram importados para uma planilha e para isto foi utilizado o Microsoft Office Excel, e assim, os dados puderam ser trabalhados.

Para conhecimento da ocorrência de frentes frias sobre o Rio de Janeiro ou região sudeste, aqui foi utilizado o boletim técnico do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - <http://tempo.cptec.inpe.br/boletimtecnico/pt>) em toda a discussão das oscilações de curto período para o reconhecimento dos processos atmosféricos presentes durante os períodos utilizados para estudo.

A sequência de procedimentos de tratamento dos dados foi:

- a) Ordenamento dos dados por profundidade e cronologia;
- b) Ordenamento de dados de acordo com o número da perfilagem;
- c) Os dados foram verificados e conferidos para que não ocorresse nenhuma falha e divergência, a fim de se eliminar descontinuidades de perfilagem e erros de gravação de dados e de medição;
- d) Após a ordenação dos dados, foram realizadas rotinas para os cálculos da Estabilidade Relativa da Coluna D'água (RWCS) (1) segundo Padisák et al. (2003), através da Equação de Krambeck (2) (Rodríguez-Rodríguez et al., 2004 apud Xu et al., 2011), em relação às diferentes profundidades;
- e) A partir dos cálculos de RWCS, foram elaborados os gráficos dos perfis em função das profundidades;
- f) Através dos dados coletados também foram calculadas outras duas formas de estudar a estabilidade, através da Resistência Térmica Relativa

(RTR) como é mostrado na equação (4) e da Estabilidade de Schmidt segundo Idso (1973), como é mostrado na equação (5);

g) A partir do cálculo da RTR, foram elaborados gráficos em relação as profundidades no período de estudo para mostrar em que períodos a coluna d'água do reservatório se manteve estável e instável;

h) A partir do cálculo da Estabilidade de Schmidt, foi elaborado um gráfico em relação ao período de estudo para mostrar em que períodos a coluna d'água do reservatório se manteve estável e instável;

i) Através dos gráficos de RTR e de Estabilidade de Schmidt, foi realizada uma discussão com o resultado de estabilidade obtido através do cálculo de RWCS;

j) Um conjunto de dados foi submetido ao teste de Shapiro-Wilk com o objetivo de verificar a normalidade dos dados;

k) O teste de Mann-Whitney foi aplicado para comparar os diferentes períodos de coleta dos dados: verão e inverno. Já o teste de Kuskal-Wallis foi aplicado para identificar variações entre as profundidades e meses do ano;

l) Foi realizada a correlação de Spearman entre as variáveis com o objetivo de complementar a interpretação e verificação de processos associados.

m) A partir dos gráficos de estabilidade (RWCS), foram separados períodos de curta duração das oscilações de estabilidade térmica de acordo com a observação de ocorrência de fatores como entradas de frentes frias, períodos de seca, períodos de chuva e etc. através da utilização de portais meteorológicos como o site do INMET e portais de informação;

n) Análise das oscilações de curta duração e discussão das suas prováveis causas;

o) Análise do comportamento do oxigênio e do pH em relação às oscilações de curto período no reservatório;

p) Análise do comportamento da matéria orgânica em relação às oscilações de curto período no reservatório.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

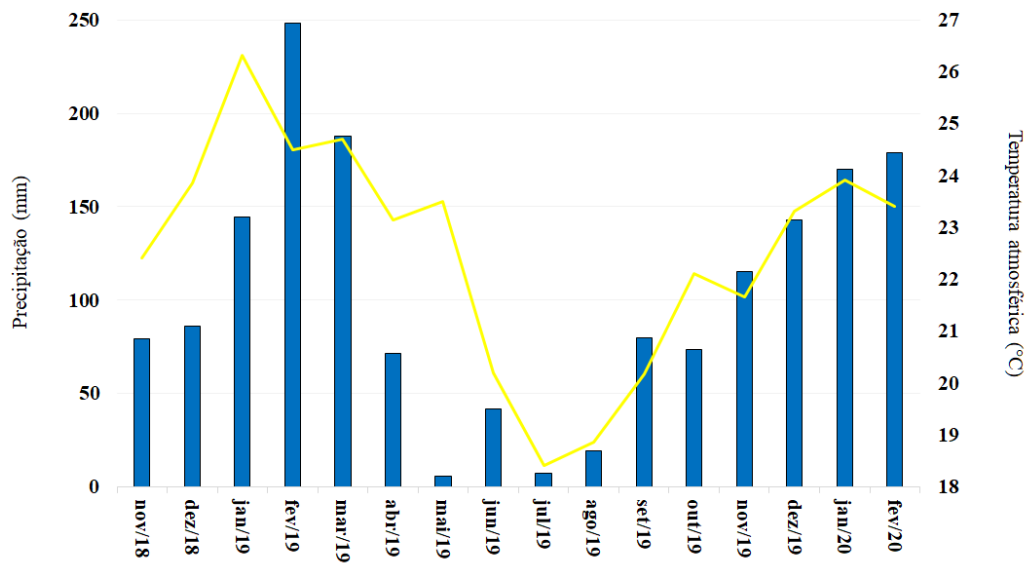
6.1 Aspectos climáticos e Temperatura da Água

Os dados aqui utilizados foram medidos e coletados diretamente na coluna d'água de Lajes através da estação meteorológica acoplada ao perfilador na coluna d'água de Ribeirão das Lajes.

A Figura 12 exibe o perfil mensal de precipitação (mm) e temperatura atmosférica (°C) durante o período de estudo. No reservatório de Ribeirão das Lajes há períodos bem distintos de chuva e de seca. Os maiores valores de precipitação foram registrados nos meses de janeiro a março de 2019, com um total 580,7 mm de chuva acumulados nesses meses e os menores valores foram encontrados nos meses de maio a agosto, com um total de 74,3 mm de chuva acumulados, o que demonstra um padrão com características sazonais bem demarcadas. O mês com maior precipitação foi fevereiro de 2019 com 248,2 mm, seguido do mês de março de 2019 com 187,9 mm e o mês de menor precipitação foi o mês de maio com 5,7 mm de precipitação durante todos os seus 31 dias, seguido do mês de julho com 7,1 mm mensais.

Através da Figura 12, percebe-se que a temperatura atmosférica média mais baixa ocorreu no mês de julho, 18,42 °C. Janeiro de 2019 foi o mês com a temperatura média mensal mais elevada, igual a 26,31 °C. A temperatura do ar apresentou uma média de 20,3 °C durante o período de seca (meses de junho a agosto) e de 25,2 °C durante o período de chuva (meses de janeiro a março).

Figura 12 - Climograma de Ribeirão das Lajes – RJ no período de novembro de 2018 a fevereiro de 2020.



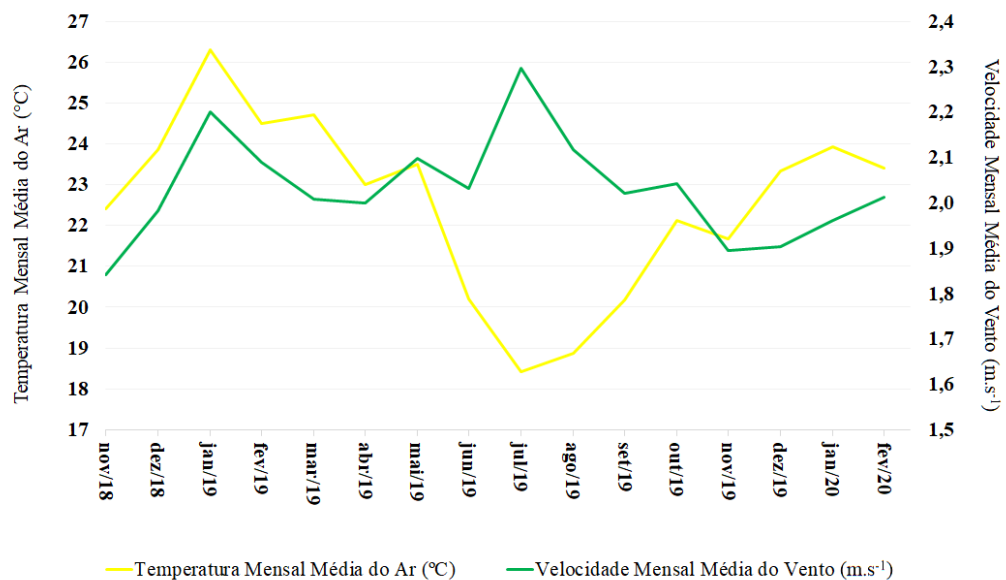
Fonte: A autora, 2022.

A Figura 13 abaixo exemplifica um gráfico da temperatura média mensal do ar ($^{\circ}\text{C}$) x velocidade média mensal do vento ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) no reservatório de Lajes. Como pode-se observar, a temperatura atmosférica em Lajes se mantém acima dos 23°C por todo o período de verão, tanto em 2018/2019 quanto em 2019/2020, chegando a $26,3^{\circ}\text{C}$ em janeiro de 2019 e a $23,9^{\circ}\text{C}$ em janeiro de 2020. Porém, quando focamos em olhar o que ocorre com a temperatura nos meses de inverno, observamos que esta temperatura decai bastante a partir do mês de maio de 2019 e se mantém em queda até julho de 2019, onde é obtido o valor de $18,4^{\circ}\text{C}$. A partir deste mês, a temperatura começa a aumentar e volta a se encontrar maior que 20°C em outubro de 2019 ($22,1^{\circ}\text{C}$).

Esse decaimento de temperatura nos meses de inverno tem relação com as entradas de frentes fria que ocorrem neste período (este ponto será discutido mais detalhadamente adiante) e, conseqüentemente, às maiores forças dos ventos, como também pode ser observado no gráfico da Figura 13. A partir de junho a julho de 2019, a velocidade do vento aumentou, chegando a $2,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ em julho, o que coincide com o mês de menor temperatura do período. Durante os períodos de calor mais intenso, o vento se encontrou um pouco mais fraco, principalmente no verão de 2020 ($2,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ em janeiro de 2020), porém, não são suficientes para causarem uma diminuição nas temperaturas em Lajes.

Também observa-se a pequena velocidade dos ventos que agem nas águas do reservatório. O que é considerado um vento leve (aragem) de acordo com a escala da força dos ventos de Beaufort. A fraca ação dos ventos é apontada como fator importante nos fenômenos de mistura das camadas d'água do reservatório, favorecendo os processos de estratificação térmica e química. Isso ocorre porque o reservatório de Ribeirão das Lajes se encontra relativamente protegido da ação dos ventos, pois se encontra localizado entre morros arborizados da Serra do Mar, os quais minimizam a influência dos ventos sobre suas águas.

Figura 13 – Variação da temperatura do ar (°C) versus velocidade do vento (m.s⁻¹) no reservatório de Ribeirão das Lajes no período de novembro de 2018 a fevereiro de 2020.



Fonte: A autora, 2022.

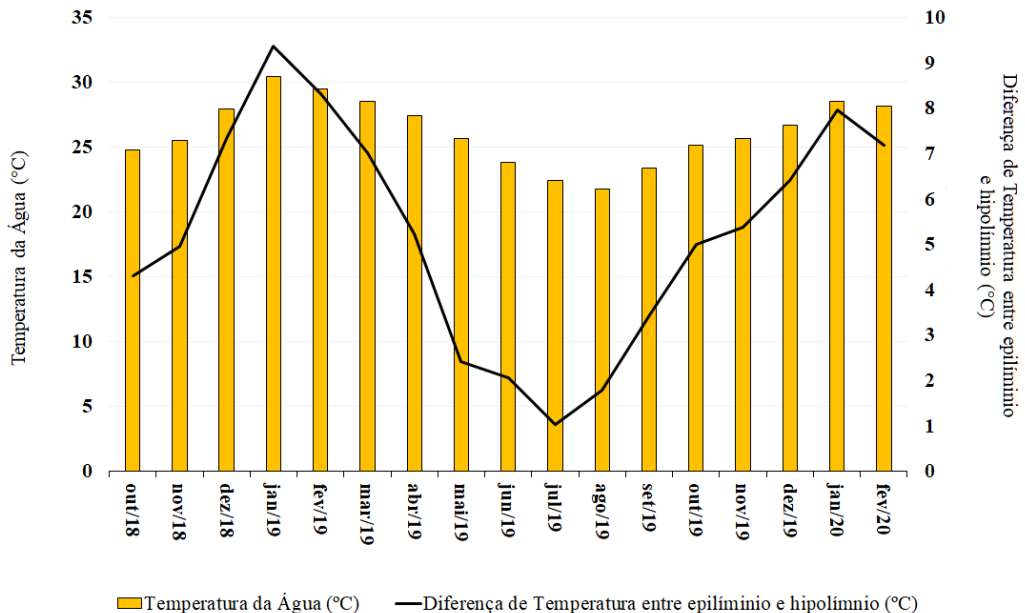
Os perfis de temperatura da água dos reservatórios variam sazonalmente, com condições frias no inverno e condições diurnas quentes termicamente estratificadas no verão. O gráfico da Figura 14 foi feito a partir das temperaturas médias mensais calculadas para toda a extensão da coluna d'água do reservatório, ou seja, desde a temperatura da camada superficial até a temperatura da última camada estudada (37 m) e a linha corresponde a variação de diferença de temperatura (°C) entre a camada de 1 metro e a camada de 37 metros.

A menor média mensal de temperatura da coluna d'água foi encontrada em agosto e setembro, 21,06 °C, enquanto as maiores temperaturas persistiram durante

grande parte do verão, com a maior temperatura média mensal das águas sendo encontrada no outono, em abril de 2019, com 25,03 °C.

A partir deste gráfico pode-se observar uma significativa diferença de temperatura (°C) entre a superfície e o fundo significativamente maior durante a estação chuvosa, alcançando seus maiores valores no mês de janeiro e fevereiro de 2019, respectivamente iguais a 9,37 °C e 8,32 °C. Também foi possível observar que a partir do mês de maio começa a ocorrer o resfriamento das camadas superficiais e uma consequente diminuição da diferença de temperatura entre a superfície e o fundo da coluna d'água, desfazendo o gradiente de densidade formado durante o período de chuva. As diferenças de temperatura entre as camadas de superfície e de fundo se encontraram em 2,42 °C, 2,07 °C, 1,04 °C e 1,78 °C nos meses de maio a agosto, respectivamente.

Figura 14 – Variação da temperatura média mensal da água (°C) em toda a extensão da coluna d'água versus a diferença de temperatura da água (°C) entre a superfície (1 m) e o fundo (37 m) no reservatório de Ribeirão das Lajes durante o período de outubro de 2018 a fevereiro de 2020.



Fonte: A autora, 2022.

Segundo Lewis (1996b), Dodds (2002) e Kalff (2002), devido às altas temperaturas da água em regiões tropicais, o gradiente térmico não precisa ser tão elevado como de regiões temperadas, por exemplo, para que haja a existência de uma

forte estabilidade da coluna d'água. Segundo Meis e Tundisi (1986), basta apenas uma diferença de temperatura entre a superfície e o fundo de aproximadamente 2 °C para que seja possível o estabelecimento de uma estratificação estável. Portanto, os valores de diferença de temperatura (°C) encontrados aqui neste trabalho nos meses de inverno (menores que 2 °C) indicam uma coluna d'água com fraca estabilidade e consequente tendência à mistura.

Kellner et al. (2009) citam que para regiões de clima tropical, com temperaturas da água superiores a 25 °C, a estratificação térmica pode ocorrer com gradientes de temperatura menores que 0,6 °C.m⁻¹. Já para Henry et al. (1997), diferenças de 0,3 °C.m⁻¹ são suficientes para promover a separação das massas d'água, fazendo com que se desenvolvam microestratificações na coluna.

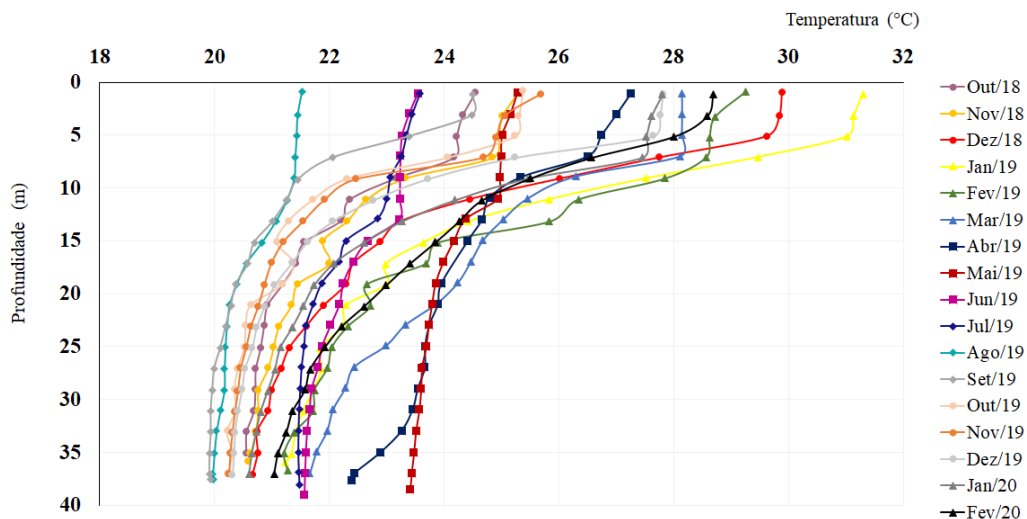
O efeito das condições climáticas nas características limnológicas de reservatórios tem sido abordado em muitos estudos ecológicos, se mostrando de grande importância para funcionamento desses sistemas (Talling, 1966; Imberger, 1985; Tundisi et al., 2004). Sua influência sazonal no padrão de estratificação da coluna d'água na área da barragem do reservatório de Ribeirão das Lajes também foi tópico de estudo em outros trabalhos, como, por exemplo, em Branco et al. (2009), onde análises semelhantes demonstraram a existência de estratificação térmica durante a maior parte do ano e uma tendência a mistura nos meses de inverno atribuída ao resfriamento das camadas superficiais devido às baixas temperaturas observadas neste período, o que é capaz de favorecer a circulação quase completa da coluna d'água. O que não foi observado neste trabalho, visto que não houve mistura da coluna d'água em nenhum período do estudo, como será mostrado e comentado mais adiante.

A Figura 15 é um gráfico da temperatura média mensal ao longo da coluna d'água durante o período de estudo. Nele, podemos notar a presença de uma termoclina em torno dos 5 – 7 metros de profundidade, e, logo após, uma diminuição gradativa da temperatura em direção à base do hipolimnion. Em janeiro de 2019, por exemplo, se observou 31,3 °C em superfície e 21,3 °C em torno dos 35 metros de profundidade. Já em agosto de 2019, foi medida a temperatura de 21,5 °C em superfície e 19,9 °C nos 35 metros de profundidade, o que ressalta a diferença de temperatura entre a superfície e o fundo, como mostrado nos valores de diferença de temperatura (°C) da Figura anterior.

A zona de mistura apresentou um padrão constante durante os meses de estratificação, se mantendo na maior parte do tempo em uma profundidade em torno dos

7 metros (Figura 15). Durante o período de desestratificação da coluna d'água é possível observar um aprofundamento da zona de mistura até os 10 - 15 metros de profundidade. De acordo com Kalff (2002), o comportamento apresentado pela zona de mistura durante o período de estudo reflete as condições de estabilidade da coluna d'água. No lago de Constança, situado na fronteira da Alemanha com a França, esse autor observou uma redução da profundidade da zona de mistura durante o período de estratificação, associada a uma maior disponibilidade de luz e um aumento na temperatura da água, elevando a produtividade primária do lago.

Figura 15 – Variação da temperatura média mensal da água (°C) em relação às diferentes profundidades na coluna d'água do reservatório de Ribeirão das Lajes durante o período de outubro de 2018 a fevereiro de 2020.



Fonte: A autora, 2022.

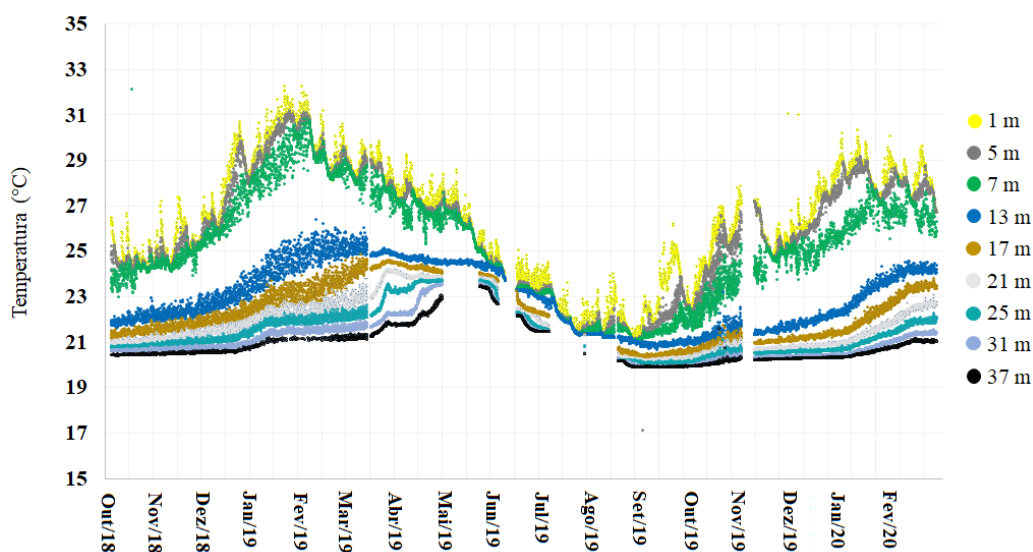
A Figura 16 abaixo mostra a diferença de temperatura em função das profundidades na coluna d'água do reservatório de Ribeirão das Lajes. Como pode-se observar, as temperaturas mais altas encontram-se nas camadas de 1, 5 e 7 metros, as quais se encontram na zona homogênea na coluna d'água. A partir dos 7 metros há um decréscimo de temperatura que pode ser notado pelo espaço em branco no gráfico entre a camada de 7 metros e a de 13 metros, principalmente se observarmos nos meses referentes ao verão, onde, em janeiro de 2019 a temperatura a 7 metros de profundidade era 27,62 °C e já se encontrava em 24,15 °C, mais de 3 °C a menos em 13 metros. O mesmo ocorreu no ano de 2020. Esse espaço entre as camadas corresponde a termoclina. Essa diferença foi comprovada pelo teste de Kruskal-Wallis ($p = 0,000$)

onde observa-se variação da temperatura medida entre as profundidades de coleta. Não há diferença significativa das temperaturas determinadas até 13 m de profundidade, abaixo dessa profundidade os valores de temperatura já são diferentes significativamente.

Também foi possível observar que a partir do mês de maio começou a ocorrer o resfriamento das camadas superficiais e uma conseqüente diminuição da diferença de temperatura entre a superfície e o fundo, desfazendo o gradiente de densidade formado durante o período de verão.

Como pode ser observado na Figura 16, abaixo, nos meses de inverno há um aumento nos valores de temperatura do hipolímnio e isto ocorre devido a difusão turbulenta dentro desta camada de água.

Figura 16 – Variação da temperatura da água (°C) em relação às diferentes camadas da coluna d'água do reservatório de Ribeirão das Lajes durante o período de outubro de 2018 a fevereiro de 2020.



Fonte: A autora, 2022.

Segundo Kalff (2002) e Esteves (2011), mais da metade da energia provinda da radiação solar é absorvida nos primeiros metros da coluna d'água, como pôde ser observado nas Figuras 25 e 26, e, caso não haja a ação turbulenta do vento, o perfil de temperatura apresenta um declínio exponencial com o aumento da profundidade, como foi observado na Figura 26.

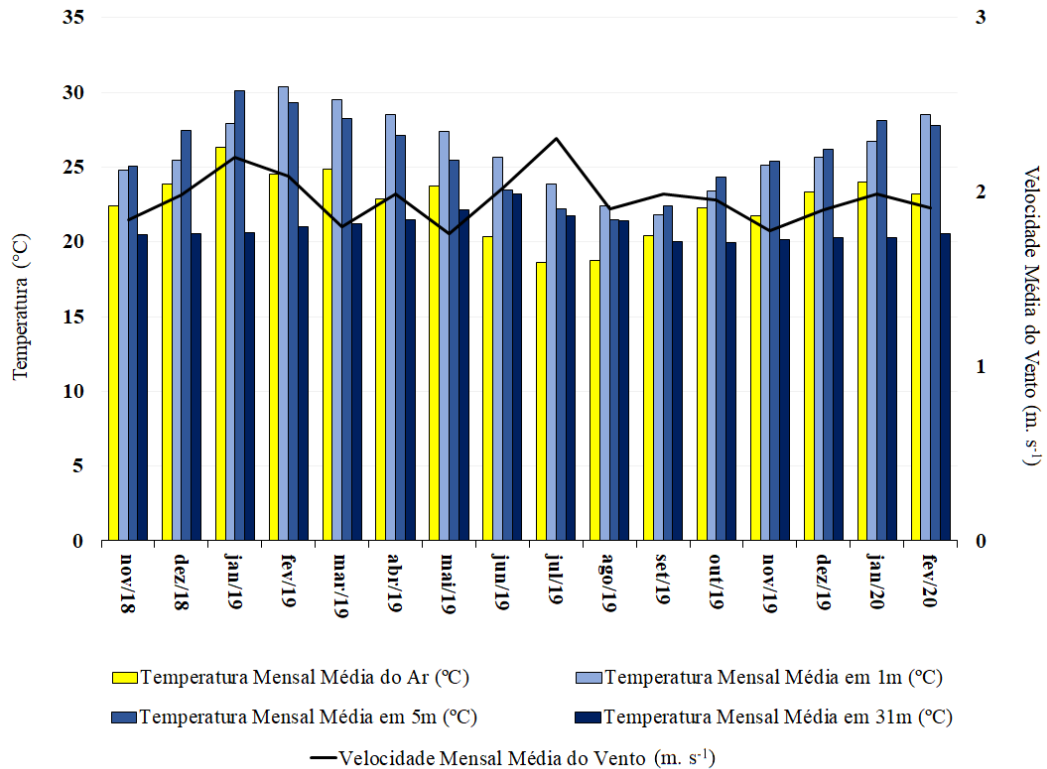
O gráfico da Figura 17 mostra a relação entre as temperaturas médias mensais do ar, e da água nas camadas de 1, 5 e 31 metros e a velocidade média do vento. Utilizamos essas profundidades para mostrar o impacto que as mudanças atmosféricas tem nos primeiros metros da coluna d'água e como o hipolímnio (31 metros) não sofre com essas mudanças.

Como esta figura evidencia, as camadas de 1 e 5 metros seguem o padrão de aquecimento e resfriamento da temperatura atmosférica, com temperaturas mais altas nos meses de verão, entre 25 e 30 °C, e temperaturas mais baixas no inverno, entre 20 e 25 °C. Já a camada de 31 metros não segue esse padrão. Podemos observar que estas águas não possuem grande variação de temperatura entre a estação quente e a fria, se encontrando com temperaturas em torno de 20 a 22 °C, tanto no verão quanto no inverno. Essa camada possui variação de temperatura devido a propagação de calor por condução, onde o calor é passado das camadas do epilímnio para as maiores profundidades, principalmente nos meses de inverno, onde há um aprofundamento da termoclina. Este fato pode ser observado nos lagos Alpachersee e Greifensee, localizados na Suíça, com profundidades de 35 e 32 metros respectivamente (Livingstone e Lotter, 1998).

O vento em Lajes não atua fortemente sobre toda a região do reservatório devido a este se encontrar rodeado por altas montanhas e pela mata atlântica, o que faz com que este influencie somente os primeiros metros da coluna d'água. Este vento possuiu velocidade média de $2,3 \text{ m.s}^{-1}$ nos meses de inverno com, enquanto no verão os ventos se encontram com variações, mas sempre em torno de 1,7 e $2,0 \text{ m.s}^{-1}$. Quando há maior velocidade dos ventos, há redução da temperatura atmosférica e, conseqüentemente, diminuição da temperatura da água do epilímnio, como podemos observar nos meses de julho e agosto, onde as temperaturas da água do epilímnio são bem parecidas com as temperaturas encontradas no hipolímnio.

A resistência à mistura induzida pelo vento, resultante da rápida absorção de calor primaveril e a barreira térmica acentuada entre o epilímnio raso e o hipolímnio, favorece o desenvolvimento do hipolímnio anóxico (Bowling e Salonen, 1990).

Figura 17: Variação das temperaturas médias mensais (°C) da água em 1, 5 e 31 metros de profundidade versus a temperatura mensal média do ar (°C) e a velocidade mensal média do vento (m. s⁻¹) no reservatório de Ribeirão das Lajes durante o período de novembro de 2018 a fevereiro de 2020.



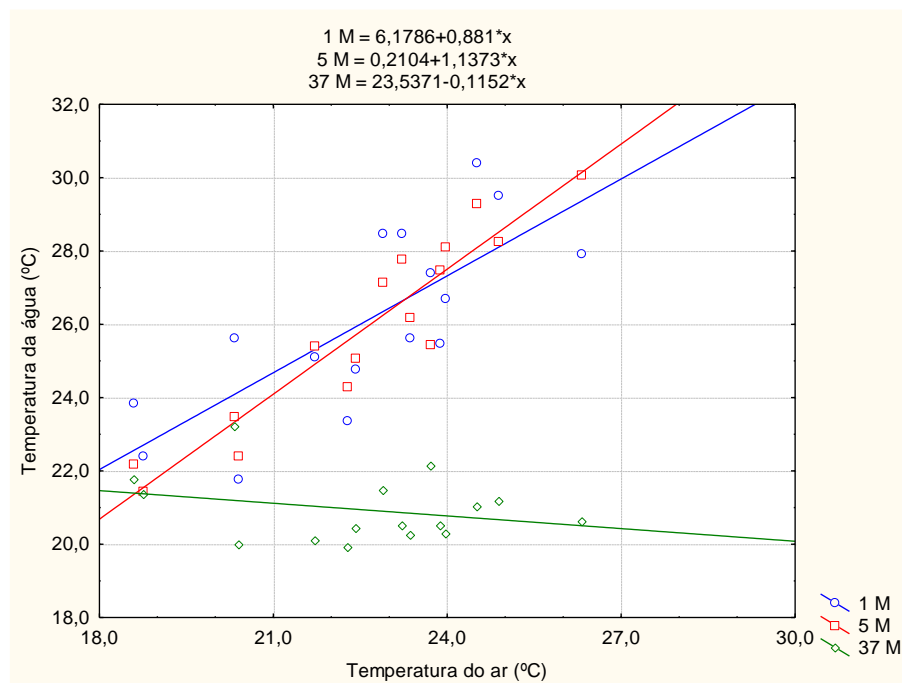
Fonte: A autora, 2022.

Em geral, os aumentos de temperatura do ar refletem-se melhor na temperatura da água de superfície do que suas diminuições equivalentes, como pode ser notado pelo gráfico de regressão linear entre a temperatura da água nas camadas de 1, 5 e 37 metros e a temperatura do ar na Figura 18. Pode-se observar que as retas equivalentes às profundidades de 1 e 5 metros seguem uma tendência de aumento em relação ao aumento da temperatura do ar, ou seja, quando a temperatura do ar sofre um aumento, as águas do epilímnio (1 e 5 metros) também sofrem um aumento em suas temperaturas, mostrando assim uma correlação entre estas camadas e a atmosfera. Fato diferente é verificado em relação a camada de 37 metros, a qual não sofre aumento de temperatura de suas águas mesmo quando há um aumento da temperatura do ar, o que mostra que esta camada não possui correlação com os fatores atmosféricos.

Isso ocorre porque um aumento de temperatura está associado a um aumento na estabilidade térmica no epilímnio. Isso separa o epilímnio superior do epilímnio inferior até certo ponto, reduzindo essencialmente a espessura da camada de mistura e

fazendo com que ela reaja com mais sensibilidade às flutuações no fluxo de calor líquido através da superfície do reservatório. Em contrapartida, uma diminuição da temperatura superficial está associada a uma diminuição da estabilidade térmica no epilímnio e, conseqüentemente, a um aumento da mistura turbulenta nesta camada e a um aprofundamento da camada de mistura, reduzindo a sensibilidade de sua resposta às flutuações no fluxo de calor líquido. Isso também foi observado por Guarino et al. (2005) e Branco et al. (2009) para este mesmo reservatório.

Figura 18 - Regressão linear da temperatura média da água (°C) nas camadas de 1, 5 e 37 metros versus a temperatura média do ar (°C).



Fonte: Cássia de Oliveira (Comunicação pessoal, 2022).

O aquecimento da água é um dos principais fatores responsáveis pela modificação da densidade da água, onde é estabelecido um gradiente vertical na coluna d'água (Dodds, 2002; Tundisi & Matsumura-Tundisi, 2008). A diferença de densidade entre camadas é importante, pois controla o comportamento físico da coluna d'água e pode levar à formação de diferentes camadas, que formam uma barreira física, impedindo a distribuição uniforme do calor, criando a condição de estabilidade térmica (Dodds, 2002; Esteves, 2011), como será mostrado e discutido abaixo.

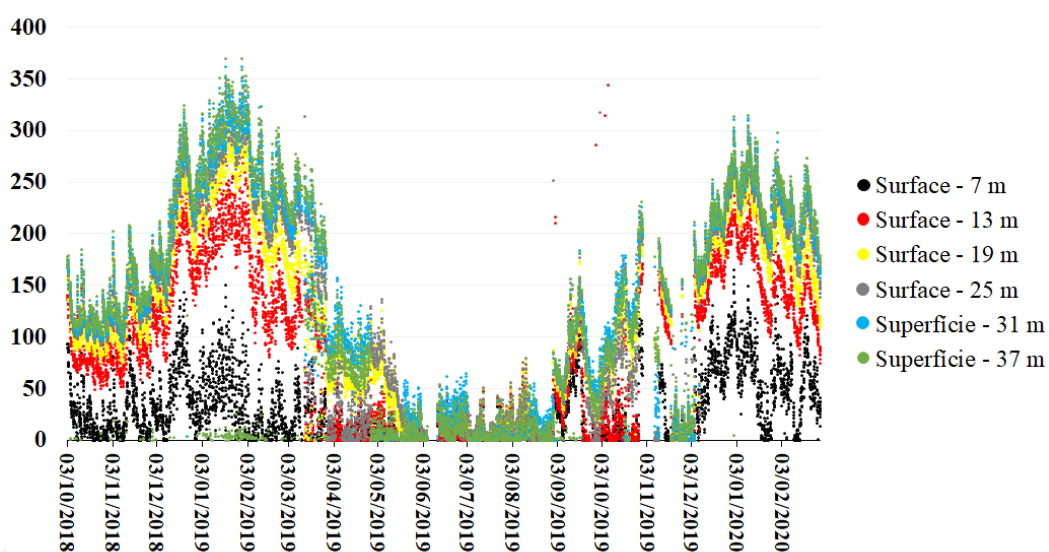
6.2 Estabilidades Térmicas

6.2.1 Estabilidade Relativa da Coluna D'água (RWCS)

Foram feitos cálculos da estabilidade térmica utilizando os valores de densidade determinados a partir das Equações 2 e 3.

Através das análises dos perfis coletados, análises das estratificações e homogeneidades da coluna d'água, estipulamos, de maneira visual e através da observação dessas análises, um valor de RWCS acima de 200 como um valor significativo para a presença de estratificação, pois foi observado que a partir deste valor as camadas possuíam maior distanciamento entre elas e isso era observado frequentemente nos períodos de maior intensidade solar, o que nos remete a presença de estratificações térmicas. Valores abaixo de 100 foram relacionados como ausência de estratificação, pois as camadas de água se encontraram próximas, quase sobrepostas. Ou seja, águas com valores de RWCS maiores que 200 se encontram estratificadas, águas com valores abaixo de 100 se encontram desestratificadas e águas com valores de RWCS entre 100 e 200 se encontram em período de transição. As densidades foram calculadas para as diferentes camadas existentes na coluna d'água do reservatório de Ribeirão das Lajes. Assim, se obteve um gráfico da estabilidade térmica entre a camada superficial (1 m) e as camadas de 7 m, 13 m, 19 m, 25 m, 31 m e a camada de fundo, que neste trabalho foi definida como 37 metros (Figura 19).

Figura 19 – Variação da Estabilidade Relativa da Coluna D'água (RWCS) em relação às diferentes camadas existentes na coluna d'água do reservatório de Ribeirão das Lajes no período de outubro de 2018 a fevereiro de 2020.



Fonte: A autora, 2022.

A estabilidade relativa da coluna d'água (RWCS) apresentou seus maiores valores nos meses de dezembro, janeiro e fevereiro tanto de 2019 (320,13; 346,83; 347,66 respectivamente) quanto de 2020 (252,22; 315,04; 273,21 respectivamente) e seus menores valores nos meses de maio a agosto de 2019 (não ultrapassando o valor de 50), de acordo com o teste de Kruskal-Wallis há uma diferença significativa ($p = 0,000$) entre os valores determinados de RWCS para toda a coluna d'água para as estações chuvosa e seca.

O RWCS da superfície em relação a camada de 7 metros possuiu um valor baixo durante todo o ano, de 0 a 100, demonstrando uma fraca estabilidade, ou seja, esta é uma camada que se encontra desestratificada durante todo o ano. Isso ocorre porque esta camada sofre bastante com a interferência de fatores atmosféricos, como a radiação solar e a ações dos ventos que causam uma mistura dessas águas a tornando homogênea.

Há uma variação dos valores de RWCS nas camadas de 13 e 19 metros em função da época do ano. Nos meses de dezembro de 2018 a fevereiro de 2019 e janeiro de 2020, a estabilidade dessas águas esteve mais forte quando em relação aos outros meses do período de estudo. Nesses meses, os valores de RWCS foram superiores a 100, classificadas aqui como águas em transição, e em alguns momentos chegaram a ultrapassar 200, sendo consideradas águas estratificadas. Porém, pode-se observar que

durante os meses restantes, principalmente os meses de inverno, essas águas se encontraram com fraca estabilidade.

As camadas de 25 e 31 metros possuíram maiores variações de estabilidade em relação às diferentes épocas do ano. Dezembro de 2018 a fevereiro de 2019 e janeiro e fevereiro de 2020, foram os meses onde os maiores valores de RWCS foram encontrados, se encontrando maiores que 200 e podendo chegar até 300, ou seja, foram os meses os quais essas águas possuíram forte estratificação. Nos meses de inverno, as águas se encontraram com baixa estabilidade, demonstrando a existência de momentos de desestratificação térmica de toda a coluna d'água.

Em termos sazonais, podemos observar que os maiores valores de estabilidade são encontrados nos meses correspondentes ao verão e os menores valores de estabilidade foram encontrados nos meses correspondentes ao inverno.

A maior estabilidade se dá em razão da coluna d'água como um todo, ou seja, entre a superfície e o fundo. Isso porque a coluna d'água estudada possui grande profundidade, o que faz com que os fatores atmosféricos capazes de interferirem nos primeiros metros desta coluna, não interfiram nas camadas d'águas mais profundas. Visto isso, fica claro o crescimento do valor de estabilidade quando nos aprofundamos para o hipolímnio.

Nos meses correspondentes ao inverno, a diferença de estabilidade entre as camadas fica menos perceptível devido às menores quantidades de calor absorvidas pela água em decorrência das menores temperaturas atmosféricas que ocorrem nesta época do ano e fazem com que os primeiros metros da coluna d'água não possuam grandes diferenças de temperatura quando comparados com as temperaturas hipolimninais.

6.2.2 Resistência Térmica Relativa (RTR)

Os valores da resistência térmica relativa (RTR) das camadas de água foram calculados até 35 metros de profundidade em intervalos de 5 metros e são apresentados na Figura 20.

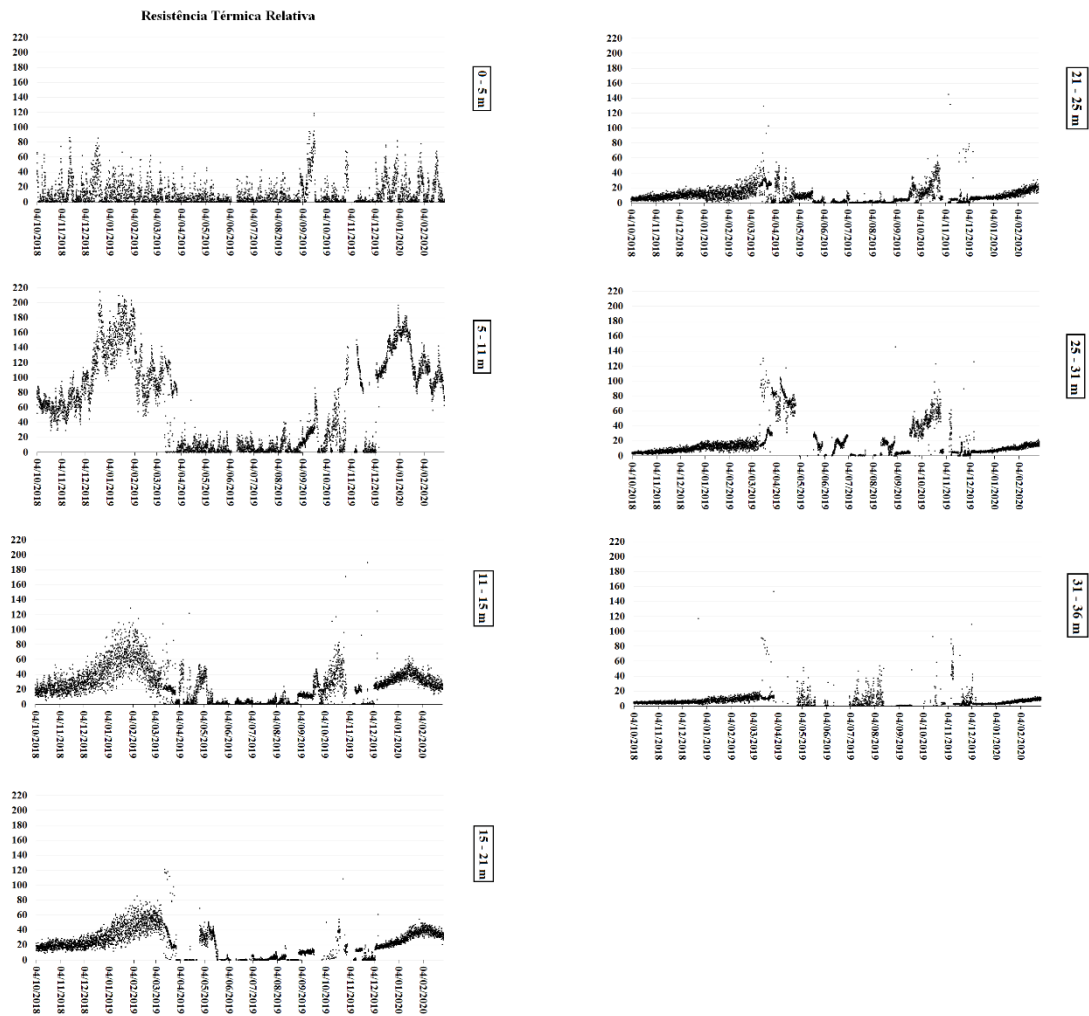
É possível observar que a maior RTR foi determinada na segunda camada de água (metalímnio), entre 5 e 11 metros, e a camada que apresentou menor RTR foi a

última (hipolímnio), entre 31 e 35 metros. Este fato mostra a profundidade a qual a termoclina se encontra nesta coluna d'água, pois é a camada com maior diferença de temperatura entre seu topo e sua base.

A RTR entre as camadas até os 21 metros de profundidade, atinge seus maiores valores durante o verão. Nos primeiros metros da coluna d'água não há grande variação dos valores de resistência durante o período de estudo, isso porque essa camada de água é a mais homogênea de toda a coluna. Porém, as camadas mais profundas se mostraram consideravelmente diferentes entre os períodos, apresentando maiores valores durante o período de estratificação da coluna (inverno).

É importante ressaltar que a estabilidade do reservatório é tipicamente maior durante o período em que a diferença de densidade entre o epilímnio e o hipolímnio é maior, correspondendo também a valores de resistência mais elevados. Também foram verificadas diferenças dentro de um determinado mês, de ano para ano, como a resistência entre as camadas de 11 e 15 metros nos meses de verão, em que a resistência foi maior no ano de 2019 quando em comparação ao ano de 2020. Isto ocorre, provavelmente, devido ao maior aquecimento da camada de água superficial, que pode estar relacionada a temperaturas médias mais elevadas do ar durante aquele ano.

Figura 20 - Variação mensal da Resistência Térmica Relativa – RTR das diferentes camadas de água do reservatório de Ribeirão das Lajes no período de outubro de 2018 a fevereiro de 2020.



Fonte: A autora, 2022.

Os resultados mostram que durante o verão, as camadas entre 5 e 21 metros apresentaram uma maior RTR à mistura. Segundo Ambrosetti & Barbanti (2003), 90% do calor está retido nas camadas epiliminais, o que justifica a maior resistência dessas camadas ao processo de mistura. A menor resistência apresentada pelas camadas de 1 a 5 metros está associada à sua proximidade com a atmosfera, o que torna essas camadas mais susceptíveis à variações não sazonais, influenciadas por mudanças diárias das condições climáticas, não apresentando grandes gradientes térmicos. Nesses meses, as camadas d'água apresentaram uma resistência térmica à mistura nula ou muito baixa devido a menor diferença de temperatura entre as respectivas camadas quando os meses de inverno foram observados.

Os valores de RTR também foram usados como indicador de estabilidade para lagos tropicais na Indonésia (Lehmusluoto et al., 1999). Lehmusluoto et al., (1999) considerou que lagos com valores de RTR entre 16,3 e 64,7 se encontravam estratificados fracamente, enquanto lagos com valores entre 56,5 e 156,2 foram considerados estratificados nitidamente. Com base nestes critérios, o Reservatório das Lajes, com valores de RTR entre 0 e 215, possui alternância entre períodos estratificados e não estratificados.

A duração do período de estratificação na coluna d'água de Lajes foi de 13 meses durante o período de estudo. Esse longo período de estratificação também foi observado em alguns lagos monomíticos quentes no México, como no lago Zirahuén (Bernal-Brooks; Dávalos-Lind; Lind, 2002b) onde a estratificação teve duração de 8 meses, no lago Achichica (Alcocer et al., 2000a) e no lago Atextac (Macek; Vilaclara; Lugo, 1994) ambos apresentando 9 meses de estratificação térmica e no lago Santa Maria Del Oro (Alcocer & Bernal-Brooks, 2010), onde a estratificação chega a durar até onze meses do ano.

6.2.3 Estabilidade de Schmidt

A estabilidade de Schmidt representa a resistência da mistura mecânica devido a energia potencial da estratificação da coluna d'água. É a quantidade de trabalho necessária para transformar a água (por exemplo, um lago) em uma densidade de água uniforme ou a resistência inercial para completar a mistura causada por diferenças verticais de densidade.

Os cálculos de Estabilidade de Schmidt foram feitos utilizando os valores médios das densidades mensais entre os meses de outubro de 2018 a fevereiro de 2020. Foram calculadas as médias mensais de densidade devido aos pequenos períodos com ausência de dados diários e também com o propósito de comparação com os valores de RWCS.

A equação utilizada foi a Eq. 5 e os cálculos foram realizados no MATLAB e a partir dos dados calculados foi gerado um perfil com os valores de densidade

referentes a cada mês estudado e também o valor do trabalho (Ws), por m^2 , necessário para homogeneizar a coluna d'água.

A Figura 21 mostra os gráficos de densidade em relação aos meses estudados. O valor Y indica a profundidade onde a densidade média é igual a 0 e X indica o valor da densidade nesta profundidade.

Como a densidade depende única e exclusivamente da temperatura, os meses mais quentes possuem densidades menores em suas águas epiliminais e metaliminais, como, por exemplo, janeiro e fevereiro de 2019 que possuíram densidades de 995,652 e 995,887 $kg.m^{-3}$, respectivamente, em 5 metros de profundidade e 995,975 e 995,962 $kg.m^{-3}$, respectivamente, em 7 metros. Diferencialmente dos meses de inverno, por exemplo, junho e agosto, onde as águas demonstram possuir densidades de 997,449 e 997,918 $kg.m^{-3}$, respectivamente, em 5 metros e 997,467 e 997,942 $kg.m^{-3}$, respectivamente, em 7 metros de profundidade. Esses valores demonstram que os meses mais quentes possuem suas águas até 7 metros mais aquecidas que os meses de inverno e, conseqüentemente, menos densas, o que faz com que a termoclina ocorra mais superficialmente nos meses de verão, como pode ser visto através das curvas de densidade nos gráficos abaixo.

Figura 21 – Variação mensal da densidade ($kg.m^{-3}$) versus a profundidade (m) no reservatório de Ribeirão das Lajes durante o período de outubro de 2018 a fevereiro de 2020. (continua)

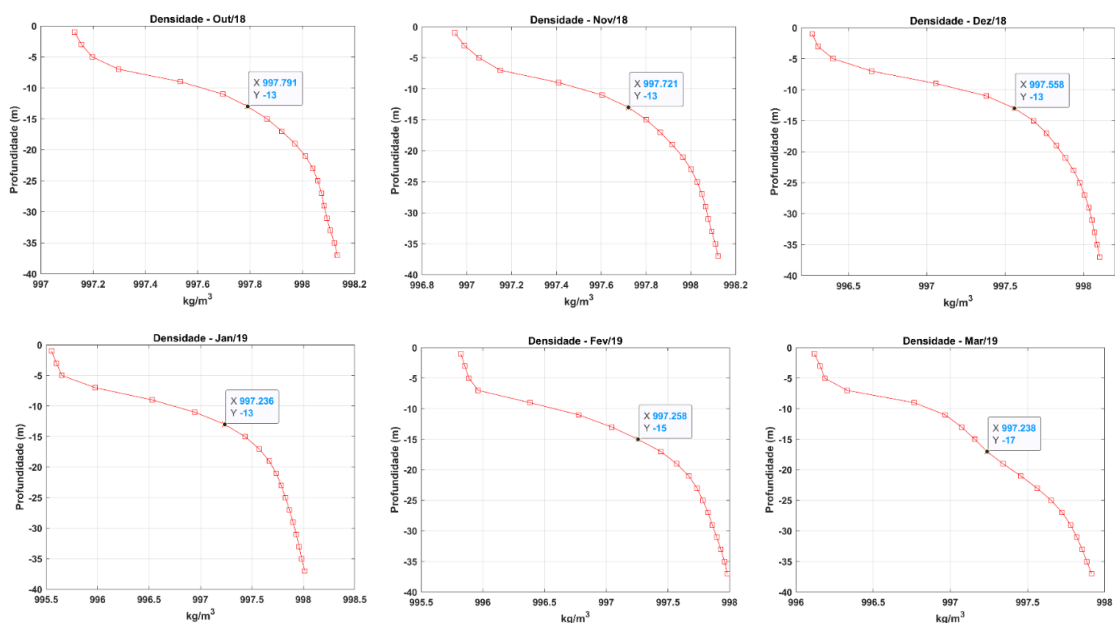
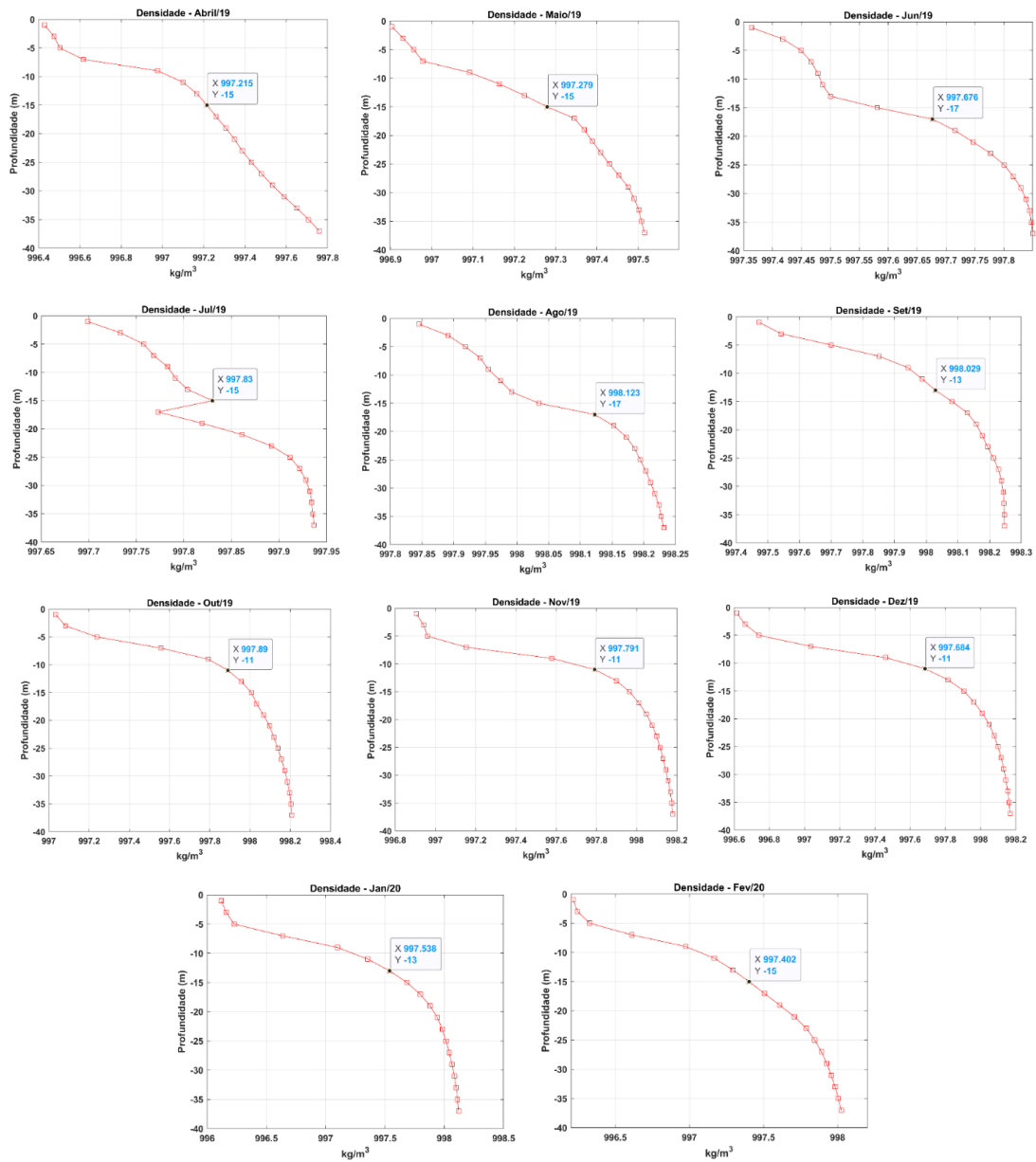


Figura 21 - Densidade ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) versus a profundidade (m) no reservatório de Ribeirão das Lajes durante o período de outubro de 2018 a fevereiro de 2020. (conclusão)



Fonte: A autora, 2022.

Na tabela 5 abaixo encontram-se as profundidades da densidade média, o valor de densidade ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) correspondente a esta profundidade e o valor da estabilidade total (Ws) de todo o perfil desta coluna d'água.

Tabela 5 - Valores de profundidade da densidade média (m), valores de densidade desta profundidade (kg.m^{-3}) e valores da estabilidade total (Ws) ($\text{kg.m}^2.\text{s}^{-2}$).

Mês/Ano	Profundidade da Densidade Média (m)	Densidade (kg.m^{-3})	Estabilidade Total (Ws) ($\text{kg.m}^2.\text{s}^{-2}$)
Outubro/2018	13	997,791	1.3380e+03
Novembro/2018	13	997,721	1.5543e+03
Dezembro/2018	13	997,558	2.4036e+03
Janeiro/2019	13	997,236	3.2923e+03
Fevereiro/2019	15	997,258	3.0851e+03
Março/2019	17	997,238	2.4592e+03
Abril/2019	15	997,215	1.6495e+03
Maio/2019	15	997,279	840,6480
Junho/2019	17	997,676	690,2680
Julho/2019	15	997,83	310,6600
Agosto/2019	17	998,123	524,8680
Setembro/2019	13	998,029	881,1800
Outubro/2019	11	997,89	1.3522e+03
Novembro/2019	11	997,791	1.6395e+03
Dezembro/2019	11	997,684	1.9563e+03
Janeiro/2020	13	997,538	2.6068e+03
Fevereiro/2020	15	997,402	2.4118e+03

Fonte: A autora, 2022.

A profundidade da densidade média é a profundidade na qual, na projeção da curva de estabilidade (Figura 22), o valor de densidade é igual a zero. Este valor de densidade igual a zero significa que estas águas precisariam de uma menor energia para não se encontrarem estratificadas, ou seja, precisariam de menos energia para que ocorresse uma tendência à mistura e gerasse um perfil uniforme. Essa energia é dada pelo valor da estabilidade total (Ws) que é o trabalho por metro quadrado, dado em $\text{kg.m}^2.\text{s}^{-2}$.

Figura 22 – Variação mensal da curva de Estabilidade no período de outubro de 2018 a fevereiro de 2020 no reservatório de Ribeirão das Lajes. (continua)

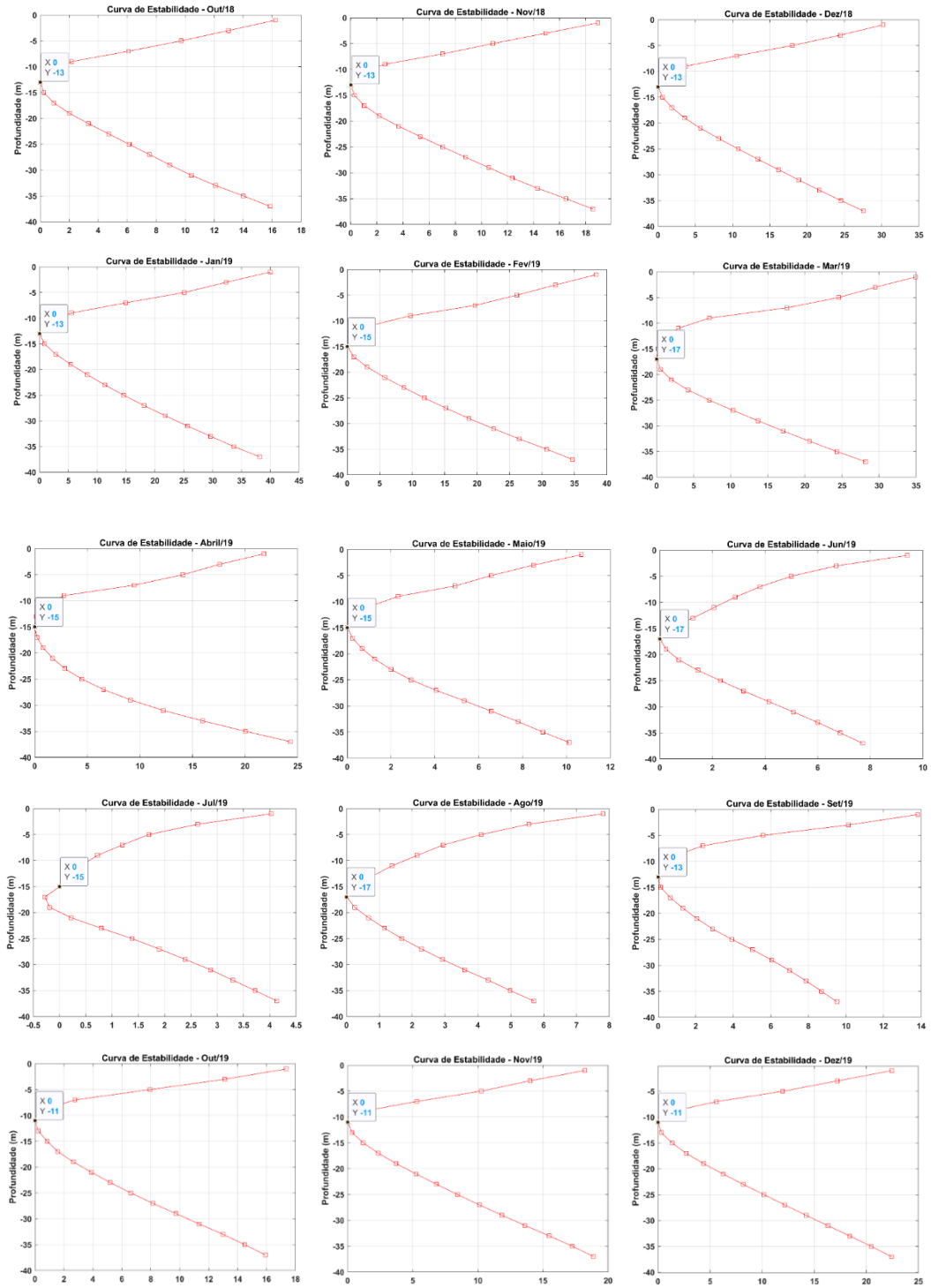
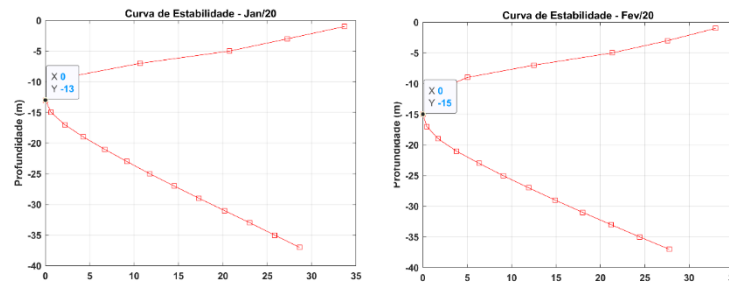


Figura 22 - Variação mensal da curva de Estabilidade no período de outubro de 2018 a fevereiro de 2020 no reservatório de Ribeirão das Lajes. (conclusão)

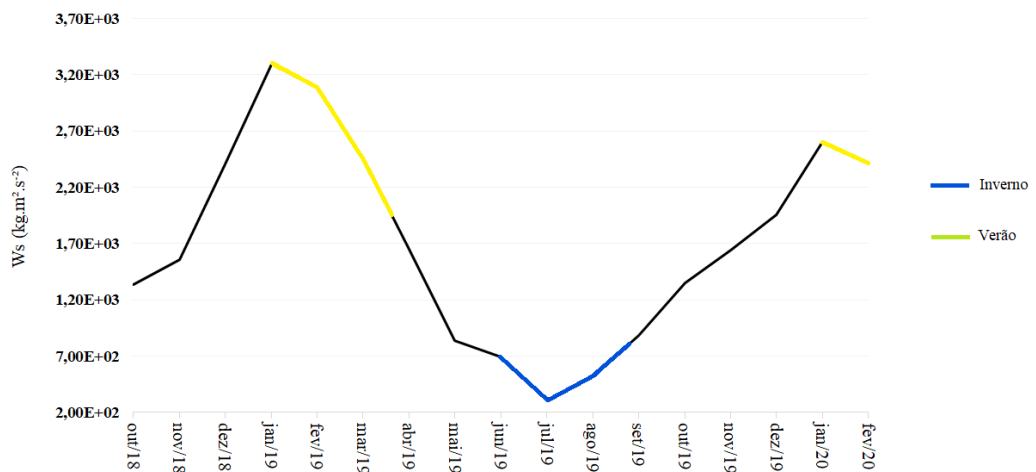


Legenda: Os valores $X = 0$ definem a densidade média (X) igual a 0 e Y é o valor da profundidade na qual $X = 0$.

Fonte: A autora, 2022.

Os maiores valores de estabilidade da coluna d'água (W_s) foram registrados nos meses de janeiro a março de 2019 e janeiro e fevereiro de 2020, com uma média igual a $2.9455e+03 \text{ kg.m}^2.\text{s}^{-2}$ em 2019 e $2.5093e+03 \text{ kg.m}^2.\text{s}^{-2}$ em 2020 (Tabela 5 e Figura 23). Os menores valores foram registrados no período de junho a agosto de 2019, com uma média de $508,5986 \text{ kg.m}^2.\text{s}^{-2}$, se mostrando significativamente diferente entre os períodos. Ou seja, durante os meses de verão, a estabilidade se mostrou mais forte, sendo necessária uma maior quantidade de energia para fazer com que essas águas sofressem algum tipo de mistura, indicando maior resistência à mistura do corpo d'água, diferentemente dos meses de inverno, onde a energia necessária para a ocorrência de alguma tendência a mistura é menor.

Figura 23 - Variação mensal da estabilidade de Schmidt (W_s) ($\text{kg.m}^2.\text{s}^{-2}$) no reservatório de Ribeirão das Lajes no período de outubro de 2018 a fevereiro de 2020.



Fonte: A autora, 2022.

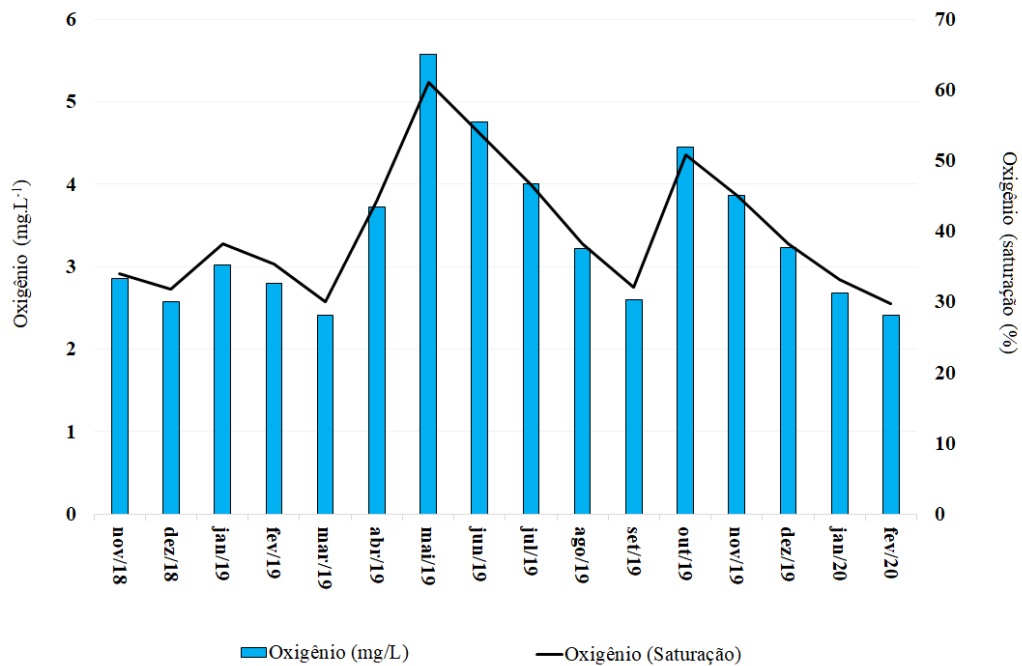
A estabilidade medida através da fórmula de Schmidt da coluna d'água do reservatório de Ribeirão das Lajes apresentou os mesmos resultados da estabilidade realizada através do RWCS quando discutido a existência ou ausência de estratificações durante o período de estudo.

6.3 Oxigênio

A Figura 24 apresenta os valores da saturação de oxigênio dissolvido, em %, e da concentração de oxigênio dissolvido, em mg.L^{-1} , em toda a coluna d'água durante o período de estudo. Nela, pode-se observar que a concentração de oxigênio dissolvido é maior durante os meses de inverno, onde, no mês de maio de 2019 há um pico desta concentração, se encontrando com $5,57 \text{ mg.L}^{-1}$. A partir deste mês, as concentrações sofreram um decréscimo, se encontrando com seu mínimo em setembro de 2019 ($2,60 \text{ mg.L}^{-1}$). O período de menor estabilidade térmica da coluna d'água (maio a julho de 2019) permitiu uma maior difusão do oxigênio dissolvido, portanto, uma maior disponibilidade deste gás é detectada por toda a coluna d'água.

Os meses de verão, que possuem uma coluna d'água com estabilidade mais forte, possuíram baixa média na concentração de oxigênio dissolvido. Isto ocorre devido as camadas de água serem fortemente estáveis, devido as elevadas temperaturas, e impedirem a difusão de gases para outras camadas de água.

Figura 24 - Variação mensal do oxigênio dissolvido no reservatório de Ribeirão das Lajes durante o período de outubro de 2018 a fevereiro de 2020.



Legenda: Saturação do oxigênio (%) e concentração de oxigênio (mg.L⁻¹).

Fonte: A autora, 2022.

Na Figura 25 está representada as variações da saturação de oxigênio (%) em relação a profundidade da coluna d'água de Lajes.

Nas camadas superficiais, até 7 metros de profundidade, é onde há a maior porcentagem de saturação de oxigênio. Isto porque nesses primeiros metros de coluna d'água há grande produção de oxigênio devido à produtividade primária existente nessas camadas em decorrência da maior radiação solar penetrante nessas profundidades.

A partir desta profundidade, a concentração de oxigênio dissolvido sofre um queda abrupta (profundidade na qual se encontra a termoclina) e seus valores apresentam uma diminuição gradativa com o aumento da profundidade. À medida que essa profundidade aumenta, a quantidade de oxigênio vai se tornando escassa e isto pode estar relacionado ao fato de não haver grande produção de oxigênio nestas camadas e somente o consumo deste se fazer presente em decorrência da respiração da biota e dos processos de decomposição existente nessas águas.

O maior valor medido de saturação de oxigênio em até 5 metros de profundidade foi de 114,84% em fevereiro de 2020 e o menor foi de 72,34% em junho de 2019. Já na camada profunda referente a 35 metros (hipolímnio), o maior valor de oxigênio encontrado foi de 50,74% em agosto de 2019 e o menor foi de 3,39% em dezembro de 2019. Isto nos mostra que nos primeiros metros dessa coluna d'água, há uma grande produção de oxigênio, principalmente nos meses de maior radiação solar, como fevereiro, por exemplo, e nos meses de menor incidência solar e maior ação dos ventos, como junho, por exemplo, a concentração de oxigênio é menor, pois há menor produtividade primária durante esse tempo. Nas profundidades abaixo de 20 metros, as águas encontram-se praticamente anóxicas na maior parte do período estudado. Destaca-se neste comportamento o mês de fevereiro, onde o valor de oxigênio encontrado é muito abaixo do que o encontrado nas camadas superiores. Isso ocorre devido a três fatores: a presença de uma forte estratificação, a falta de produção de oxigênio e a degradação da matéria orgânica.

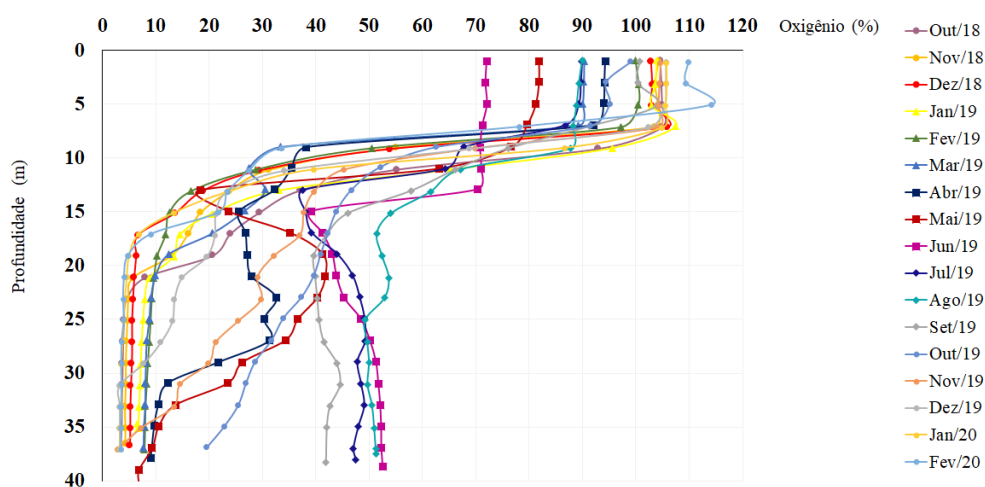
Como fevereiro, por exemplo, é um mês de intensa radiação solar, as águas superficiais, até em torno dos 6 metros, se aquecem e se encontram com temperaturas muito mais altas do que as águas mais profundas. Devido a este fato, há a criação de uma estratificação térmica que impede que o oxigênio dessas águas rasas cheguem a maiores profundidades. A luz solar não consegue alcançar profundidades maiores que 20 metros, por isto, não há produção de oxigênio, somente seu consumo por parte dos animais presentes ali. Outro fator que contribui para a anoxia em maiores profundidades é a degradação da matéria orgânica. Grandes profundidades são locais de alta decomposição de matéria orgânica e para isso ocorrer, é utilizado o oxigênio disponível no local. Na maior parte do período estudado, o reservatório se encontrou anóxico em profundidade, principalmente abaixo dos 25 metros. Porém, quando se olha para o gráfico percebemos que há exceções, como os meses de junho, julho e agosto de 2019, que possuíram mais de 40% de saturação de oxigênio. Isso se faz consistente devido a quebra da estratificação térmica nos meses de inverno, que faz com que a camada de mistura se encontre mais profunda e o oxigênio consiga se difundir para o hipolímnio, fazendo com que haja valores relativamente altos nessas camadas.

A diferença de saturação de oxigênio dissolvido entre epilímnio e hipolímnio foi confirmada com o teste de Kruskal-Wallis ($p = 0,000$). O esgotamento do oxigênio hipolimnético é função da produtividade do reservatório, das concentrações de

nutrientes, da oxidação dos compostos orgânicos dissolvidos e da temperatura da água (Nürnberg 1995, 2004). O aumento da disponibilidade deste gás nas camadas mais inferiores ocorreu mais marcadamente nos períodos de menor estabilidade térmica da coluna d'água, o que permitiu uma maior difusão do oxigênio dissolvido para maiores profundidades.

A concentração de oxigênio em diferentes profundidades está relacionada com a temperatura propriamente dita, ou seja, com os processos de estratificação e desestratificação, a circulação vertical e sua eficiência, a distribuição vertical de organismos e a troca gasosa que ocorre na interface ar - água. As águas superficiais apresentam valores de oxigênio próximos à saturação. Supersaturação na superfície pode ocorrer em altas concentrações de fitoplâncton, derivando em alta atividade fotossintética.

Figura 25 - Variação mensal da saturação do oxigênio (%) em relação à profundidade no reservatório de Ribeirão das Lajes durante o período de outubro de 2018 a fevereiro de 2020.



Fonte: A autora, 2022.

A Figura 26 mostra a saturação de oxigênio em cada camada da coluna d'água do reservatório de Ribeirão das Lajes de uma maneira que seja mais fácil observar o que foi comentado e discutido no gráfico da figura anterior.

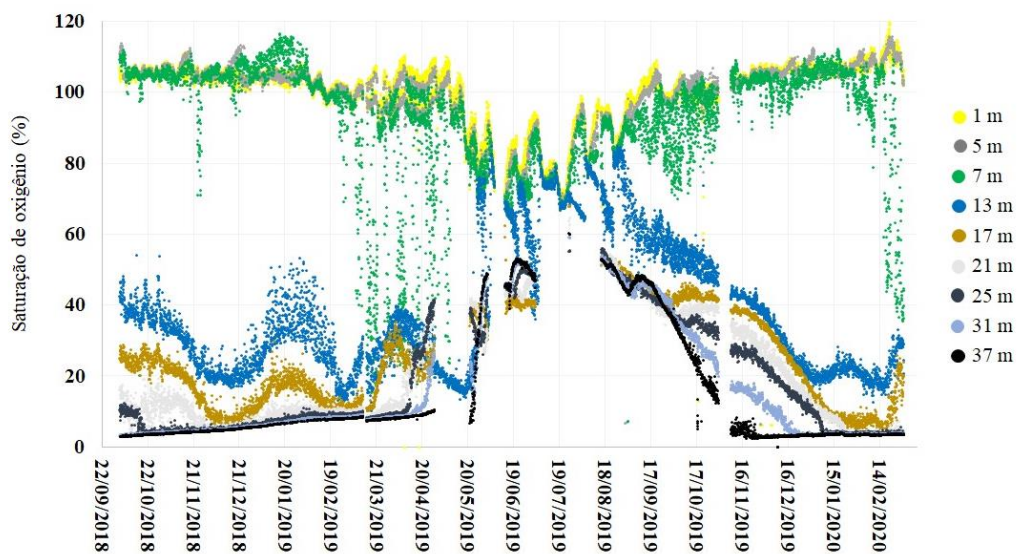
Através da Figura 26 pode-se observar que a concentração de oxigênio dissolvido em sub-superfície apresentou variações relacionadas às variações sazonais e é possível observar um declínio mais expressivo durante os meses de inverno, quando

se observou uma maior queda no mês de maio de 2019. Nas camadas mais profundas, é possível observar um aumento da concentração de oxigênio a partir do mês de maio, quando ocorre uma tendência a mistura da coluna d'água, que favorece o aporte do oxigênio para as camadas mais profundas.

Neste gráfico fica mais evidente a existência de uma termoclina a partir dos 7 metros de profundidade. Esta termoclina é bem forte nos meses de verão, como pode-se observar pelo distanciamento da camada de 13 metros em relação as camadas mais rasas. Como mostrado e comentado no gráfico anterior, a partir dos 25 metros de profundidade há a existência de uma anoxia nos meses de verão devido a forte estratificação existente na coluna d'água nesses meses. Nos meses de inverno, devido a instabilidade da coluna d'água, o oxigênio consegue se difundir para maiores profundidades, o que faz com que o hipolímnio possua mais de 40% de saturação de oxigênio em suas águas, não se encontrando, portanto, anóxico como nos outros meses do estudo.

As pequenas oscilações de oxigênio dissolvido no epilímnio são resultantes das atividades fotossintética e respiratória decorrentes de diferenças na intensidade da radiação solar diária.

Figura 26 - Variação mensal da saturação do oxigênio (%) nas diferentes camadas da coluna d'água do reservatório de Ribeirão das Lajes durante o período de outubro de 2018 a fevereiro de 2020.



Fonte: A autora, 2022.

6.4 pH

O pH é diretamente influenciado pela fotossíntese, respiração e degradação da matéria orgânica no ecossistema. Quanto maior a biomassa vegetal na massa d'água, maiores e mais rápidas alterações ocorrerão no pH do meio. Assim, pode-se esperar que durante um período de 24 horas, possam ocorrer grandes variações de pH no mesmo ecossistema aquático. Em teoria, durante os meses de verão, o pH sofre um aumento e apresenta-se próximo da neutralidade porque ocorre um aumento da decomposição dos compostos dissolvidos alóctones provenientes dos morros ao redor da região do reservatório devido ao maior escoamento em razão das chuvas. Isso é causado pelo aumento no volume de água que faz com que a acidez da água diminua (Silva et al., 2008). Processo contrário pode ser observado durante os períodos de inverno, onde valores básicos de pH são registrados devido ao aumento da biomassa algal em decorrência da alta produção primária.

Abaixo foram realizados gráficos de pH em relação ao período de estudo e a coluna d'água. Durante a coleta de dados houve a falha de um sensor de pH durante o período de setembro a outubro e, devido a isto, há uma ausência de dados referentes a esses meses nos gráficos abaixo. Houve a troca desta sonda e os dados voltaram a ser coletados normalmente a partir de novembro de 2019.

A média do pH durante o período de estudo foi de 6,9, com seu maior valor sendo encontrado no mês de fevereiro de 2019 com pH de 7,82 e seu menor valor sendo de 6,36 no mês de junho do mesmo ano. O pH em Lajes se encontrou na faixa entre 6,0 e 8,0 durante o período de estudo, então, o reservatório de Ribeirão das Lajes se encontra apropriado para o abastecimento público segundo a Resolução CONAMA 357/05, que designa pH entre 6,0 e 9,0 para águas com este propósito.

Os menores valores médios de pH foram registrados no inverno, nos meses de maio, junho e julho, com exceção dos meses de dezembro de 2019 e janeiro e fevereiro de 2020, em que também foram registrados menores valores mesmo sendo meses de precipitação mais intensa.

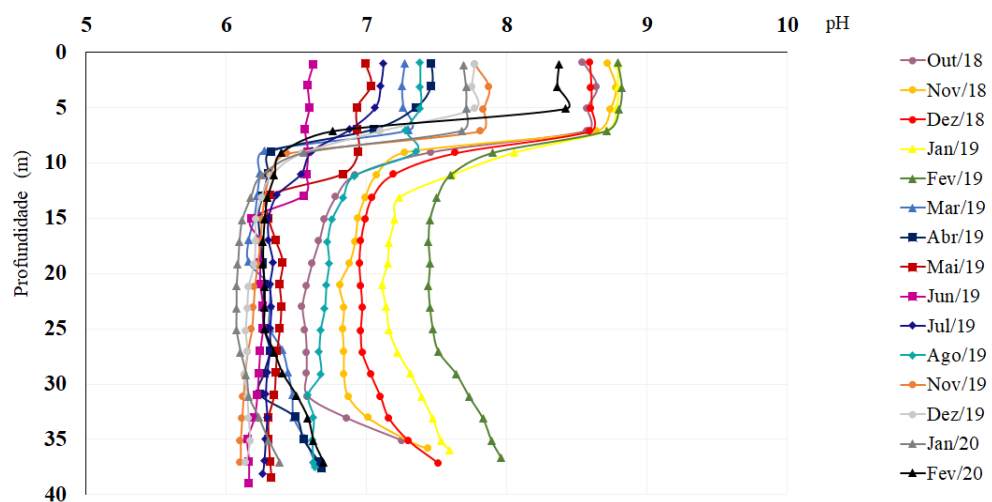
A Figura 27 mostra os valores de pH em relação as profundidades da coluna d'água de Lajes. Como pode ser observado, os maiores valores de pH se encontram nos meses com maiores radiações solares e, conseqüentemente, mais quentes. Já os menores

valores de pH são encontrados nos meses de inverno, onde a temperatura atmosférica é menor. Maiores ou menores intensidades de radiação solar dizem respeito a maiores ou menores, respectivamente, taxas de fotossíntese realizada pela biomassa vegetal nos primeiros metros desta coluna d'água, o que faz com que haja maior produção de oxigênio, aumente o valor do pH, se tornando mais alcalino.

Os maiores valores de pH são encontrados nos primeiros metros da coluna d'água (até em torno dos 7 metros de profundidade). A partir desta profundidade (metalímnio) se observa uma diminuição gradual dos valores de pH em direção ao hipolímnio. Isso ocorre em decorrência da ausência de fotossíntese, devido a diminuição da penetração de luz solar nessas águas, e as maiores taxas de respiração e liberação de CO₂ pelos processos oxidativos presentes nestas profundidades, o que faz com que aumente a quantidade de gás carbônico nestas águas deixando o pH do meio mais ácido. Esta diminuição do pH também pode estar associada a um aumento da decomposição da matéria orgânica que libera gás carbônico nessas águas (sistema carbonato) (Marotta et al., 2008).

Como pode ser observado na Figura 27, o pH é mantido praticamente constante logo após a termoclina. Neste caso, esta diferença de pH entre superfície e fundo e seus valores sem grandes variações ao longo das profundidades mais abaixo, nos evidenciam a presença de uma estratificação química.

Figura 27 – Variação das médias mensais de pH em relação à profundidade no reservatório de Ribeirão das Lajes durante o período de outubro de 2018 a fevereiro de 2020.



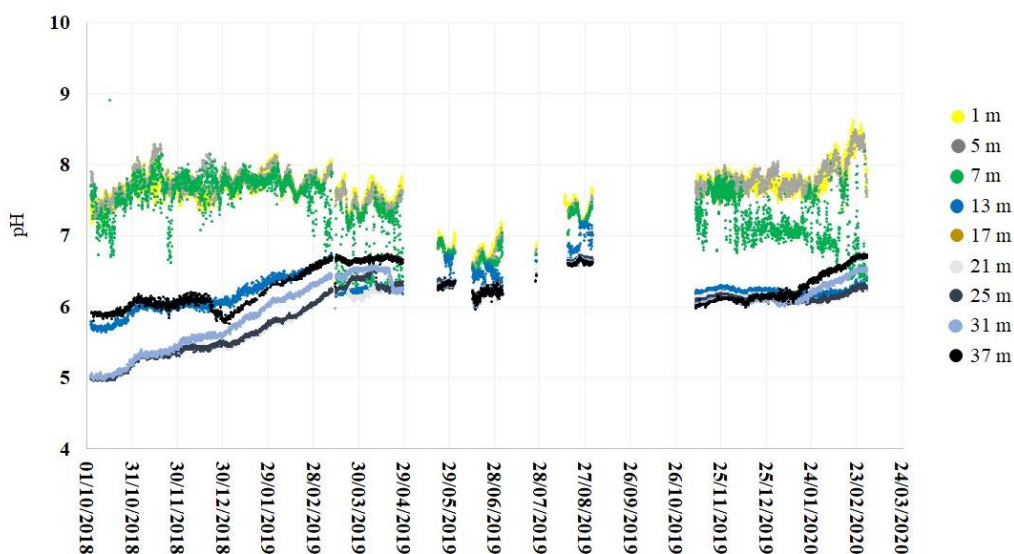
Fonte: A autora, 2022.

Assim como foi mostrado no gráfico de temperatura, os valores de pH nos primeiros metros da coluna d'água (até 7 metros) exemplificam a homogeneidade presente nessas águas (Figura 28). A partir de 7 metros, podemos observar nos meses correspondentes ao verão de ambos os anos (2018/2019 e 2019/2020) uma maior distância para as próximas camadas. Este fato condiz com o que foi visto nos gráficos de temperatura, a presença de uma termoclina bem evidente em 7 metros de profundidade. Nos meses correspondentes ao verão, esta termoclina fica mais evidente, diferente do que ocorre nos meses de inverno, onde a termoclina é muito menos pronunciada.

Na camada referente a 5 metros de profundidade da coluna d'água, o maior valor medido foi de 8,5 no mês de fevereiro de 2020 e o menor valor de pH encontrado nessa primeira camada foi de 6,44, correspondente ao mês de junho. Já em águas profundas, na profundidade de 37 metros, o maior valor de pH foi de 6,75 no mês de abril de 2019 e o menor valor foi de 5,76 em janeiro de 2019. Esses valores exemplificam que quando a fotossíntese é efetiva, o pH da água tende a aumentar, ou seja, tornar-se mais alcalino em decorrência da diminuição das concentrações de gás carbônico na água (Wetzel, 2001).

Junto ao fundo é detectado um pequeno aumento do pH em relação às águas situadas um pouco acima, em algumas épocas do ano, isso ocorre em função da total falta de oxigênio dissolvido, resultando na utilização de nitrato como aceptor de elétrons, ocorrendo a liberação de amônia, elevando o pH do meio.

Figura 28 - Variação média mensal do pH nas diferentes camadas da coluna d'água do reservatório de Ribeirão das Lajes durante o período de outubro de 2018 a fevereiro de 2020.



Fonte: A autora, 2022.

De acordo com os gráficos apresentados, os valores de pH não variam muito abaixo da termoclina, estes se mantem praticamente constantes por toda a coluna d'água.. A redução do pH no corpo d'água é mais frequente na camada de fundo dos reservatórios (hipolímnio). Desta forma, é comum a ocorrência de gradientes verticais em reservatórios, observando-se valores mais básicos no epilímnio (particularmente na zona eufótica) e valores mais ácidos no hipolímnio. A intensidade de tais gradientes depende basicamente das características hidrológicas e morfométricas de cada reservatório, como também, da intensidade dos processos de fotossíntese e respiração que, por sua vez, dependem do grau de comprometimento destes corpos d'água (estágio de eutrofização).

Pode-se notar através dos valores de pH, que mesmo nos meses de inverno, não há uma mistura total das das camadas Os valores de pH do epilímnio se aproximam dos valores de pH do metalímnio e do hipolímnio, porém, cada camada ainda se encontra perceptível. Isto corrobora o fato de que este reservatório não sofre uma mistura completa de sua coluna d'água.

Caso somente fossem observados e analisados os parâmetros de temperatura e oxigênio, esta conclusão não seria possível, visto que de acordo com a temperatura, há uma desestratificação térmica no período de inverno e, através das análises de oxigênio,

também é provável a confirmação de uma desestratificação química, pois as concentrações de oxigênio dissolvido no hipolímnio nos meses de inverno aumentam, o que tende a concluir que há uma mistura completa da coluna d'água durante este período. Como isto não ocorre, o aumento de temperatura das camadas hipolímnias no inverno ocorrem devido ao aquecimento por difusão turbulenta.

Assim como ocorre em Ribeirão das Lajes, outros lagos e reservatórios também não sofrem mistura de toda a sua coluna d'água mesmo nos meses de inverno. Segundo Barbosa e Pádisak (2002), a longa estratificação térmica no lago Dom Helvécio promoveu camadas física e quimicamente diferentes, com uma descontinuidade entre as camadas e uma ocorrência de mistura intermitente somente no epilímnio.

Ambrosetti e Barbanti (2002), estudaram os lagos Lugano NB e Idro localizados na Itália e concluíram que ambos se encontram em condição de meromixia, o que significa que a estabilidade térmica não coincide com a estabilidade total, mas que esta é condicionada pela estabilidade química. Em ambos os lagos, a estabilidade química desempenha um papel importante no inverno, impedindo a mistura vertical da água. Em contrapartida, no verão a estabilidade química contribui muito pouco para o total, devido ao aquecimento geral da água.

Os principais aspectos do reservatório de Lajes que provavelmente contribuem para manter a estabilidade da estratificação da coluna de água durante a maior parte do ano são a proteção do reservatório do vento e o tempo de retenção de água.

Também estudando o reservatório de Ribeirão das Lajes, Soares et al., (2008), com base na velocidade do vento medida e no número de Wedderburn, concluíram que o vento não era forte o suficiente para causar um giro completo na coluna d'água, mesmo no período mais frio do ano. Fato semelhante foi relatado por González et al., (2004) para um reservatório hipereutrófico estratificado permanentemente na Venezuela (Pao-Cachinche), no qual a topografia montanhosa ao redor do lago também o protege das influências do vento e, conseqüentemente, impede a mistura da coluna d'água.

O longo tempo de retenção da água do reservatório de Lajes (282 dias), também foi observado anteriormente por Soares et al., (2008). Segundo Henry (1999), reservatórios com tempo de residência maior que 200 dias geralmente apresentam uma zona lacustre característica e desenvolvem estratificação térmica. Devido a este longo

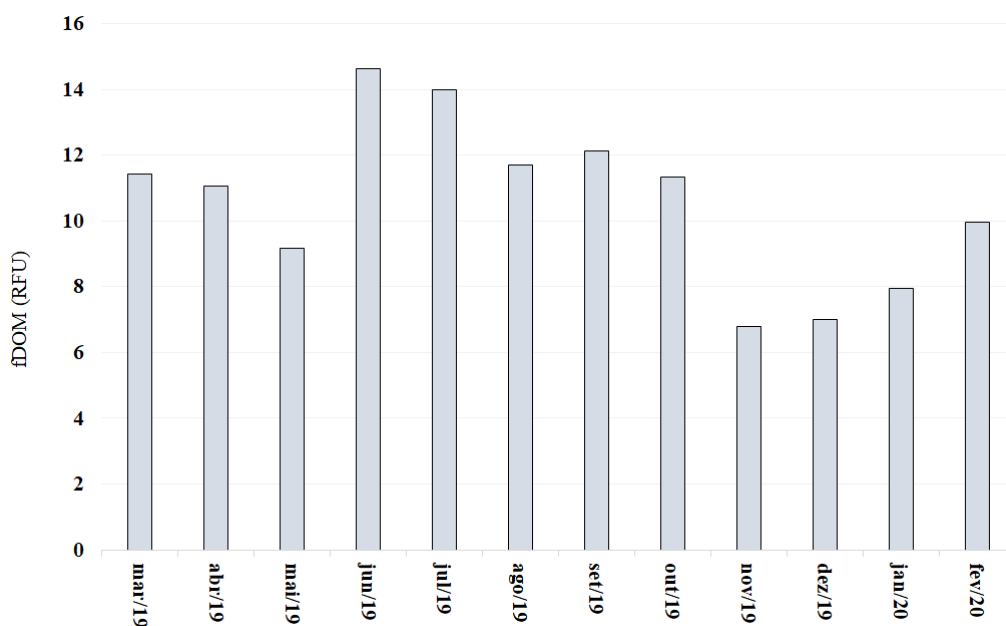
tempo de retenção da água, o reservatório de Lajes tem potencial considerável para se tornar eutrófico, aumentando assim a ocorrência de florações de cianobactérias.

6.5 Matéria Orgânica Dissolvida (DOM)

Abaixo foram confeccionados gráficos de fDOM em relação ao período de estudo na coluna d'água do reservatório de Ribeirão das Lajes.

A média de fDOM durante o período de estudo foi de 10,6 RFU (Relative fluorescence Unit - Unidade de Fluorescência Relativa), com sua maior média mensal encontrada no mês de junho de 2019 (14,6) e seu menor valor sendo de 6,8 no mês de novembro do mesmo ano (Figura 29).

Figura 29 - Variação média mensal da matéria orgânica colorida fluorescente (fDOM) no período de março de 2019 a fevereiro de 2020 em toda a coluna d'água do reservatório de Ribeirão das Lajes.



Fonte: A autora, 2022.

A Figura 30 mostra a distribuição dos valores de fDOM em relação às profundidades da coluna d'água do reservatório de Lajes. Como pode ser observado, em superfície, os maiores valores de fDOM foram determinados nos meses de inverno. Isso

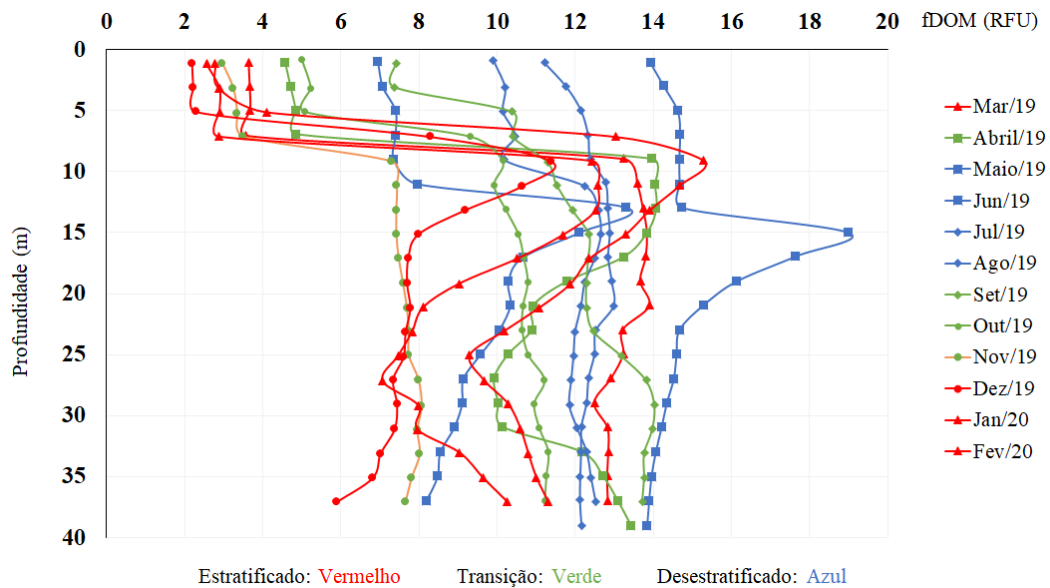
ocorre porque, segundo D'Sa & Di Marco (2009), em superfície, a decomposição da CDOM é estimulada pela maior exposição à luz solar (processos fotoquímicos) e nestes meses há uma menor incidência de radiação solar nesta coluna d'água, o que faz com que não ocorra esta decomposição, como pode ser observada nos meses de verão, onde os valores de fDOM são menores em superfície.

Segundo D'Sa & Di Marco (2009), na camada sub-superficial de rios, a decomposição da fDOM é realizada pela via microbiana (processos biológicos), mostrando baixa reatividade fotoquímica, enquanto que na superfície, a decomposição da fDOM é estimulada pela maior exposição à luz solar (processos fotoquímicos).

Já em subsuperfície (abaixo de 5 metros), podemos observar que os valores de fDOM nos meses de verão aumentam consideravelmente, isso ocorre porque a decomposição da CDOM é realizada pela via microbiana (processos biológicos), mostrando baixa reatividade fotoquímica e evidenciando a menor decomposição de fDOM nessa camada (D'Sa & Di Marco, 2009), além de apresentar correlação de Sorman negativa com o oxigênio dissolvido e o pH (Figura 31).

A Figura 30 apresenta a distribuição do fDOM ao longo da coluna d'água, medido em diversos períodos, com a coluna d'água estratificada ou não. Observa-se um perfil inverso ao observado para o oxigênio dissolvido (Figura 35) e pH (Figura 39). Na profundidade onde há o decaimento do oxigênio é justamente onde há o aumento do fDOM, o que contribui para o fato de que o oxigênio foi utilizado para a degradação da matéria orgânica e liberação do fDOM e nutrientes (Yang et al., 2021).

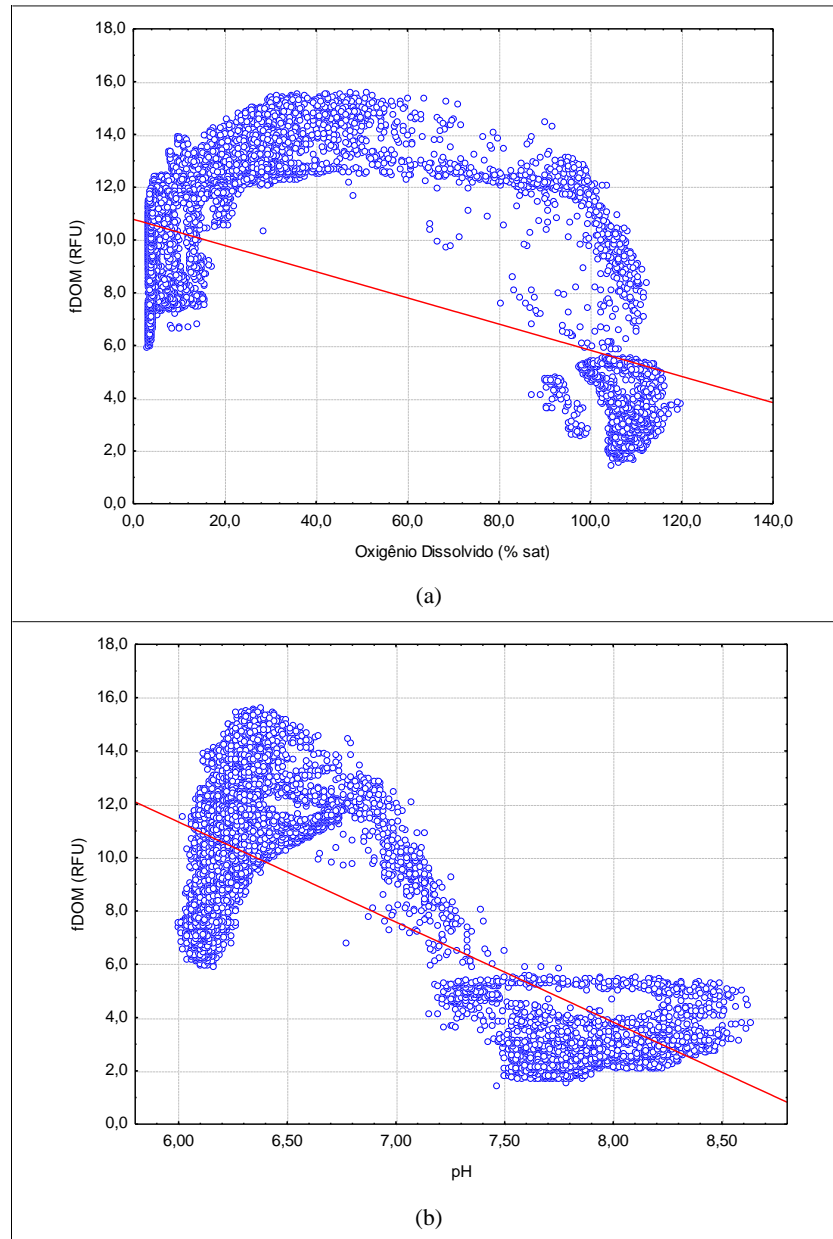
Figura 30 - Variação média mensal da matéria orgânica dissolvida colorida fluorescente (fDOM) em relação à profundidade no período de março de 2019 a fevereiro de 2020 no reservatório de Ribeirão das Lajes.



Fonte: A autora, 2022.

A Figura 31 mostra a Correlação de Spearman entre o (fDOM), o OD (% saturação) e o pH. Nesta figura podemos comprovar a correlação negativa entre o fDOM e o OD e pH, como já havia sido comentado acima.

Figura 31 - Correlações de Spearman.



Legenda: (a) Correlação de Spearman entre matéria orgânica colorida fluorescente (fDOM) e o oxigênio dissolvido (% saturação) e (b) Correlação de Spearman entre fDOM e o pH.

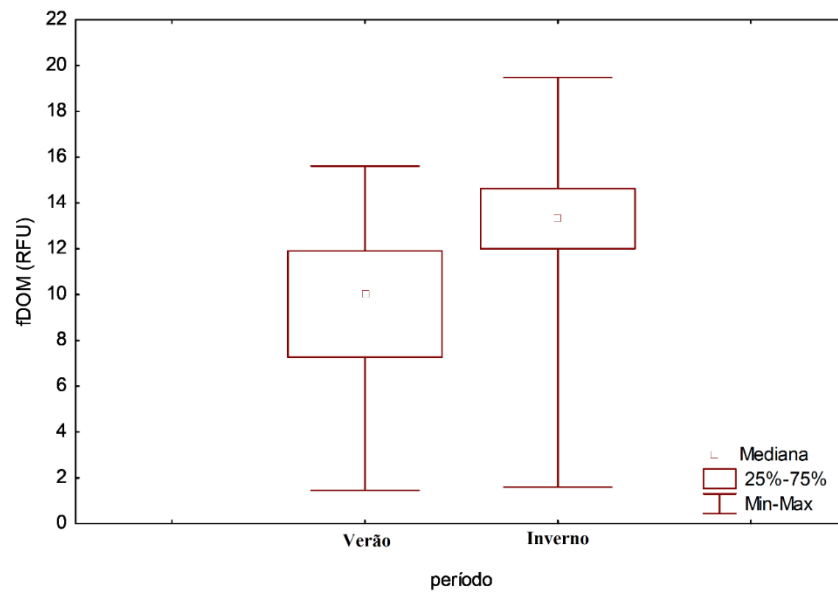
Fonte: Cássia de Oliveira (Comunicação pessoal, 2022).

A região onde ocorre o aumento dos valores de fDOM (metalímnio) coincide com a região onde ocorre a diminuição do OD, que é utilizado para a degradação da matéria orgânica existente nesta camada. À medida que a profundidade aumenta, o fDOM vai sendo mantido constante, pois quando o OD se encontra quase inexistente, os processos anaeróbicos são muito mais lentos, o que faz com que, provavelmente, a MO chegue mais refratária.

O teste de Kruskal-Wallis mostrou que, mesmo a coluna d'água apresentando estratificação ou não, os valores de fDOM obtidos são considerados diferentes significativamente entre as profundidades de coleta ($p=0,000$).

De acordo com o teste de Mann-Whitney há uma diferença significativa ($p=0,000$) nos valores obtidos de fDOM nos períodos de verão e inverno. Essa diferença está ilustrada na Figura 32.

Figura 32 - Matéria orgânica dissolvida colorida fluorescente (fDOM).



Legenda: Durante os meses de verão e inverno.

Fonte: Cássia de Oliveira (Comunicação pessoal, 2022).

6.6 Análise das Oscilações de Curta Duração.

Para que fosse possível observar mais profundamente o que ocorreu com a estabilidade da coluna d'água do reservatório de Ribeirão das Lajes no período em estudo (outubro de 2018 a fevereiro de 2020) foram feitas discussões físicas e químicas em decorrência de eventos meteorológicos que podem durar de 3 a 20 dias (escala sinótica) em que a estabilidade da coluna d'água possuiu alterações.

Aqui foram feitos gráficos de curto período de RWCS entre a camada superficial e a camada profunda para mostrar a existência ou não de uma oscilação na estabilidade da coluna d'água e discutir sobre a interferência de fatores atmosféricos sobre estas águas. Também foram realizados gráficos de precipitação (mm) versus velocidade média mensal do vento (m.s^{-1}) a fim de mostrar os fatores meteorológicos ocorrentes em Lajes quando em passagem dessas frentes frias e também gráficos de temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$) versus temperatura da água ($^{\circ}\text{C}$) em diferentes profundidades para observarmos a ocorrência ou não de um aprofundamento da termoclina e mostrar as diminuições de temperatura das camadas superficiais quando em presença de frentes frias.

A Figura 33 mostra a estabilidade da coluna d'água do reservatório de Ribeirão das Lajes e a Figura 34 mostra a precipitação (mm) versus velocidade média mensal do vento (m.s^{-1}) durante o período de 1 de novembro a 30 de novembro de 2018. Através do gráfico da Figura 33, pode-se observar que a coluna d'água durante este período está, em sua grande parte, em transição, tanto para momentos de forte estabilidade, como para momentos de estabilidade mais fraca.

No início do mês, o RWCS aumentou de 158,79 no dia 01 para 202,18 no dia 03 e logo depois sofreu uma redução, chegando a seu menor valor (100,55) no dia 10. Poucos dias depois, a estabilidade da coluna d'água voltou a se encontrar mais forte, chegando ao seu maior valor de RWCS deste mês (206,96) no dia 14, porém, 5 dias depois, a estabilidade voltou a se encontrar mais fraca (por volta de 140), se mantendo assim praticamente até o final do mês.

Esses decaimentos de RWCS seguidos de aumentos podem ser explicados por fatores atmosféricos, como passagens de frentes frias, que alteram as temperaturas atmosféricas e fazem com que as temperaturas nos primeiros metros da coluna d'água

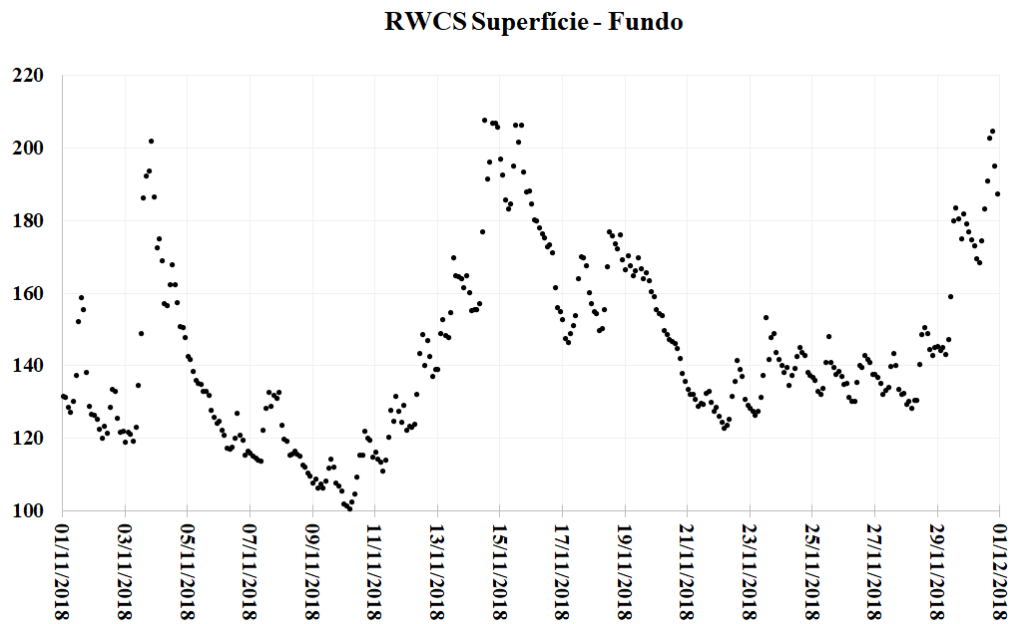
do reservatório também sofram alterações e isto, por sua vez, impacta na estrutura da estabilidade térmica do reservatório.

Segundo o CPTEC – INPE (2018) (Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), no dia 01 de novembro, uma frente fria avançou do Rio Grande do Sul ao litoral do Paraná com deslocamento pelo litoral da região Sul. Em seu deslocamento pelo Sul, juntamente com a presença de divergência em altitude e dos jatos de baixo níveis, houve forte instabilidade em diversas áreas do sudeste e no Rio de Janeiro as pancadas de chuva foram localmente fortes com raios, rajadas de vento forte e queda de granizo isolado. No dia 04, a passagem de um cavado contribuiu para a ocorrência de pancadas de chuva forte e isoladas no Rio. No dia 05 atuou um cavado invertido no Atlântico nas proximidades do Sudeste, que organizou uma convergência de umidade para a região, provocando chuva isolada no litoral do Rio. Estes fatos foram importantes para a diminuição da estabilidade da coluna d'água até o dia 09.

Já no dia 16, houve a presença de um sistema frontal sobre o Oceano Atlântico, o qual alinhou a convergência de umidade entre algumas regiões. Entre os dias 19 e 21, o sistema frontal permaneceu estacionário na altura do sudeste e contribuiu para a formação de uma Zona de Convergência de Umidade (ZCOU), que manteve a chuva concentrada entre o sul da Região Amazônica, o Centro-Oeste e o Sudeste do país. Entre esses dias, os volumes de chuva foram significativos no Rio de Janeiro, com Lajes apresentando 23,79 mm de precipitação (Figura 34). Isto fez com que existisse uma baixa estabilidade da coluna d'água de Lajes entre os dias 21 e 29 de novembro. As pequenas oscilações existentes dia 22 ao 28 serão comentadas mais abaixo.

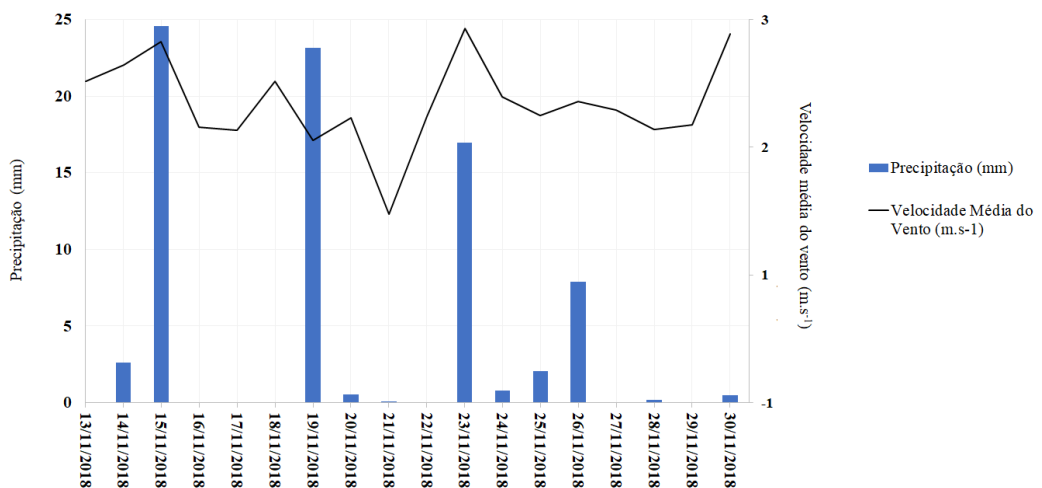
Na Figura 34 só há dados de temperatura atmosférica a partir do dia 13 de novembro, pois foi quando os parâmetros meteorológicos começaram a serem medidos no reservatório de Ribeirão das Lajes.

Figura 33 - Variação da estabilidade térmica relativa (RWCS) da coluna d'água do reservatório de Ribeirão das Lajes no período de 01 a 30 de novembro de 2018.



Fonte: A autora, 2022.

Figura 34: Variação diária da precipitação (mm) e da velocidade média do vento (m.s-1) no reservatório de Ribeirão das Lajes no período de 01 a 30 de novembro de 2018.



Fonte: A autora, 2022.

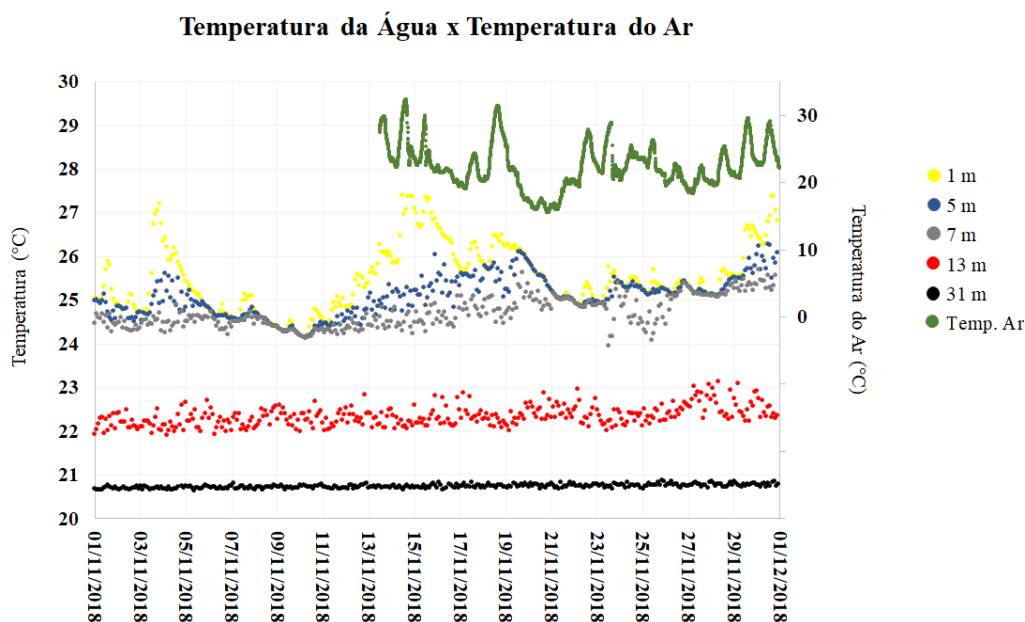
Através da Figura 35, pôde-se notar que a temperatura atmosférica medida no reservatório de Ribeirão das Lajes também sofreu com oscilações em decorrência de fatores atmosféricos passageiros sobre a região sudeste e o estado do Rio de Janeiro. A

temperatura atmosférica exibe as mesmas quedas e picos exibidos pelo gráfico de RWCS. O que corrobora o fato da estabilidade desta coluna d'água estar sob influência dos fatores atmosféricos que ocorrem na região.

Como pode ser observado, no dia 19 as temperaturas atmosféricas são mais baixas do que no dia anterior, as quais se encontram em 21,8 °C e depois chegam a 15 °C, e permanecem entre esses valores até o dia 22. Essas baixas temperaturas do ar fizeram com que os primeiros metros da coluna d'água também diminuíssem de temperatura durante esses dias. As camadas de 1, 5 e 7 metros se encontraram em homogeneidade, o que mostra que durante esses dias, essas camadas de água sofreram mistura entre elas. A partir do dia 22 até o dia 29, os valores de RWCS demonstraram que houve oscilações na estabilidade da coluna d'água, com valores de RWCS entre 126 e 153. Através da Figura 34, notamos que o dia 19 foi um dia com alta precipitação (23,16 mm) após dias de ventos com velocidade média de 2,0 m.s⁻¹, o que contribuiu para a diminuição da temperatura atmosférica nos próximos dias. As oscilações de temperatura atmosférica observadas nos dias seguintes são justificadas pelo aumento da velocidade média do vento até o final do mês e pelas fortes precipitações ocorrentes nos dias 23 e 26 de novembro.

A camada de 13 metros é a primeira camada no metalímnio, como é mostrado pelo espaço entre a camada de 7 metros e esta (Figura 35). Nesta camada já é observado um grande declínio da temperatura da água (termoclina) e, portanto, já é uma camada muito estável em relação às camadas epilimnais. Não há interferência atmosférica nessa camada e ela mantém com temperaturas relativamente estáveis, entre 21,93 e 23,13 °C, durante todo o mês de novembro. O mesmo ocorre com a camada de 31 metros, a qual está presente no hipolímnio. Esta camada não sentiu está isolada dos procesos que ocorrem nos primeiros metros da coluna d'água e se manteve com temperatura praticamente constante durante todo o mês.

Figura 35 - Variação da temperatura da água (°C) em determinadas profundidades do reservatório de Ribeirão das Lajes e temperatura atmosférica no período de 01 a 30 de novembro de 2018.

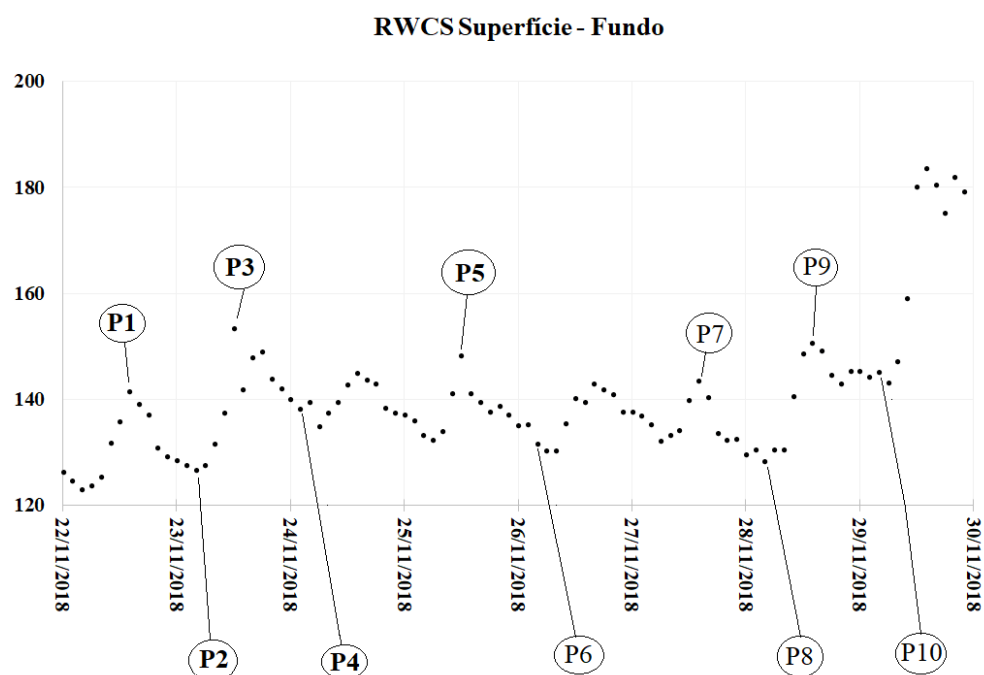


Fonte: A autora, 2022.

A Figura 36 mostra as variações diárias de oscilação da estabilidade da coluna d'água em função das diferenças de temperatura diária e noturna. Na tabela 6 mais abaixo estão apresentados os valores dos pontos mostrados na Figura 36, juntamente com suas respectivas datas, horários, valores de RWCS, valores de temperatura atmosférica e variação destas temperaturas (ΔT).

A diferença de temperatura atmosférica diurna e noturna é capaz de interferir na estabilidade da coluna d'água fazendo com que durante o período noturno, essas águas se encontrem mais resfriadas e, conseqüentemente, menos estáveis quando comparadas ao período diurno. Então, essas oscilações diárias são importantes, mas ainda inferiores às oscilações das estabilidades causadas pela passagem de sistemas frontais.

Figura 36 - Variação da estabilidade térmica relativa (RWCS) da coluna d'água do reservatório de Ribeirão das Lajes no período de 22 a 29 de novembro de 2018.



Fonte: A autora, 2022.

Tabela 6 - Datas, valores de RWCS, temperaturas atmosféricas (°C) e variações de temperatura (°C) dos pontos mostrados na Figura 36.

Pontos	Data	RWCS	Temperatura Atmosférica (°C)	ΔT (°C)
P1	22/11 - 14:00	141,58	27,3	5,8
P2	23/11 - 04:00	126,61	21,5	
P3	23/11 - 12:00	153,33	27,4	5,7
P4	24/11 - 04:00	139,57	21,7	
P5	25/11 - 12:00	148,29	26,0	5,9
P6	26/11 - 04:00	131,53	20,1	
P7	27/11 - 14:00	143,52	22,1	2,2
P8	28/11 - 04:00	128,32	19,9	
P9	28/11 - 14:00	150,65	25,2	4,3
P10	29/11 - 04:00	145,22	20,9	

Fonte: A autora, 2022.

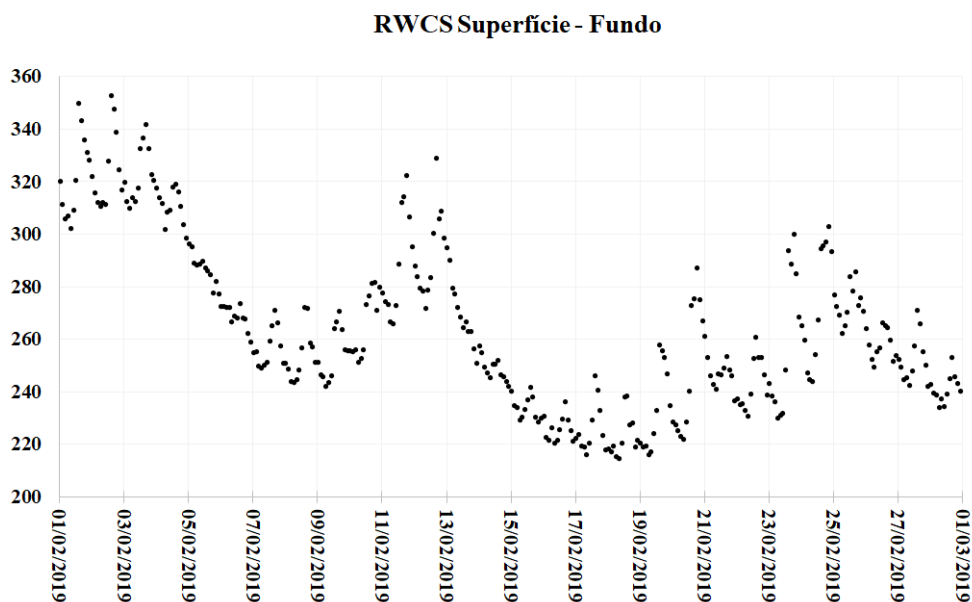
Nas Figuras 37 e 38 abaixo estão demonstradas a estabilidade da coluna d'água e a precipitação (mm) versus velocidade média mensal do vento ($m.s^{-1}$) no período de 01 a 28 de fevereiro de 2019. Observa-se a alta estabilidade a qual estas águas se encontram, com RWCS sempre acima de 200 e chegando a ultrapassar 300 em alguns dias deste mês. Essa forte estabilidade se configura em razão da maior temperatura atmosférica existente durante esse mês (verão), o que faz com que as águas sejam mais aquecidas em superfície e possuam uma diferença de temperatura maior em relação às camadas mais profundas. O maior valor de RWCS foi de 352,78 no dia 02 e o menor foi de 214,67 no dia 18.

Fevereiro de 2019 se inicia com forte estabilidade, porém, no dia 04 começa a ocorrer uma diminuição da estabilidade da coluna d'água, a qual passou de 341,98 no dia 03 para 246,16 no dia 07. Isso ocorreu devido ao avanço de uma frente fria pelo sudeste que favoreceu a ocorrência de pancadas de chuva, como no dia 4 que teve 83,43 mm de precipitação diária (Figura 38). A partir do dia 05, a frente fria se afastou para o oceano, mas ainda manteve uma região de convergência de umidade sobre o sudeste do Brasil, o que contribuiu para chuvas constantes e acumulados pluviométricos expressivos como pode ser notado através da Figura 38 (CPTEC – INPE, 2019).

O dia 10 de fevereiro foi de predomínio do sol e poucas nuvens, devido à presença da alta pressão em médios níveis que inibe a formação de nebulosidade significativa, entretanto, nestas áreas a termodinâmica e o escoamento em altitude podem formar instabilidades de forma isolada. No dia 11, houve pancadas de chuva típicas de verão na região sudeste (13,91 mm em Lajes). No dia 12 o RWCS se encontrava em 329,26, rementendo à situação de coluna d'água estável. Entretanto, no dia 13 foi encontrado o menor valor de RWCS determinado no mês (214,67). Isso ocorreu devido a uma frente fria avançou até o litoral norte de São Paulo, associada ao escoamento da alta pós frontal e provocou acumulados significativos de precipitação em algumas regiões e no sul do Rio de Janeiro, mas Lajes somente apresentou um acumulado de 23,87 mm de chuva. Este sistema meteorológico persistiu até o dia 17, caracterizando-se como Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). No dia 14 e 15, a frente fria se deslocou lentamente pelo litoral do Rio de Janeiro e ficou alinhada com a ZCOU, que estava estabelecida desde o Rio de Janeiro, Minas Gerais, Goiás, Mato Grosso e sul do Amazonas. Os acumulados de precipitação nesses dias foram significativos no Rio de Janeiro (CPTEC – INPE, 2019), mas não no reservatório de

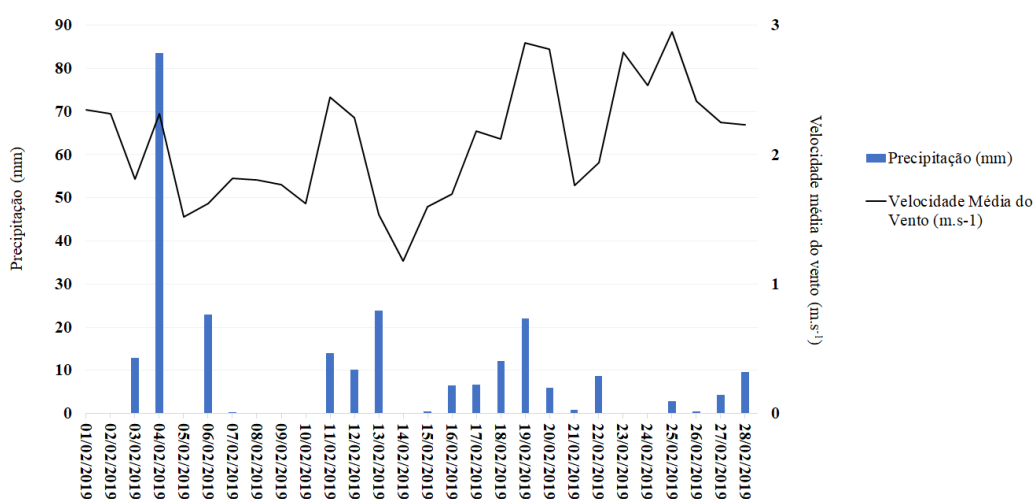
Lajes, como pode-se notar através da Figura 38, onde nos dias 14 e 15 o acumulado de chuva foi irrelevante, sendo somente de 0,48 mm.

Figura 37 - Variação da estabilidade térmica relativa (RWCS) da coluna d'água do reservatório de Ribeirão das Lajes no período de 01 a 28 de Fevereiro de 2019.



Fonte: A autora, 2022.

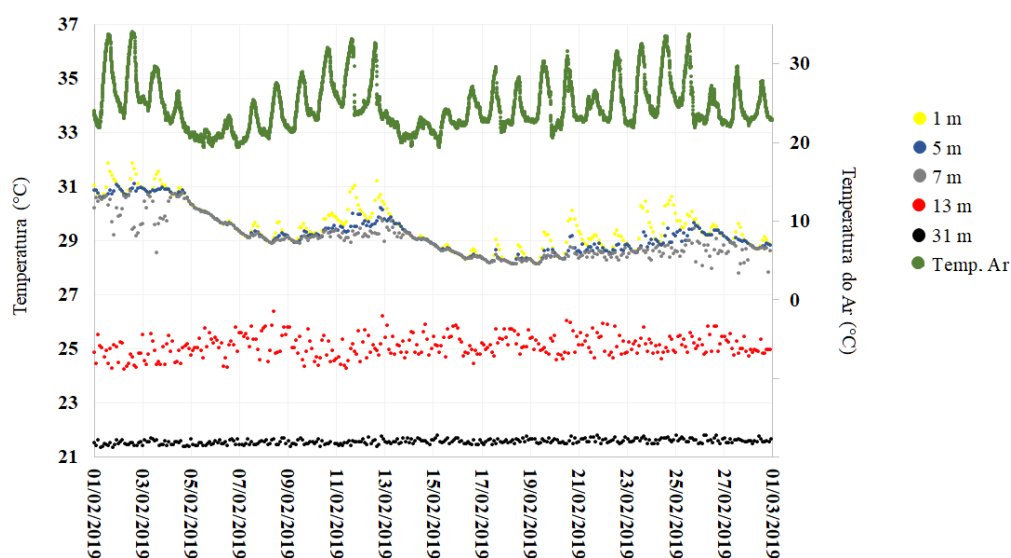
Figura 38 - Variação diária da precipitação (mm) e da velocidade média do vento ($m.s^{-1}$) no reservatório de Ribeirão das Lajes no período de 01 a 28 de fevereiro de 2019.



Fonte: A autora, 2022.

Essas frentes frias acima descritas tiveram influência sobre a diminuição da temperatura atmosférica em Lajes, como pode ser mostrado através das cavas mais pronunciadas existentes nos valores de temperatura atmosféricas na Figura 39. A temperatura do ar no dia 02 se encontrou a 33,8 °C e, logo depois, no dia 03, chegou a 24 °C. Situação semelhante ocorreu no dia 12, quando a temperatura atmosférica estava em 32,1 °C e no dia 13, esta era igual a 19,9 °C. Essa grande variação de temperatura em questão de 24 horas (9,8 e 12,2 °C, respectivamente) mostra a existência de uma passagem de frente fria nesses dias.

Figura 39 - Variação da temperatura da água (°C) em determinadas profundidades do reservatório de Ribeirão das Lajes e temperatura atmosférica no período de 01 a 28 de fevereiro de 2019.



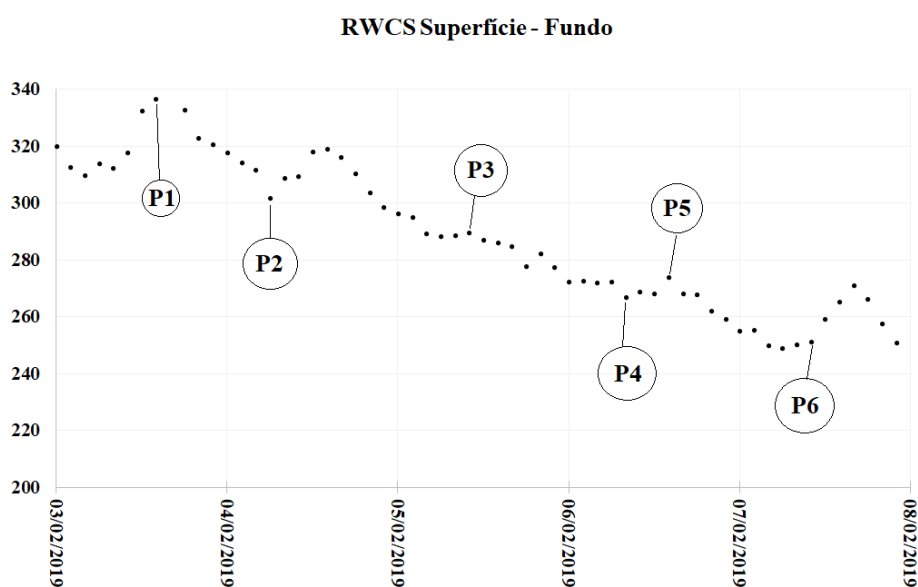
Fonte: A autora, 2022.

As Figuras 40 e 41 ressaltam os períodos de 03 a 07 e 12 a 20 de fevereiro de 2019 com o objetivo de mostrar as diferenças de temperatura antes e durante as frentes frias. A tabela 7 abaixo mostra as diferenças de temperatura (°C) em relação a esses dias.

As diminuições da temperatura do ar se refletiram nos primeiros metros da coluna d'água, onde foi observada uma diminuição das temperaturas, o que gerou períodos de menores estabilidade dessas águas. Nos dias 05 a 07, pode-se observar que as camadas de 1, 5 e 7 metros sofreram mistura, pois não há como distinguir as 3 camadas através das diferentes cores no gráfico apresentado na Figura 39. Quando a

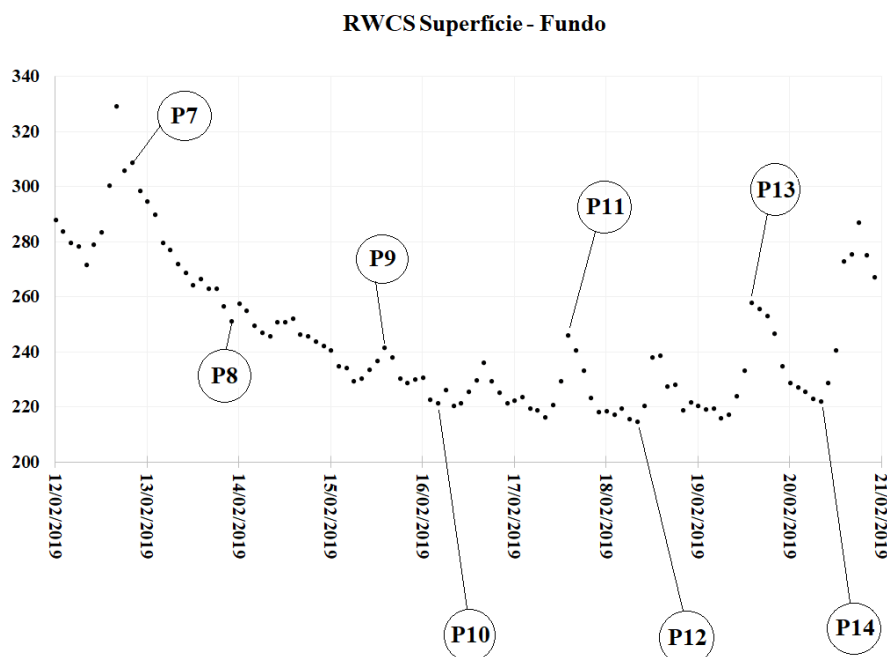
temperatura do ar voltou a aumentar (a partir do dia 07), já é possível notar as 3 camadas distintas a partir do dia 11. Porém, do dia 14 ao 17, as 3 primeiras camadas do epilímnio novamente sofrem uma mistura e depois voltaram a se manter separadas, como é visto no gráfico da Figura 39. Essas misturas das águas epilimnais são resultados das entradas de frentes frias nesses dias, que são representadas por menores temperaturas atmosféricas e aumento da velocidade dos ventos (Figura 38).

Figura 40 - Variação da estabilidade térmica relativa (RWCS) da coluna d'água do reservatório de Ribeirão das Lajes no período de 01 a 07 de fevereiro de 2019.



Fonte: A autora, 2022.

Figura 41 - Variação da estabilidade térmica relativa (RWCS) da coluna d'água do reservatório de Ribeirão das Lajes no período de 12 a 20 de fevereiro de 2019.



Fonte: A autora, 2022.

Tabela 7 - Datas e horários, valores de RWCS, de temperatura atmosférica (°C) e variação dos valores de temperatura (°C) dos primeiros metros da coluna d'água nos dias de diminuição da estabilidade segundo as Figuras 40 e 41.

Pontos	Data	RWCS	Δ RWCS	Temperatura Atmosférica (°C)	Δ T (°C)
P1	03/02 – 14:00	336,89	34,96	29,4	6,3
P2	04/02 – 06:00	301,93		23,1	
P3	05/02 – 10:00	289,84	17,32	20,5	0,1
P4	06/02 – 00:00	272,52		20,4	
P5	06/02 – 14:00	273,93	22,66	23,3	1,5
P6	07/02 – 10:00	251,27		21,8	
P7	12/02 – 20:00	308,86	44,38	24,0	2,0
P8	13/02 – 12:00	264,48		22,0	
P9	15/02 – 14:00	241,75	20,16	23,9	1,7
P10	16/02 – 04:00	221,59		22,2	
P11	17/02 – 14:00	246,25	31,58	29,2	4,7
P12	18/02 – 08:00	214,67		24,5	
P13	19/02 – 14:00	257,91	35,89	30,3	7,0
P14	20/02 – 08:00	222,02		23,3	

Fonte: A autora, 2022.

Como mostrou a Tabela 7, mesmo uma pequena variação de temperatura atmosférica (por exemplo, 1,5 °C) foi capaz de causar alguma oscilação, mesmo que mínima, na coluna d'água.

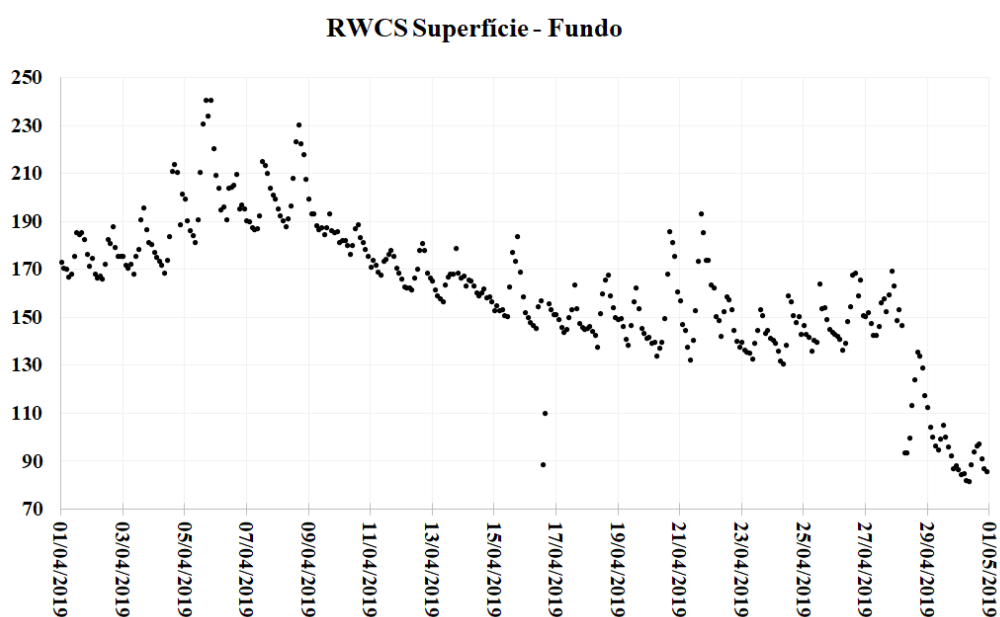
A Figura 42 mostra a variação da oscilação da coluna d'água no mês de abril de 2019. Como pode ser observado, abril é um mês onde a coluna d'água se encontrou com tendência à estratificação (estabilidade) durante a maior parte do mês. No entanto, o teste de Kruskal-Wallis apontou que há diferença significativa entre as camadas da coluna d'água ($p = 0,000$).

No dia 08, a coluna d'água de Lajes se encontrou estável com RWCS de 230,48, porém, um dia depois (dia 09), esta estabilidade se tornou mais fraca com valor de RWCS de 184,67. Isso ocorreu porque no dia 07, um sistema frontal atuou de forma estacionária entre o norte do Paraná e o sul de São Paulo. Um cavado em níveis médios da atmosfera favoreceu a ocorrência de pancadas de chuva ao longo do dia sobre grande parte do Rio de Janeiro, fato que não ocorreu em Lajes, como pode ser notado através da Figura 43 que mostra que não houveram pancadas de chuva no dias 7 e 8 de abril. A partir do dia 08, o cavado presente em médios e altos níveis organizou o escoamento em baixos níveis e propiciou condições para a formação de um canal de umidade entre a região Amazônica e o Sudeste do Brasil. Com isso, houve a formação de uma Zona de Convergência de Umidade (ZCOU) que atuou entre os dias 08 e 10. No dia 09, a ZCOU se posicionou mais para o norte e as chuvas mais intensas atingiram grande parte Rio de Janeiro, inclusive em Lajes, que teve 57,7 mm de precipitação neste dia (Figura 43) (CPTEC – INPE, 2019).

O maior valor de RWCS calculado para o mês de abril de 2019 ocorreu no dia 05 (240,98), já o menor valor foi encontrado no dia 30 (81,81), logo após uma queda na estabilidade dessas águas no dia 28, que, a partir deste dia até o final do mês, se encontrou instável.

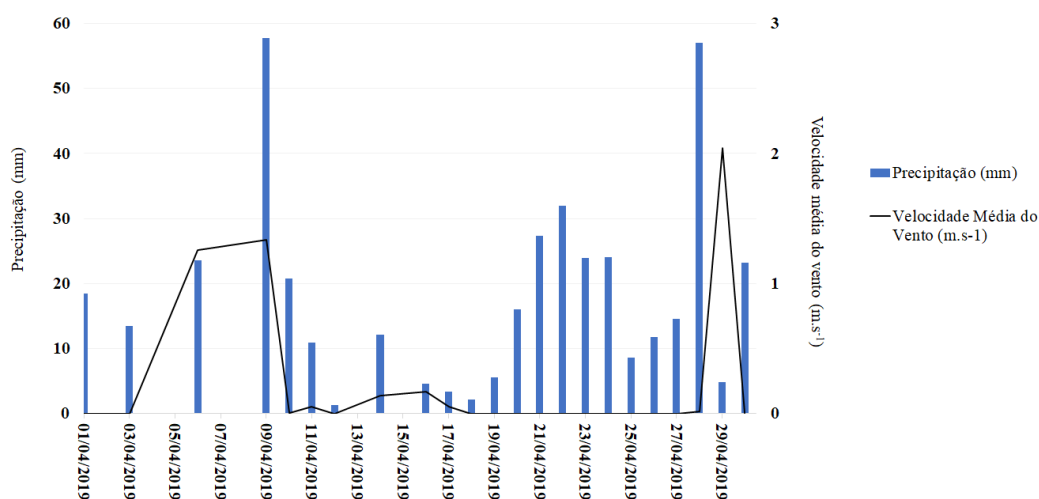
No dia 28, houve o avanço de uma frente fria sobre o sul do Brasil, a qual, no dia 29 se deslocou pelo litoral da região Sudeste (Lajes com ventos de $2,04 \text{ m.s}^{-1}$) e, devido a isto, a circulação pós-frontal ocasionou chuvas persistentes em áreas do litoral sul do Rio de Janeiro, onde ocorreram volumes expressivos de precipitação (CPTEC – INPE, 2019). Do dia 28 até o dia 30 de abril, Lajes teve 85 mm de chuva o que contribuiu para a diminuição da temperatura atmosférica comentada na Figura 44.

Figura 42 - Variação da estabilidade térmica relativa (RWCS) da coluna d'água do reservatório de Ribeirão das Lajes no período de 01 a 30 de abril de 2019.



Fonte: A autora, 2022.

Figura 43 - Variação diária da precipitação (mm) e da velocidade média do vento ($m.s^{-1}$) no reservatório de Ribeirão das Lajes no período de 01 a 30 de abril de 2019.



Fonte: A autora, 2022.

As medidas de temperatura atmosférica no mês de abril foram realizadas em menores quantidades devido a um problema no sensor meteorológico e, em função disso, com o intuito de melhorar a visualização e a compreensão destes dados, foi

utilizado o gráfico de linha para representar a temperatura atmosférica neste mês (Figura 44).

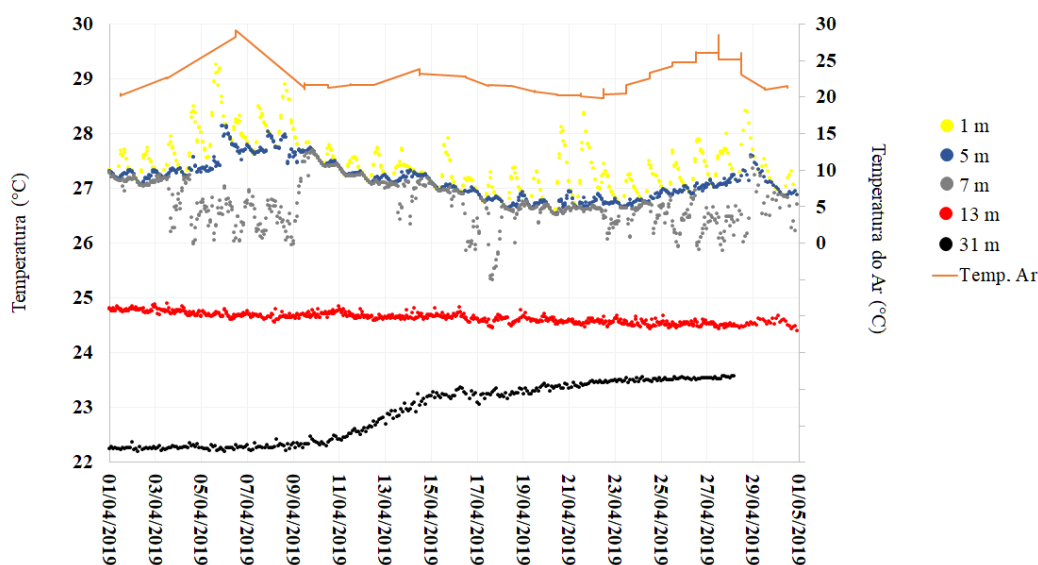
O mês de abril, por ser um mês do outono e ainda se encontrar com as temperaturas atmosféricas, em sua grande maioria, superiores a 25 °C, fez com que as camadas mais rasas de água ainda se encontrassem aquecidas, fazendo com que elas ainda estivessem separadas do restante da coluna d'água por uma forte termoclina existente abaixo dos 7 metros de profundidade.

No dia 06 de abril, houve o maior pico de temperatura do ar nesse mês, com 28,8 °C, o que provovou um aquecimento da camada superficial (1 metro) do reservatório, com temperatura chegando a 28,32 °C, também no dia 06. Quando há a diminuição da temperatura atmosférica, as águas até 7 metros também se resfriam, como pode ser observado nos dias 9 a 13 de abril, onde as camadas de 5 e 7 metros se encontravam com temperaturas muito próximas ou iguais. A camada superficial se mantém distinta, pois mesmo a menor quantidade de calor que a atmosfera libera para as águas, é absorvida por esta camada.

No dia 28 de abril, quando há outra diminuição proeminente da temperatura atmosférica, as 3 camadas epilimnais novamente sofrem uma diminuição de suas temperaturas e se encontram com temperaturas abaixo dos 27 °C.

A temperatura da camada de 13 metros de profundidade não reflete as variações atmosféricas, porém, a camada hipolimnal de 31 metros apresenta um aumento de temperatura a partir do dia 11 de abril. Até o dia 11, esta camada se encontrava com temperatura em torno dos 22 °C, porém, a partir deste dia esta camada chegou a se encontrar com 23,57 °C. Esse aquecimento das águas profundas pode ser devido a uma diminuição da estabilidade da coluna d'água por um período de tempo maior o que provoca um apronfundamento da zona de mistura, levando a um aumento das temperaturas no hipolímnio.

Figura 44 - Variação da temperatura da água (°C) em determinadas profundidades do reservatório de Ribeirão das Lajes e temperatura atmosférica no período de 01 a 30 de abril de 2019.



Fonte: A autora, 2022.

A Figura 45 mostra a estabilidade da coluna d'água durante o mês de julho de 2019. Diferentemente do que ocorreu no mês de fevereiro, todo o mês de julho apresentou a coluna d'água com características instáveis (RWCS sempre abaixo de 100) devido às baixas temperaturas atmosféricas que persistem durante o inverno juntamente com uma maior ação dos ventos.

Ao analisar os valores de RWCS para avaliar a estabilidade da coluna d'água, o teste de Kruskal-Wallis mostrou que a estratificação é mais intensa durante os meses de verão. Durante o período de inverno, algumas camadas da coluna d'água apresentaram instabilidade.

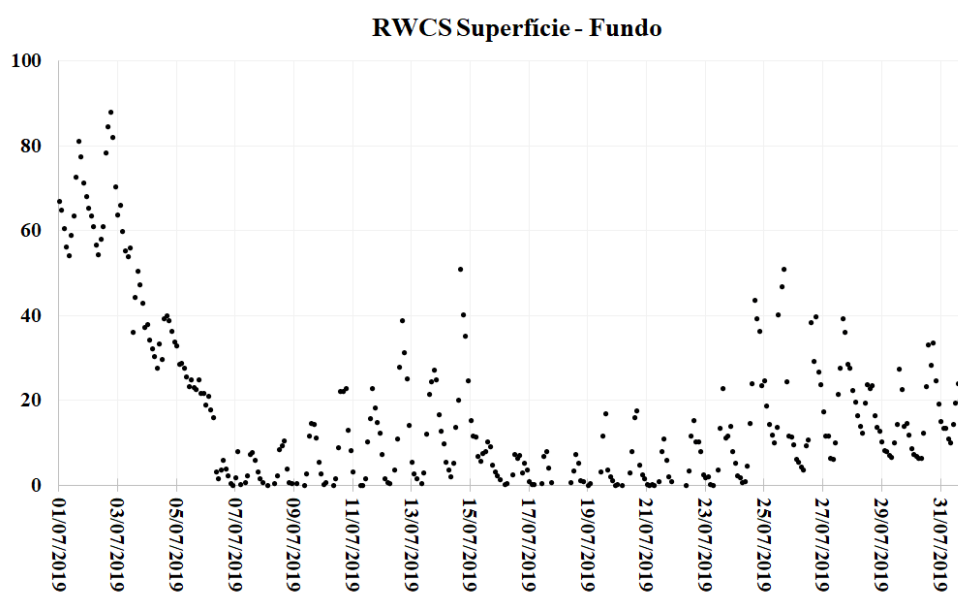
Pode-se observar que o maior valor de RWCS encontrado durante este mês foi de 88,04 no dia 02 e os menores se encontraram na faixa de 0 entre os dias 07 e 24. No dia 03 já é possível notar uma redução do valor de RWCS, onde este chega a 27,76 no dia 04 e 16,14 no dia 06.

Nos dias 01 e 02 de julho, uma frente fria atuou de forma estacionária desde o sul da Bolívia, Paraguai e Santa Catarina. Simultaneamente, outros dois cavados, um vindo de sul, intenso e baroclínico e o outro do Pacífico, se aproximaram do sistema estacionário. Assim, nos dias 03 e 04, estes sistemas se acoplaram, o que fez com que a

frente fria avançasse para áreas do sudeste, com declínio das temperaturas. No dia 05, a frente fria alcançou o sul da região norte e, em seu deslocamento, favoreceu chuvas persistentes e pontualmente intensas entre o leste de São Paulo, sul de Minas Gerais e o Rio de Janeiro.

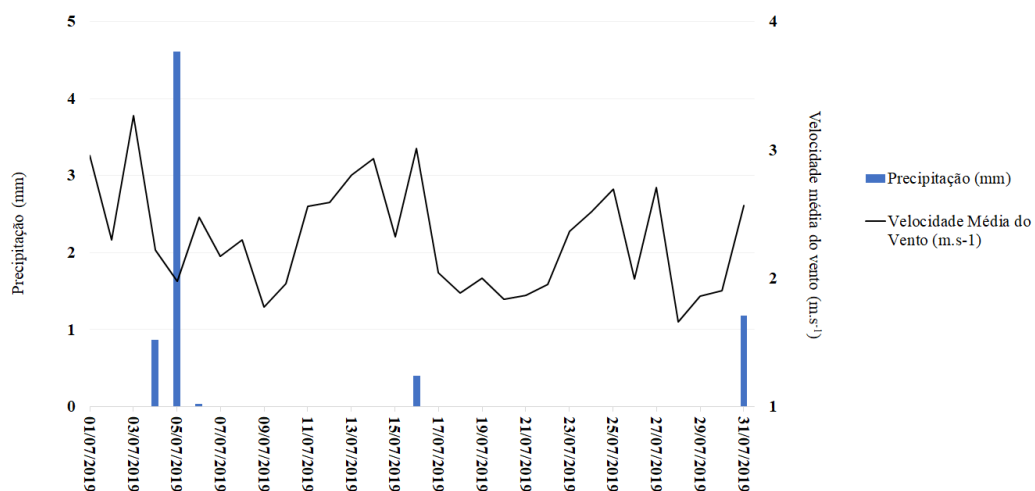
Como pode ser notado na Figura 46, o reservatório de Lajes não sofreu com chuvas intensas e diárias durante julho, apenas chuvas fracas que ocorreram em 5 dias deste mês, ressaltando assim, o quanto este mês é um mês seco. Seu dia de maior precipitação foi o dia 5 e mesmo assim, esteve dia teve apenas 4,61 mm. Porém, chuvas persistentes ocorrentes em outras regiões do Estado fizeram com que as temperaturas diminuíssem na maior parte da região sul, sudeste e centro-oeste do Brasil. Os dias seguintes ao dia 5 foram de instabilidade devido a uma frente fria que avançou pela região sudeste no dia 16 e causou chuvas (CPTEC – INPE, 2019), mas em Lajes, a precipitação só alcançou 0,4 mm neste dia.

Figura 45 - Variação da estabilidade térmica relativa (RWCS) da coluna d'água do reservatório de Ribeirão das Lajes no período de 01 a 31 de Julho de 2019.



Fonte: A autora, 2022.

Figura 46 - Variação diária da precipitação (mm) e da velocidade média do vento (m.s^{-1}) no reservatório de Ribeirão das Lajes no período de 01 a 31 de julho de 2019.



Fonte: A autora, 2022.

Como citado acima, a coluna d'água no mês de julho é dita como instável, com uma grande tendência à ocorrência de mistura de suas águas, caso os ventos no reservatório de Ribeirão das Lajes fossem mais fortes para que este fato realmente pudesse acontecer. A temperatura atmosférica no mês de julho se encontra em torno dos 15 a 20 °C, com a maior temperatura tendo ocorrido no dia 03, iguala 27,8 °C, e a menor temperatura no dia 07, 11,8 °C. Essas menores temperaturas do ar influenciam no resfriamento das camadas superficiais do reservatório (Figura 47).

Primeiramente, podemos notar a diferença entre este gráfico e os já discutidos acima em relação ao aprofundamento das camadas epilimnais, as quais, durante praticamente todo este período, se encontraram juntamente com a camada de 13 metros, e aqui pode ser observada uma ausência de espaço (notado nos gráficos anteriores) entre a camada de 7 e 13 metros. Isto demonstra que durante esse período, não há a existência de uma termoclina rasa, pois as temperaturas epilimnais se encontraram muito próximas das temperaturas do metalímnio (Figura 47).

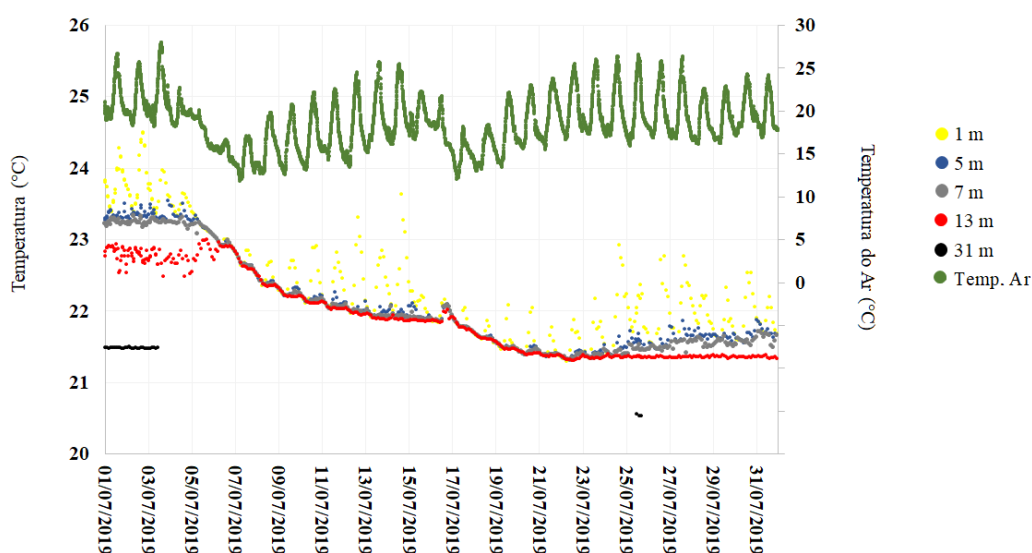
Por causa do resfriamento da atmosfera, principalmente durante o período noturno, a radiação que é emanada para as águas do reservatório durante o dia não consegue se manter durante a noite. Por isto, é possível observar que a superfície possui temperaturas um pouco maiores em determinados momentos do que as camadas de 5 e 7 metros que se mantiveram juntas durante todo o mês de julho.

A temperatura do ar diminuiu de 19,7 °C no dia 04 para 11,8 no dia 07 e isso fez com que as camadas epilimnais e a metalimnal de 13 metros sofressem mistura

durante esses dias. Quando a temperatura atmosférica começa a aumentar um pouco a partir dos dias 22 e 23, é possível verificar uma pequena separação da camada de 13 metros em relação às camadas do epilímnio, o que mostra o quanto as camadas superficiais se encontram sob influência do aquecimento ou não aquecimento da atmosfera.

Infelizmente, durante este mês, a sonda sofreu uma falha e os dados de temperatura das camadas hipolimnais não puderam ser medidos do dia 04 ao dia 24 de julho e após o dia 25. Sendo assim, não é possível realizar uma discussão sobre o hipolímnio em função desta falta de dados.

Figura 47 - Variação da temperatura da água (°C) em determinadas profundidades do reservatório de Ribeirão das Lajes e temperatura atmosférica no período de 01 a 31 de julho de 2019.



Fonte: A autora, 2022.

A Figura 48 abaixo mostra as oscilações de estabilidade da coluna d'água de Lajes no mês de setembro de 2019. Em setembro, apesar de ainda ser um mês de inverno, em geral são observadas temperaturas atmosféricas maiores que o mês de julho, por exemplo. A coluna d'água do reservatório de Lajes neste mês ainda se encontrava com períodos de instabilidade e, em alguns dias, como, neste caso, do dia 11 ao 25, com períodos de tendência à estabilidade.

O mês de setembro se iniciou com RWCS em torno de 70, o que denota que estas águas estavam instáveis e no dia 07, o RWCS diminuiu ainda mais, chegando ao

menor valor encontrado para este mês, 39,68. Após esta queda, a coluna d'água ficou um pouco mais estável e o valor de RWCS chegou ao seu máximo medido neste mês, 183,65. Entretanto, no dia 21, estas águas voltaram a ter uma tendência de instabilidade com uma diminuição em seus valores de RWCS (Figura 48).

No início do mês de setembro, um cavado de onda curta em níveis médios e o posterior avanço de um sistema frontal contribuíram para a manutenção das instabilidades sobre o Rio de Janeiro. No dia 03, um sistema frontal avançou pelo litoral da região sul e reforçou a convergência de umidade entre o Paraná e São Paulo, faixa na qual fez o tempo permanecer instável e com condição para chuvas. Isto fez com que houvessem pancadas de chuva em parte do Rio de Janeiro com potencial para temporais em pontos isolados.

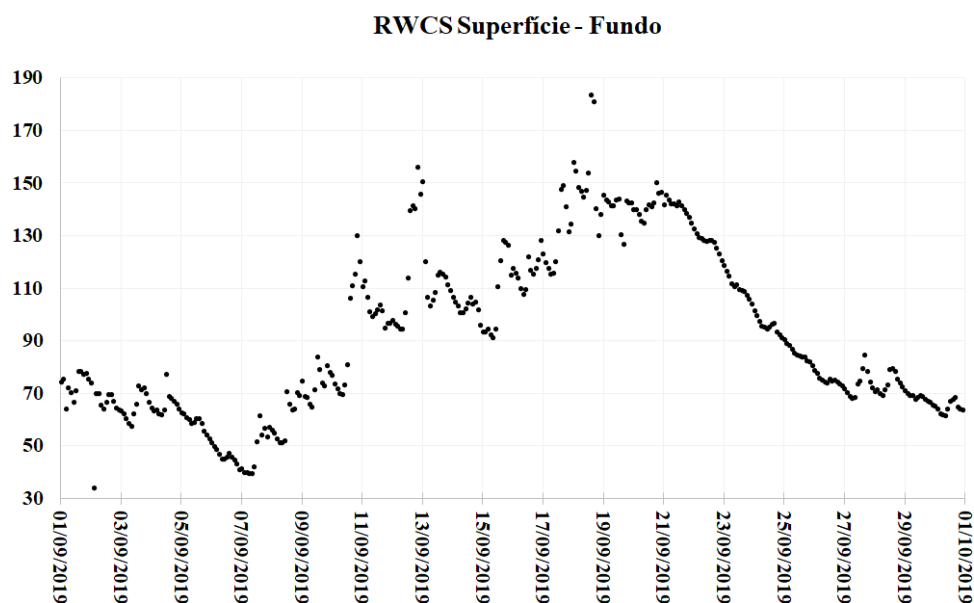
No reservatório de Ribeirão das Lajes, não houveram muitos dias de chuva. O dia 3 de setembro foi o dia de maior precipitação deste mês, com 26,55 mm (Figura 49). Fato este que está ligado a passagem do sistema frontal citado acima.

No dia 04, um cavado de onda curta em níveis médios da atmosfera favoreceu a existência de pancadas de chuva entre São Paulo, Minas Gerais e Rio de Janeiro, mas esta chuva não atingiu Lajes, que só teve 1,04 mm de chuva neste dia. A circulação da alta pressão pós-frontal adquiriu características subtropicais e seguiu influenciando as condições de tempo no Espírito Santo, Minas Gerais e norte do Rio de Janeiro, onde o tempo também seguiu com muita nebulosidade e chuva fraca de forma bastante isolada. Somente entre os dias 11 e 12 de setembro é que o bloqueio atmosférico perdeu força e, com isso, uma nova frente fria conseguiu avançar sobre a região sul, São Paulo e sul do Rio de Janeiro no dia 13. A partir deste dia, o tempo melhorou um pouco e houveram dias ensolarados e temperaturas em elevação no sudeste e centro-sul do país, com baixa umidade do ar à tarde (CPTEC – INPE, 2019).

No dia 20 de setembro, a formação de um centro de baixa pressão no litoral entre o sul e sudeste do país e o deslocamento de uma frente fria pelo sul do Brasil provocou chuvas principalmente em áreas do norte do Rio Grande do Sul, de Santa Catarina e do Paraná. No dia 22, o tempo seguiu mais fechado do leste do Paraná, de São Paulo ao Rio de Janeiro, com chuvas isoladas principalmente na faixa litorânea, ainda sem atingir Lajes (Figura 49), e temperaturas máximas mais baixas. As condições para muitas nuvens e chuvas persistiram durante os dias seguintes, com incremento nos acumulados entre os dias 24 e 25 em parte de São Paulo e do Rio de Janeiro (CPTEC –

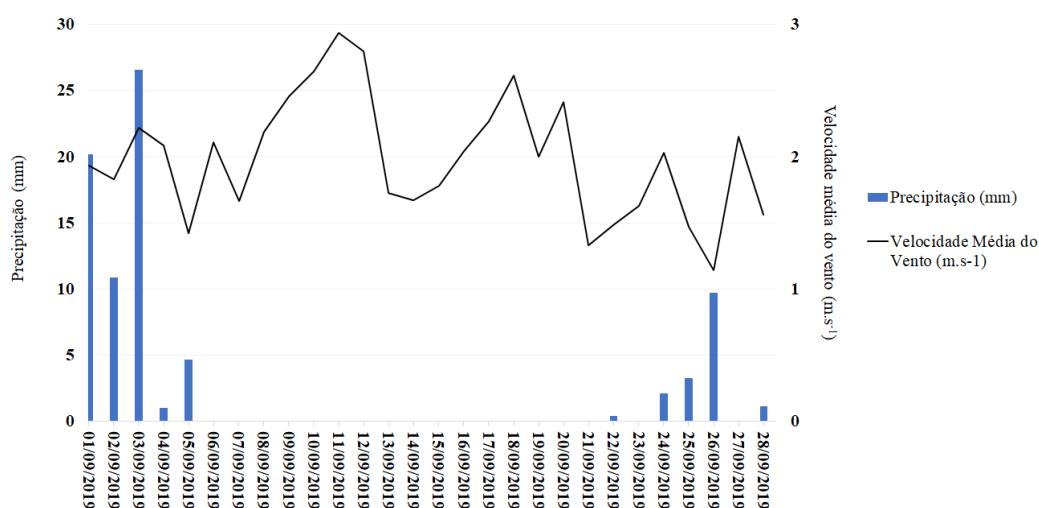
INPE, 2019). Em Lajes, a chuva se fez mais presente nos dias 24 ao 26, com um total de 15,08 mm de chuva (Figura 49).

Figura 48 - Variação da estabilidade térmica relativa (RWCS) da coluna d'água do reservatório de Ribeirão das Lajes no período de 01 a 30 de setembro de 2018.



Fonte: A autora, 2022.

Figura 49 - Variação diária da precipitação (mm) e da velocidade média do vento ($m.s^{-1}$) no reservatório de Ribeirão das Lajes no período de 01 a 30 de setembro de 2019.



Fonte: A autora, 2022.

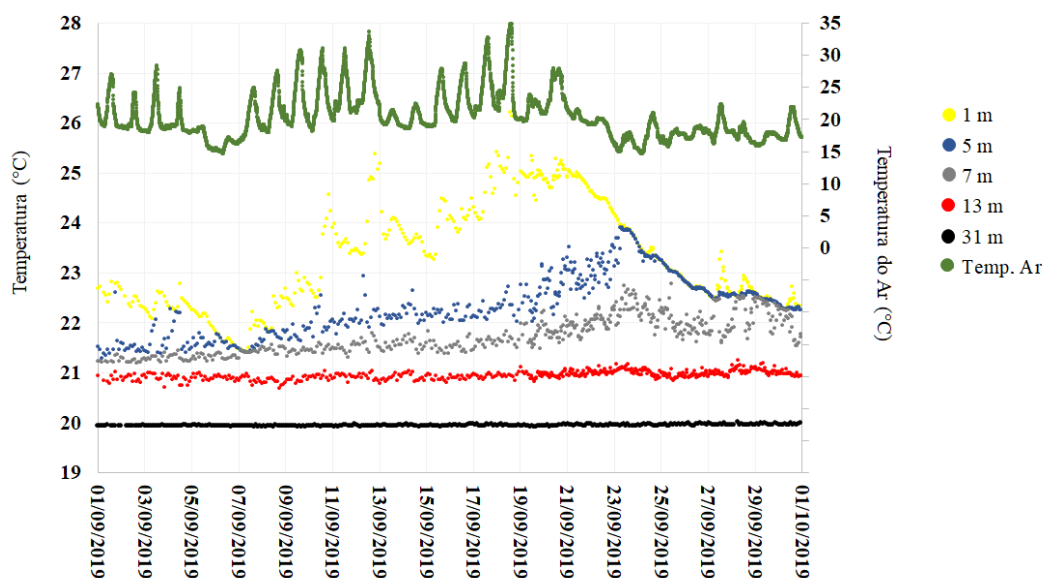
A Figura 50 mostra bem as diminuições de temperatura atmosférica após as entradas de frentes frias descritas acima. No dia 04 de setembro, a temperatura do ar se encontrava em 24,9 °C e após a entrada de frente fria, a temperatura se encontrou em 14,8 °C no dia 06. Após isso, as temperaturas atmosféricas voltam a aumentar até cerca dos 30 °C. No dia 18, a temperatura do ar atingiu seu maior valor, 34,9 °C e depois, novamente, sofreu uma queda, e no dia 24, foi observado o menor valor de temperatura neste mês, também 14,8 °C. Essa última frente fria fez com que as temperaturas do ar se mantivessem mais baixas até o final de setembro (em torno de 20 °C).

A temperatura atmosférica influenciou principalmente todo o epilímnio, o aquecendo de forma desigual, visto que as camadas de 1, 5 e 7 metros se mostram bem separadas entre si durante a maior parte do mês de setembro, sobretudo, a camada superficial, que durante os dias 11 a 23 se manteve mais aquecida e com uma forte estratificação quando comparada à camada de 5 metros. A frente fria que ocorreu no início do mês, não fez com que as águas epilimnais sofressem mistura por mais de um dia. Estas se encontraram homogêneas somente durante o dia 07. Já em relação a passagem da frente fria do dia 20, esta conseguiu atuar de maneira mais pronunciada no reservatório e fez com que as camadas de 1 e 5 metros fossem misturadas durante o período do dia 23 a 27.

Como também pode-se observar durante este mês, as camadas epilimnais se encontraram mais profundas e não foi possível observar uma termoclina bem pronunciada. Durante todo o mês de setembro, a temperatura da água da camada de 13 metros se encontrou bem próxima às das camadas epilimnais. Mesmo assim, aparentemente não houve uma grande influência das oscilações de temperatura atmosférica na temperatura da camada de água de 13 m de profundidade, que se manteve em torno dos 21 °C. Isto ocorreu devido ao fato de não ter ocorrido ventos fortes em setembro, o que fez com que o epilímnio ainda se mantivesse bem estratificado durante a maior parte de mês.

A camada de 31 metros também não sofreu nenhuma influência atmosférica, pois os ventos não são fortes o suficiente para que ocorra uma mistura mais profunda nessas águas e faça com que as camadas hipolimnais tenham alterações de temperatura em razão de fatores atmosféricos.

Figura 50 - Variação da temperatura da água (°C) em determinadas profundidades do reservatório de Ribeirão das Lajes e temperatura atmosférica no período de 01 a 30 de setembro de 2019.



Fonte: A autora, 2022.

A Figura 51 mostra a variação da estabilidade da coluna d'água durante o mês de janeiro de 2020. Através desta Figura é possível constatar a forte estratificação existente durante este período, com valores de RWCS acima de 220 durante quase todo este mês. O mês de janeiro de 2020 se inicia com uma coluna d'água com forte estabilidade (313,66), que diminui logo no dia 02 (267,15). A estabilidade volta a ficar forte e no dia 11 de janeiro ela atinge seu maior valor no mês, 314,98. Após mais uma queda na estabilidade, seguida de outro período de estabilidade, a coluna d'água do reservatório se torna menos estável a partir do dia 18 até o dia 27, dia no qual a estabilidade volta a se tornar mais forte. O menor valor de RWCS foi encontrado no dia 26 com 191,40, o que significa a passagem de uma frente fria durante estes dias em que a coluna d'água se encontrou menos estável.

O ano de 2019 se inicia com o processo de formação e avanço de uma frente fria pelo sul do Brasil. As temperaturas elevadas nessa região proporcionaram condições para a ocorrência de temporais com rajadas de vento. Entre o Mato Grosso do Sul e grande parte do sudeste, a combinação de calor e umidade favoreceu a ocorrência de pancadas de chuva típicas do verão, ou seja, com forte intensidade em curto período de tempo, mas de distribuição irregular. No dia 02, o sistema frontal se afastou para o oceano, mas a propagação de cavados na média e alta troposfera começou a organizar o

fluxo de umidade entre o centro-oeste e o sudeste do Brasil. No dia 03, a amplificação do cavado em níveis médios reforçou o fluxo de umidade em baixos níveis sobre o centro-oeste e o sudeste e favoreceu a formação de um episódio de Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). Este episódio permaneceu até o dia 05. Com isso, os próximos dias foram de chuvas de moderada a forte intensidade e frequentes, principalmente, em Goiás, Distrito Federal, Minas Gerais, Espírito Santo e Rio de Janeiro (CPTEC – INPE, 2020), como pode ser observado no reservatório de Lajes, que até o dia 5, possuiu 3.049,5 mm de precipitação (Figura 52).

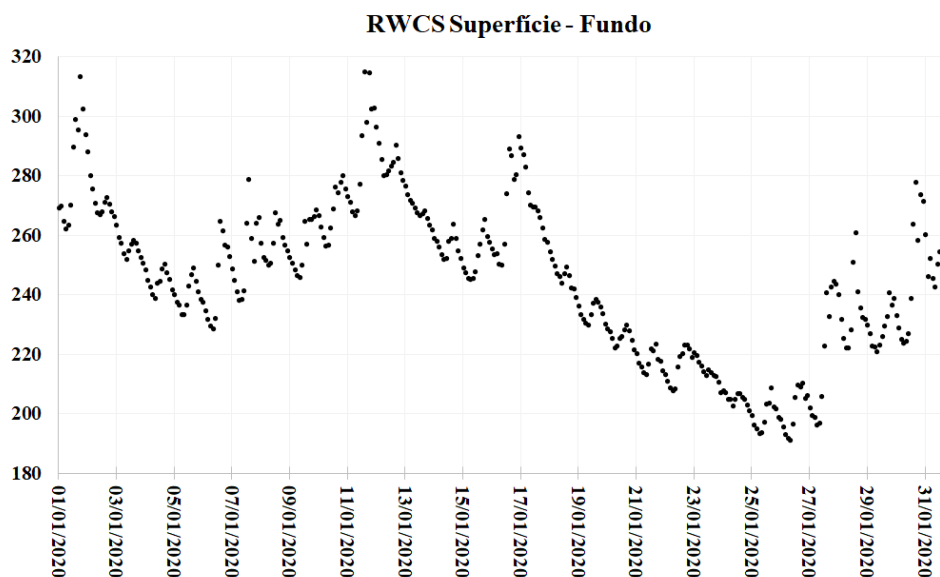
No dia 09, o tempo seguiu instável em grande parte do centro-oeste e sudeste do Brasil. Parte do escoamento em baixos níveis seguiu direcionado para estas regiões e combinado a propagação de cavados de onda curta na troposfera média e o aquecimento diurno, as condições para pancadas de chuva acompanhadas de raios ao longo do dia se seguiu. Novamente, houve condição para chuvas intensas em curto período de tempo, especialmente, entre o centro-sul de Minas Gerais, norte e leste de São Paulo além da região serrana do Rio de Janeiro. Lajes foi atingida por essas chuvas intensas e neste dia teve 476,9 mm de precipitação (Figura 52).

No dia 10, permeneceu a condição para pancadas de chuva de forte intensidade em curto período de tempo no sudeste e centro-oeste (607,2 mm de chuva em Lajes). A partir do dia 11, a frente fria anteriormente mencionada se afastou para o oceano, mas seu deslocamento próximo ao litoral do sudeste contribuiu para a convergência do escoamento em baixos níveis sobre esta região. Com isso, a propagação de cavados na troposfera média manteve o tempo instável na faixa central do Brasil. Desta forma, os próximos dias foram de chuvas fortes e temporais entre o centro-oeste e sudeste com potencial para acumulados expressivos (CPTEC – INPE, 2020), inclusive no reservatório de Lajes, que do dia 10 ao dia 13, teve 2.333,2 mm de chuva (Figura 52).

No dia 14 de janeiro, o transporte de umidade do oceano para o continente associado ao anticiclone pós-frontal favoreceu a presença de nebulosidade ao longo do dia entre o leste de São Paulo, centro-sul de Minas Gerais e Rio de Janeiro. Ao longo do dia, o aquecimento diurno e a propagação de um cavado de onda curta em níveis médios favoreceu a ocorrência de pancadas de chuva localmente intensas nesta faixa. Entre os dias 16 e 17, o deslocamento de uma frente fria pelo litoral de São Paulo e Rio de Janeiro também favoreceu a ocorrência de chuvas generalizadas e de forte

intensidade (CPTEC – INPE, 2020) e Lajes apresentou, do dia 14 ao dia 17, 2.034 mm de chuva (Figura 52).

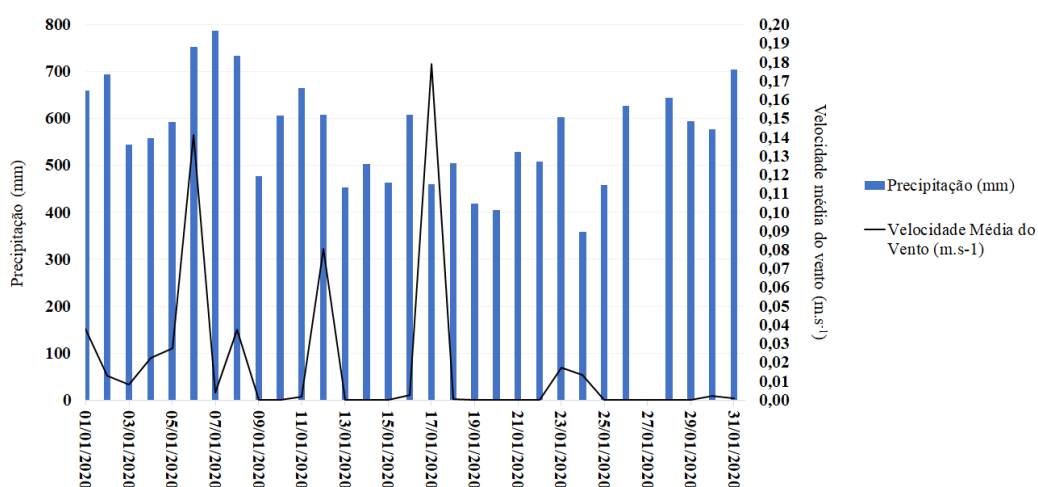
Figura 51 – Variação da estabilidade térmica relativa (RWCS) da coluna d'água do reservatório de Ribeirão das Lajes no período de 01 a 31 de Janeiro de 2020.



Fonte: A autora, 2022.

Janeiro é um mês bastante chuvoso, onde as frentes frias influenciam bastante esse regime de umidade e isso pôde ser observado pelo gráfico da Figura 52. Janeiro teve um total de 17.100,86 mm de chuva durante todo o mês. Porém, essa grande quantidade de chuva não é capaz de diminuir a temperatura das águas superficiais da coluna d'água de Ribeirão das Lajes, a qual se encontra com forte estabilidade durante praticamente todo este período de janeiro.

Figura 52 – Variação diária da precipitação (mm) e da velocidade média do vento (m.s^{-1}) no reservatório de Ribeirão das Lajes no período de 01 a 31 de janeiro de 2020.



Fonte: A autora, 2022.

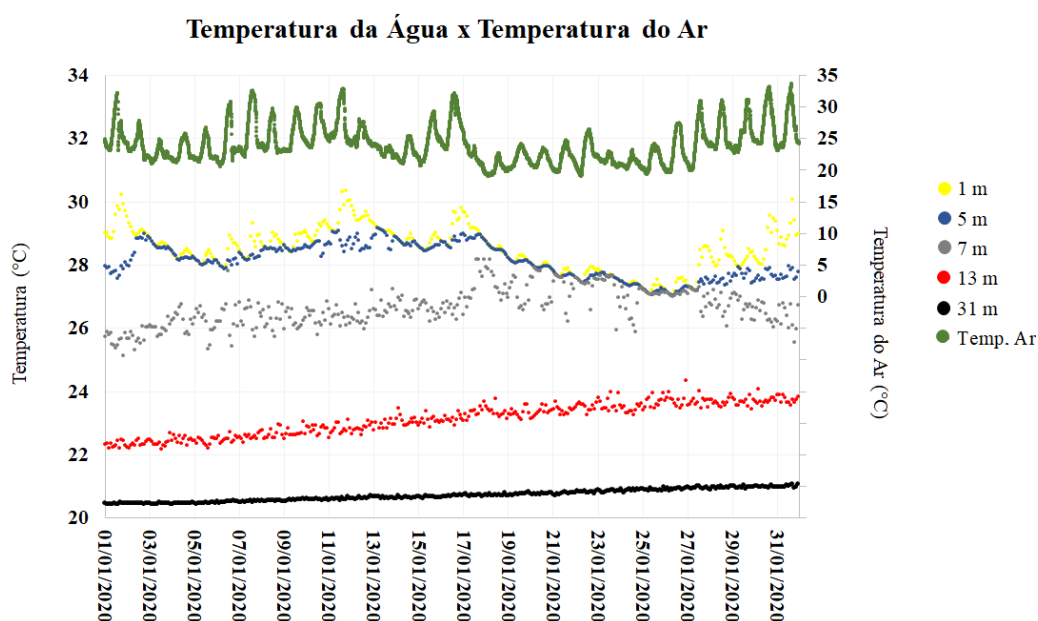
Os meses de verão no reservatório de Ribeirão das Lajes são marcados pelas elevadas temperaturas atmosféricas e não foi diferente em janeiro de 2020. A maior temperatura atmosférica registrada no reservatório de Lajes foi de $33,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ e ocorreu no dia 31, já a menor temperatura foi de $19,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ no dia 22. Observando o gráfico da Figura 53, pode-se observar que poucos foram os dias de janeiro de 2020 nos quais a temperatura atmosférica se encontrou abaixo dos $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ e isto fez com que os primeiros metros de água do reservatório de Lajes também se encontrassem com temperaturas mais elevadas, quando comparadas aos outros meses discutidos aqui. Nos primeiros 7 metros de profundidade da coluna d'água as temperaturas sempre foram superiores a $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante todo o mês de janeiro. Especialmente a camada superficial do reservatório apresentou elevadas temperaturas, acima de $28\text{ }^{\circ}\text{C}$, durante quase todo o mês, à exceção do período entre os dias 23 a 27 com temperaturas próximas a $27\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pode-se observar que nos dias 18 a 27 de janeiro, as camadas de 1 e 5 metros se encontraram homogêneas e com grande tendência a uma mistura com a camada de 7 metros. Isso ocorreu em razão da diminuição das temperaturas atmosféricas em decorrência de uma passagem de frente fria.

A termoclina voltou a se exibir mais pronunciada devido aos maiores aquecimentos superficiais e isto é mostrado pelo espaço existente entre a camada de 7 e 13 metros de profundidade na Figura 52. Por ser um mês com intensas e persistentes radiações solares, em janeiro a coluna d'água do reservatório se apresentava com forte

estratificação nos primeiros metros de profundidade, o que faz com que o metalímnio (13 metros) se encontre “bloqueado” dos fatores atmosféricos e só receba calor através de um convecção térmica. Por isto, este se mantém com pouca diferença de temperatura durante este mês, mas há um aumento de temperatura dessas águas que começa a ocorrer no dia 13 e permanece até o final do mês em decorrência do calor que é convecionado das camadas mais rasas até esta profundidade. O mesmo pode ser observado na camada de 31 m.

A camada de 31 metros se encontra isolada de qualquer efeito de alteração atmosférica em função da forte estratificação da coluna d’água durante o mês de janeiro.

Figura 53 – Variação da temperatura da água (°C) em determinadas profundidades do reservatório de Ribeirão das Lajes e temperatura atmosférica no período de 01 a 31 de janeiro de 2020.



Fonte: A autora, 2022.

Como pôde ser observado nos gráficos acima, as frentes frias interferem nas temperaturas atmosféricas e, conseqüentemente, causam alterações na estabilidade da coluna d’água do reservatório de Ribeirão das Lajes.

Tundisi et al. (2004) notaram que em ambiente continentais as frentes frias estão intimamente relacionadas com a estratificação e com o comportamento de variáveis físicas, químicas e biológicas em reservatórios, as quais pode ter implicações na dinâmica de populações fitoplantônicas nesses ecossistemas como, por exemplo, no

desenvolvimento de cianobactérias. Para uso humano, a presença das Cyanophyceae, apresentam um efeito tóxico de acordo com a espécie e podem comprometer o uso do reservatório com o aumento de sua densidade. Sendo assim, um estudo sobre os sistemas frontais tem fundamental importância no que diz respeito ao gerenciamento de represas, especialmente as que fornecem água para o consumo humano (Morais, De Castro e Tundisi, 2010).

Apesar da sazonalidade reduzida em áreas tropicais, o clima influencia a estabilidade da coluna d'água nos reservatórios. Mudanças climáticas relacionadas ao aquecimento global parecem explicar as alterações na estrutura térmica de reservatórios profundos, incluindo aumento da resistência à homogeneização da coluna de água e uma tendência de diminuição da profundidade da termoclina no outono. Tais condições podem levar ao acúmulo de nutrientes e esgotamento de oxigênio no hipolímnio que, por sua vez, pode afetar a distribuição das espécies aquáticas (Livingstone, 2003), como também a qualidade da água para uso doméstico e industrial.

As mudanças nas condições meteorológicas da região sudeste do Brasil, geralmente associam-se à passagem, formação ou intensificação dos sistemas frontais, que por sua vez estão associados à variações de temperatura, pressão, umidade e ventos fortes.

Em reservatórios em geral, primeiro deve-se considerar que, geralmente, a presença das frentes frias produz uma turbulência que impacta em toda a coluna d'água, a qual depende da força e direção dos ventos. Essa turbulência pode ser mais efetiva se os ventos atingirem de 8 a 10 m.s⁻¹. A passagem de uma frente fria reorganiza o reservatório através de uma mistura vertical, que pode promover a desagregação do florescimento de cianobactérias, ressuspende o sedimento de fundo do reservatório alterando a concentração de oxigênio dissolvido e a turbidez. Este caso não acontece com Ribeirão das Lajes, pois o mesmo é um reservatório profundo em que não há efetiva mistura da coluna d'água. Quando o efeito da frente fria cessa e os ventos diminuem para 2 ou 3 m.s⁻¹, há uma estabilização da coluna de água, fazendo com que haja uma diminuição nas concentrações de oxigênio dissolvido nas camadas profundas e uma alteração de cor e odor associados à desoxigenação e liberação de sulfeto de hidrogênio (H₂S) do fundo, além de aumentar a concentração de manganês, o que promove degradação da qualidade da água (Morais, 2010).

Segundo Morais (2010), é importante observar que os sistemas frontais podem ser mais ou menos intensos dependendo, dentre outros fatores, da época do ano em que atuam e da sua trajetória (mais ou menos próximo à costa). Este mesmo autor cita que as velocidades dos ventos podem ser ainda maiores quando medidas sobre os reservatórios ao invés de medidas na estação, fato este que ocorre neste presente trabalho. Porém, como já dito anteriormente, o reservatório de Lajes se encontra cercado pela mata Atlântica e, devido a isto, é um reservatório “protegido” das fortes ações dos ventos e, por isso, o vento não é um dos fatores mais importantes discutidos aqui.

A fraca ação de ventos incapazes de tornar a coluna d’água instável também ocorre em outros reservatórios, como é o caso dos reservatórios de Barra Bonita, Carlos Botelho (Lobo-Broa) e Tucuruí pertencentes às bacias hidrográficas do Paraná e Tocantins estudados por Sebastien (2004). Ele observou que tanto no verão quanto no inverno, os reservatórios Lobo-Broa e Barra Bonita (máxima profundidade de 30 m), apresentaram-se estáveis, apenas com pequenas variações de temperatura.

As frentes frias são mais intensas e se dissipam um pouco mais rápido no verão. Como a troca de calor nos reservatórios ocorre mais rapidamente nas camadas superficiais do que no fundo, é provável que ocorra maior erosão da termoclina, com aprofundamento do epilímnio e aumento da área de mistura no reservatório de Lajes quando houver um resfriamento repentino da superfície da água. Uma frente fria típica causa diminuição da radiação solar e da temperatura do ar, bem como aumento da velocidade do vento e, em um período de alguns dias, pode provocar fenômenos transitórios como ventos e chuvas, que são agentes desestabilizadores da coluna de água (Branco et al., 2007).

A passagem das frentes frias em torno do reservatório de Ribeirão das Lajes não se mostrou suficiente para produzir uma alteração em todo o seu perfil vertical. Deve-se notar, entretanto, que as frentes frias causaram evidentes quedas de temperatura superficial no reservatório de Ribeirão das Lajes, provavelmente contribuindo para a modelagem da espessura do epilímnio. Em um ambiente caracterizado pela redução do impacto do vento, há uma falta de mistura e predominância de florescências de cianobactérias da superfície e subsuperfície da coluna d’água.

Durante os períodos de estabilidade da coluna de água, a camada de mistura esgota-se de nutrientes muito rapidamente, portanto, o fitoplâncton deve depender da

regeneração de nutrientes e da capacidade das cianobactérias de fixar nitrogênio. A turbulência intensa imediatamente antes e durante as frentes frias estabelece a mistura nas escalas vertical e horizontal promovendo o crescimento de clorofíceas e diatomáceas durante esses curtos períodos de 2 ou 3 dias.

A mistura vertical e horizontal que ocorre após a passagem das frentes frias tem impactos e consequências na sucessão fitoplanctônica e nos padrões de mistura dos ecossistemas de água doce. Quando as frentes frias estão operando em escala real, o resfriamento das águas superficiais e a mistura vertical muda a estrutura térmica de lagos e reservatórios produzindo perfis homogêneos de temperatura da água, oxigênio dissolvido, condutividade elétrica da água e nutrientes, como fósforo e nitrogênio (Tundisi et al., 2010).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presença de estratificações térmicas no reservatório de Ribeirão das Lajes ficou bem evidente através dos cálculos de RWCS, Resistência Térmica Relativa e Estabilidade de Schmidt feitos neste estudo. Os gráficos gerados a partir desses dados evidenciaram que o reservatório estudado possui períodos de forte estabilidade e instabilidade da coluna d'água, variando ao longo do tempo, mostrando uma sazonalidade acoplada ao regime climatológico.

Durante o período de estudo, a estratificação térmica da coluna d'água foi pronunciada durante o verão, com duração de 3 meses (dezembro a março) em 2018/2019 e de 2 meses (janeiro e fevereiro) de 2019/2020. Lembrando que nosso estudo se deu até fevereiro de 2020. É possível observar que a estratificação é mais forte nos primeiros meses de 2019 em função das mais altas temperaturas observadas nessa mesma época quando comparadas à 2020.

O estudo mostrou uma forte sazonalidade em relação à temperatura, acompanhando os regimes de incidência solar e temperatura atmosférica local, evidenciando a diferença de estratificações térmicas mais fortes em alguns períodos do estudo e em outros, a ausência desta. Este fato implica na direta influência do clima sobre o padrão de estratificação no reservatório e que, as mudanças climáticas globais em curso, tendendo ao aumento das temperaturas do ar, podem ocasionar um prolongamento do período de estratificação de reservatórios tropicais.

Através dos resultados, foi visto que as camadas de 1 e 5 metros de profundidade foram as camadas que apresentaram os valores mais próximos de temperatura, mostrando que há uma permanente mistura dessas camadas, o que é corroborado pelos resultados de temperatura, pH e oxigênio e dados da termoclina, mostrando a dimensão da camada de mistura. O que também corrobora a homogeneidade dessas camadas.

Pela bibliografia estudada e utilizada para este trabalho, vimos que a forte estratificação térmica presente nos primeiros metros deste corpo d'água foi resultado da grande entrada de radiação solar até os 6 metros de profundidade da coluna d'água e da não mistura completa da coluna d'água. Foi constatada a presença de uma forte

estratificação térmica nos primeiros metros da coluna d'água e também águas com tendência a estratificação térmica nas camadas mais abaixo.

A estabilidade térmica medida através da Resistência Térmica Relativa (RTR) e da Estabilidade de Schmidt na coluna d'água do reservatório de Ribeirão das Lajes apresentou os mesmos resultados do estudo da estabilidade realizado através do RWCS quando discutido a existência ou ausência de estratificações durante o período de estudo. Assim como o RWCS, a RTR evidenciou que os períodos de maior resistência da coluna d'água à mistura ocorrem nos meses de verão e os períodos de menor resistência à mistura ocorrem nos meses de inverno. O mesmo ocorreu em relação à Estabilidade de Schmidt, onde os cálculos identificaram que a coluna d'água do reservatório de Lajes possui forte estabilidade nos meses de verão e fraca estabilidade nos meses de inverno. Esse processo de diminuição da estabilidade da coluna d'água ocorre em função do resfriamento do ar que começa a ocorrer a partir dos meses de maio e junho, podendo ser intensificado pela presença de frentes frias.

Através das oscilações de curto período foi evidenciado que os fenômenos atmosféricos de curta duração, como as frentes frias, por exemplo, influenciam a estabilidade térmica da coluna d'água do reservatório de Lajes por um curto período de tempo. Foram constatadas passagens de frentes frias durante o período de estudo, as quais fizeram com que as fortes estratificações térmicas existentes durante o verão enfraquecessem e a coluna d'água se encontrasse instável durante poucos dias nesses meses e em um maior período de dias durante o inverno, isso porque as frentes frias são mais intensas e se dissipam um pouco mais rápido no verão. Esses períodos de instabilidade foram associados como resultados das baixas temperaturas existentes durante as passagens das frentes frias.

A passagem das frentes frias em torno do reservatório de Ribeirão das Lajes não se mostrou suficiente para produzir uma alteração da temperatura em todo o seu perfil vertical. Deve-se notar, entretanto, que os sistemas frontais causaram evidentes quedas de temperatura superficial no reservatório, provavelmente contribuindo para a modelagem da espessura do epilímnio.

Através dos resultados de pH e oxigênio dissolvido, foi possível averiguar que estes sofrem alteração ao longo da coluna d'água, principalmente quando em comparação epilímnio x hipolímnio. A distribuição vertical do oxigênio dissolvido apresentou-se estratificada, com seus maiores valores sendo encontrados nos primeiros

5 metros de profundidade e abaixo disso, uma diminuição em relação a profundidade, chegando a anoxia na camada mais profunda na maioria dos meses estudados. Em relação ao tempo de estudo foi possível notar uma maior concentração de oxigênio superficial nos meses de verão em relação aos meses de inverno. Já em relação ao metalímnio e ao hipolímnio, o período de inverno possuiu maior concentração de oxigênio dissolvido. Isso ocorre em função da fraca estabilidade existente nos meses de inverno.

O pH teve uma redução na camada onde se encontra a termoclina, porém, este se manteve praticamente constante pelo metalímnio e hipolímnio. Em relação ao período estudado, o pH se encontrou mais básico e homogêneo até os 7 metros de profundidade (termoclina) durante o verão. Isto ocorre devido a efetiva fotossíntese existente nessas camadas durante este período. Nos meses de inverno, o pH apresentou valores menores em decorrência da baixa atividade fotossintética encontrada nesse período.

Apesar dos resultados de RWCS, RTR e Estabilidade de Schmidt apontarem para a ausência de uma estratificação térmica em alguns períodos dos anos estudados, mais evidentemente durante o período de inverno, a coluna d'água permaneceu estratificada quimicamente. Esse resultado mostra a importância de não ser realizada somente uma análise de temperatura da água, pois esta não nos fornece uma visão fiel da dinâmica de circulação da coluna d'água, demonstrando a importância do uso dos parâmetros de concentração de oxigênio dissolvido e pH como ferramentas complementares para o estudo da dinâmica de estratificação e mistura da coluna d'água.

Em relação ao fDOM, este nos evidenciou que no reservatório de Lajes, devido a forte incidência de radiação solar durante os meses de verão, houve um baixo valor de matéria orgânica dissolvida fluorescente, ao contrário dos meses de inverno, os quais apresentaram valores mais superiores. Isto também foi observado em relação a coluna d'água, onde maiores valores de fDOM foram encontrados no metalímnio. Através do estudo do fDOM, foi verificado que este teve comportamento inverso ao observado em relação ao oxigênio dissolvido e ao pH, o que indica que o oxigênio foi utilizado para a degradação da matéria orgânica e liberação do fDOM e nutrientes.

A grande tendência das águas à estratificação, tanto térmica quanto química, diz respeito ao fato do Reservatório de Ribeirão das Lajes se localizar entre dois morros em uma região bastante irregular que impede que os ventos atuem fortemente neste

local, não ocorrendo assim, a mistura efetiva das camadas de água. Outras características de Lajes também auxiliam na ausência da mistura dessas águas, como a morfometria dendrítica do reservatório e a profundidade apresentada pela área da barragem.

REFERÊNCIAS

A disponibilidade de água no mundo e no Brasil. Saveh – Sistema de Autoavaliação da Eficiência Hídrica, 2016. Disponível em: < <https://saveh.ambev.com.br/artigos/a-disponibilidade-de-agua-no-mundo-e-no-brasil>>. Acesso em: 17 de março de 2021.

ALCÂNTARA, E. H. de. Análise da turbidez na planície de inundação de Curuaí (PA, Brasil) integrando dados telemétricos e imagens MODIS/TERRA. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.[Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto]. Available from:< <http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m17>, v. 80, n. 2007, p. 02.15, 2006.

ALCÂNTARA, E. H. et al. On the water thermal response to the passage of cold fronts: initial results for Itumbiara reservoir (Brazil). *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, v. 7, n. 6, p. 9437-9465, 2010a.

ALCÂNTARA, E. H. et al. Remote sensing of water surface temperature and heat flux over a tropical hydroelectric reservoir. *Remote Sensing of Environment*, v. 114, n. 11, p. 2651-2665, 2010b.

ALCÂNTARA, E. H. et al. On the water thermal response to the passage of cold fronts: initial results for Itumbiara reservoir (Brazil). *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, v. 7, n. 6, p. 9437-9465, 2010c.

ALCÂNTARA, E. H. de et al. Time series analysis of water surface temperature and heat flux components in the Itumbiara Reservoir (GO), Brazil. *Acta Limnologica Brasiliensia*, v. 23, n. 3, p. 245-259, 2011.

ALCÂNTARA, E. H.; STECH, José Luiz. Desenvolvimento de modelo conceitual termodinâmico para o reservatório hidrelétrico de Itumbiara baseado em dados de satélite telemétricos. *Ambiente & Água-An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, v. 6, n. 2, p. 157-178, 2011.

ANDRADE, K.M. Climatologia e comportamento dos sistemas frontais sobre a América do Sul. 2005. 185 p. (INPE-14056-TDI/1067). Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2005.

ANDRADE, K. M.; CAVALCANTI, Iracema FA. Climatologia dos sistemas frontais e padrões de comportamento para o verão na América do Sul. In: Congresso Brasileiro de Meteorologia. 2004.

APHA; AWWA; WEF. Standard methods for the examination of water and wastewater: online. Washington, DC, 2006. Disponível em < <https://www.standardmethods.org/store> > Não está mais acessível. Acesso em: 17 de março de 2021. Não está mais acessível.

ARAÚJO, F.; BECKER, V.; ATTAYDE, J. L. Shallow lake restoration and water quality management by the combined effects of polyaluminium chloride addition and benthivorous fish removal: a field mesocosm experiment. *Hydrobiologia*, v. 778, n. 1, p. 243-252, 2016.

ARRUDA, N. M. B. de. Avaliação de variáveis de qualidade de água dos reservatórios das usinas hidrelétricas de Foz do Areia, Segredo e Caxias, como instrumento de gestão de bacias hidrográficas. 2014.

ARUMUGAM, P. T.; FURTADO, J. I. Physico-chemistry, destratification and nutrient budget of a lowland eutrophicated Malaysian reservoir and its limnological implications. *Hydrobiologia*, v. 70, n. 1, p. 11-24, 1980.

ASANTE, K. A.; QUARCOOPOME, T.; AMEVENKU, F. Y. K. Water quality of the Weija reservoir after 28 years of impoundment. *West African Journal of Applied Ecology*, v. 13, n. 1, p. 125-131, 2008.

ASSIREU, A. T. et al. O comportamento do rio ao longo do reservatório observado a partir de Sensoriamento Remoto, dados in situ e ensaios de laboratório, 2009.

Associação Pró-Gestão das Águas da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul – AGEVA, 2007. Plano de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Paraíba do Sul - Resumo Análise dos Impactos e das Medidas Mitigadoras que envolvem a Construção e Operação de Usinas Hidrelétricas Relatório Contratual - R-6 PSR-009-R1, Relatório Final. Disponível em: < <http://www.ceivap.org.br/downloads/PSR-RE-009-R1.pdf> >. Acesso em: 18 de março de 2021.

BARROSO, L. V. Diagnóstico ambiental para a pesca de águas interiores no estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, MINTER/IBAMA-RJ/ACUMEP, 177p, 1989.

BASTOS, R. K. X. Impactos da construção de centrais hidrelétricas relacionados com a água: pressupostos para a avaliação e proposição de medidas mitigadoras. Simpósio brasileiro de pequenas e médias centrais hidrelétricas, v. 1, p. 63-75, 1998.

BEKLIOGLU, M. et al. State of the art in the functioning of shallow Mediterranean lakes: workshop conclusions. *Hydrobiologia*, v. 584, n. 1, p. 317-326, 2007.

BIANCHINI JR, I. Estudo dos processos de humificação de *Nymphoides indica* (L.) O. Kuntze. 1985. Tese de Doutorado. Tese de Doutorado)-Universidade Federal de São Carlos, São Carlos. 285p. 1985.

BLOOMFIELD, P. (2004). Fourier analysis of time series: an introduction. John Wiley & Sons.

BONNET, M.-P.; POULIN, M.; DEVAUX, J. Numerical modeling of thermal stratification in a lake reservoir. Methodology and case study. *Aquatic Sciences*, v. 62, n. 2, p. 105-124, 2000.

BOUVY, M. et al. Limnological features in Tapacurá reservoir (northeast Brazil) during a severe drought. *Hydrobiologia*, v. 493, n. 1, p. 115-130, 2003.

BRAGA, B.; ROCHA, O.; TUNDISI, J. Dams and the environment: the Brazilian experience. *International Journal of Water Resources Development*, v. 14, n. 2, p. 127-140, 1998.

BRANCO, C. WC; B. K.-S.-F. Variações dos Níveis de Trofia e da Estrutura Térmica da Barragem de um Reservatório Tropical. Rio de Janeiro, 2007.

BRANCO, C. WC et al. Impact of climate on the vertical water column structure of Lajes Reservoir (Brazil): A tropical reservoir case. *Lakes & Reservoirs: Research & Management*, v. 14, n. 3, p. 175-191, 2009.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. CONAMA. Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Diário Oficial da União: República Federativa do Brasil, Poder Executivo,

Brasília, DF, n. 53, 18 mar. 2005. Seção 1, p. 58-63. Com alterações posteriores. Disponível em < <https://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=459> > Não está mais acessível. Acesso em 17 de março de 2021.

Brasil tem cerca de 12% das reservas mundiais de água doce do planeta. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, 2019. Disponível em < <https://www.ana.gov.br/noticias-antigas/brasil-tem-cerca-de-12-das-reservas-mundiais-de-a.2019-03-15.1088913117> >. Acesso em 07 de junho de 2021.

CARPENTER, S. R.; STANLEY, E. H.; VANDER ZANDEN, M. J. State of the world's freshwater ecosystems: physical, chemical, and biological changes. Annual review of Environment and Resources, v. 36, p. 75-99, 2011.

CARVALHO, A. R.; SCHLITTLER, F. H. M.; TORNISIELO, V. L. Relações da atividade agropecuária com parâmetros físicos químicos da água. Química Nova, v. 23, n. 5, p. 618-622, 2000.

CARVALHO, M. H. de; FEDOROVA, N. Estudo sobre frentes quentes que ocorrem no Sul do Brasil. Revista Brasileira de Meteorologia, v. 26, n. 2, p. 257-272, 2011.

Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil 2020. Disponível em < <http://conjuntura.ana.gov.br/static/media/conjuntura-completo.23309814.pdf> >. Acesso em: 07 de junho de 2021.

Conselho Estadual de Recursos Hídricos. Resolução CERHI-RJ. Rio de Janeiro. CERHI-RJ, 2014. Disponível em: < <http://comiteguandu.org.br/resolucoes/2014/cerhi/127.pdf> >. Acesso em: 18 de março de 2021.

CETESB. Determinação de Clorofila a e Feofitina a: método espectrofotométrico. 3ª Edição. Fev/2014. 14páginas.

CHAPMAN, D. V. (Ed.). Water quality assessments: a guide to the use of biota, sediments and water in environmental monitoring. CRC Press, 1996.

COLOMBO, G. T.; MANNICH, M. Estudo da estratificação térmica do reservatório Vossoroca por meio de índices físicos. Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, v. 22, p. 1-8, 2017.

COOLEY, J. W.; TUKEY, J. W. An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series. Mathematics of computation, v. 19, n. 90, p. 297-301, 1965.

CORDEIRO, S. F. O. et al. Avaliação do grau de trofia das águas do reservatório da usina hidrelétrica Barra dos Coqueiros-GO. 2013.

CORRÊA, G. P.; DA CUNHA, C. L. N. MODELAGEM AMBIENTAL DO RESERVATÓRIO DO RIO VERDE–ESTUDO PRELIMINAR.

CURTARELLI, M. P. Estudo da influência de frentes frias sobre a circulação e os processos de estratificação e mistura no reservatório de Itumbiara (GO): um enfoque por modelagem hidrodinâmica e sensoriamento remoto. Tese de Doutorado. Mestrado em Sensoriamento Remoto. São José dos Campos – SP. 108f. 2012.

DEFANT, A. Physical oceanography. Pergamon, 1961.

DELELLO, D. Composição e distribuição (espacial e temporal) de macrófitas aquáticas no reservatório do Lobo (Broa), Itirapina/Brotas, SP. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 2008.

DE LIMA, J. O. G.; FRANÇA, A. M. M.; LOIOLA, H. G. Implicações hidroquímicas da condutividade elétrica e do íon cloreto na qualidade das águas subterrâneas do semiárido cearense. *Revista Virtual de Química*, v. 6, n. 2, p. 279-292, 2014.

DE LIMA, R. S.; ALVES, J. P. H. Avaliação da qualidade da água dos reservatórios localizados nas bacias hidrográficas dos rios Piauí-Real, utilizando o índice de qualidade da água (IQA). *Scientia Plena*, v. 13, n. 10, 2017.

DE OLIVEIRA NALIATO, D. A.; NOGUEIRA, M. G.; PERBICHE-NEVES, G. Discharge pulses of hydroelectric dams and their effects in the downstream limnological conditions: a case study in a large tropical river (SE Brazil). *Lakes & Reservoirs: Research & Management*, v. 14, n. 4, p. 301-314, 2009.

DI BERNARDO, A. S. Desempenho de sistemas de dupla filtração no tratamento de água com turbidez elevada. 2004. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

DODDS, W. *Freshwater ecology: concepts and environmental applications*. Elsevier, 2002.

DONN, W.L. *Meteorologia*. Barcelona: Reverté, 610 p. 1978.

D'SA, E. J.; DIMARCO, Steven F. Variabilidade sazonal e controles em matéria orgânica dissolvida cromofórica em uma grande margem costeira dominada por rios. ***Limnologia e Oceanografia***, v. 54, n. 6, pág. 2233-2242, 2009.

DUARTE, S. et al. Distribuição e abundância relativa de cumbaca *Trachelyopterus striatulus* Steindachner (Osteichthyes, Auchenipteridae) no reservatório de Lajes, Rio de Janeiro, Brasil. *Revista Brasileira de Zoologia*, v. 19, n. 3, p. 925-933, 2002.

ELÇI, Ş. Effects of thermal stratification and mixing on reservoir water quality. *Limnology*, v. 9, n. 2, p. 135-142, 2008.

ESTEVEES, F. *Fundamentos da liminologia*. Rio de Janeiro: Interciência. 1998.

ESTEVEES, F. de A. *Fundamentos de limnologia*, 3. ° ed. Rio de Janeiro. Interciência. 826p, 2011.

FANTIN-CRUZ, I. Efeitos da formação e operação de um reservatório de pequena regularização na alteração da qualidade da água e do regime hidrológico na planície de inundação do Pantanal. Tese de doutorado, Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. Porto Alegre – RS. 98f, 2012.

FERNANDES, A. L. T.; NOGUEIRA, MA de S.; RABELO, P. V. Escassez e qualidade da água no século 21. *Informe Agropecuário*, v. 29, n. 246, p. 86-101, 2008.

FISCHER, H. B. et al. *Mixing in inland and coastal waters* Academic Press. New York, p. 229-242, 1979.

GANTZER, P. A.; BRYANT, L. D.; LITTLE, J. C. Effect of hypolimnetic oxygenation on oxygen depletion rates in two water-supply reservoirs. *Water research*, v. 43, n. 6, p. 1700-1710, 2009.

GERLING, A. B. et al. First report of the successful operation of a side stream supersaturation hypolimnetic oxygenation system in a eutrophic, shallow reservoir. *Water Research*, v. 67, p. 129-143, 2014.

GOLDMAN, C. R.; HORNE, A. J. *Limnology*. McGraw-Hill, 1983.

GOMES FILHO, C. A. Análise preliminar para a estimativa da perda de calor sensível de um fluido homogêneo térmico em um reservatório de geometria cilíndrica. 2013.

Governo do Estado do Rio de Janeiro, Secretaria de Estado do Ambiente - SEA e Instituto Estadual do Ambiente – INEA. INEA, 2014. Disponível em <>. Acesso em: 23 de setembro de 2021.

GUARINO, A.W.S.; BRANCO, C.W.C.; DINIZ, G.P. & ROCHA, R.. Limnological Characteristics of an Old Tropical Reservoir (Ribeirão das Lajes Reservoir, RJ, Brazil). *Acta Limnol. Bras*, v. 17, n. 2, p. 129-141, 2005.

GUÉGUEN, C., Gilbin, R., Pardos, M., & Dominik, J. (2004). Water toxicity and metal contamination assessment of a polluted river: the Upper Vistula River (Poland). *Applied Geochemistry*, 19(1), 153-162.

GUÉGUEN, C., Guo, L., & Tanaka, N. (2005). Distributions and characteristics of colored dissolved organic matter in the Western Arctic Ocean. *Continental Shelf Research*, 25(10), 1195-1207.

HENRY, R., Tundisi, J. G., Calijuri, M. D. C., & Ibañez, M. D. S. (1997). A comparative study of thermal structure, heat content and stability of stratification in three lakes. *Limnological studies on the Rio Doce Valley Lakes, Brazil. Rio de Janeiro: Academia Brasileira de Ciências*, 69-77.

História / Saiba um pouco mais da história do Complexo Lajes. PCH Paracambi, Lightger S/A. Disponível em: < <https://www.pchparacambi.com.br/noticias/historia-saiba-um-pouco-mais-da-historia-do-complexo-lajes/>>. Acesso em: 18 de março de 2021.

HORNE, A. J.; GOLDMAN, C. R. *Limnology*. New York: McGraw-Hill, 1994.

HUTTER, K.; WANG, Y.; CHUBARENKO, I. P. *Physics of Lakes: Volume 1: Foundation of the Mathematical and Physical Background*. Springer Science & Business Media, 2010.

HSU, S. A. *Coastal Meteorology*. San Diego: Academic Press. 260 p. 1988.

IAP – Instituto Ambiental do Paraná. Monitoramento da qualidade das águas dos reservatórios do Estado do Paraná no período de 2005 a 2008. Ed. Fundamento, Curitiba – PR, 2009.

IMBERGER, J.; PATTERSON, J. C. *Physical Limnology*, *Advances In Applied Mechanics*, Vol. 27. 1990.

IMBERGER, J. *Transport processes in lakes: A review*. 1994.

IMBERGER, J.; HAMBLIN, P. F. Dynamics of lakes, reservoirs, and cooling ponds. *Annual Review of Fluid Mechanics*, v. 14, n. 1, p. 153-187, 1982.

IMEVBORE, A. M. A. Hydrology and plankton of Eleiyele reservoir Ibadan, Nigeria. *Hydrobiologia*, v. 30, n. 1, p. 154-176, 1967.

INEA. Plano municipal de saneamento básico de Itaguaí (RJ), 2016. Disponível em: < <http://www.inea.rj.gov.br/wp-content/uploads/downloads/SEAS/PMSB%20-%20ITAGAU%C3%8D.pdf> >. Acesso em: 18 de março de 2021.

INMET, Instituto Nacional de Meteorologia. Banco de dados meteorológicos. Disponível em <https://bdmep.inmet.gov.br/>. Acesso em: 30 de setembro de 2021.

KALFF, J.. *Limnology: inland water ecosystems*. 2002.

KIMMEL, B. L. Reservoir primary productivity. *Reservoir limnology-ecological perspectives*, p. 133-199, 1990.

KIRK, J. TO. *Light and photosynthesis in aquatic ecosystems*. Cambridge university press, 1994.

KNAPIK, H. G.; FERNANDES, C. V. S.; AZEVEDO, JCR. Aplicabilidade de técnicas de espectroscopia e da concentração de carbono orgânico dissolvido na caracterização da matéria orgânica em rios urbanos. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 19, n. 4, p. 214-225, 2014.

Koukal, B., Guéguen, C., Pardos, M., & Dominik, J. (2003). Influence of humic substances on the toxic effects of cadmium and zinc to the green alga *Pseudokirchneriella subcapitata*. *Chemosphere*, 53(8), 953-961.

LAMPARELLI, M. C.. Graus de trofia em corpos d'água do estado de São Paulo: avaliação dos métodos de monitoramento. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 2004.

LAVAL, B. et al. Modeling circulation in lakes: Spatial and temporal variations. *Limnology and Oceanography*, v. 48, n. 3, p. 983-994, 2003.

LERMAN, A., IMBODEN, D. and GAT, J. *Physics and chemistry of lakes*. Berlin: Springer-Verlag. 1995.

LEWIS JR, William M. Tropical lakes: how latitude makes a difference. *Perspectives in tropical limnology*, v. 4364, p. 43-64, 1996.

LIMA, J. S. Aspectos Climáticos da Região Metropolitana de Porto Alegre. Porto Alegre: Instituto de Proteção ao Vôo. Ministério da Aeronáutica. 54 p. 1985.

LIU, H. et al. Eddy covariance measurements of surface energy budget and evaporation in a cool season over southern open water in Mississippi. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, v. 114, n. D4, 2009.

LIU, Y. et al. Cyanobacteria-/cyanotoxin-contaminations and eutrophication status before Wuxi drinking water crisis in Lake Taihu, China. *Journal of Environmental Sciences*, v. 23, n. 4, p. 575-581, 2011.

LIU, L. et al. Effects of vertical mixing on phytoplankton blooms in Xiangxi Bay of Three Gorges Reservoir: implications for management. *Water research*, v. 46, n. 7, p. 2121-2130, 2012.

LOWE-MCCONNELL, R. H. (Ed.). *Man-made lakes*. Institute of Biology, 1966.

MACINTYRE, S. et al. Climate-related variations in mixing dynamics in an Alaskan arctic lake. *Limnology and Oceanography*, v. 54, n. 6part2, p. 2401-2417, 2009.

MACKENTHUN, A. A.; STEFAN, H. G. Effect of flow velocity on sediment oxygen demand: Experiments. *Journal of Environmental Engineering*, v. 124, n. 3, p. 222-230, 1998.

MANTOVANI, J. E.; NOVO, E. M. L. M. Comportamento Espectral da Matéria Orgânica Dissolvida. *Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, p. 7, 1996.

MASS, C. F. Synoptic frontal analysis: Time for a reassessment?. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 72, n. 3, p. 348-363, 1991.

PERKS, C.. Dealing with stratification within a water supply reservoir. In: **69th Annual Water Industry Engineers and Operators' Conference**. 2006. p. 30-36.

MOBLEY, C. D.; MOBLEY, C. D. Light and water: radiative transfer in natural waters. Academic press, 1994.

MOEHL, J. F.; DAVIES, W. D.. Fishery intensification in small water bodies: a review for North America. 1993.

MORAIS, M. A. de; CASTRO, W. A. C. de; TUNDISI, J. G.. Climatologia de frentes frias sobre a Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), e sua influência na limnologia dos reservatórios de abastecimento de água. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 25, n. 2, p. 205-217, 2010.

MORENO-OSTOS, E. et al. Hydraulic management drives heat budgets and temperature trends in a Mediterranean reservoir. *International Review of Hydrobiology*, v. 93, n. 2, p. 131-147, 2008.

MOSTOFA, K. MG et al. (Ed.). *Photobiogeochemistry of organic matter: principles and practices in water environments*. Springer Science & Business Media, 2012.

MWAURA, F. Some aspects of water quality characteristics in small shallow tropical man-made reservoirs in Kenya. *African journal of science and technology*, v. 7, n. 1, 2006.

NÜRNBERG, G. K. Quantifying anoxia in lakes. *Limnology and oceanography*, v. 40, n. 6, p. 1100-1111, 1995.

NÜRNBERG, G. K. Quantified hypoxia and anoxia in lakes and reservoirs. *TheScientificWorldJOURNAL*, v. 4, p. 42-54, 2004.

OADES, J. M. Colour and turbidity in water. In: *Prediction in water quality: proceedings, symposium; sponsored by Australian Academy of Science and the Institution of Engineers, Australia, held in Canberra, 30 Nov-2 Dec 1982/edited by EM O'Loughlin, P. Cullen. Canberra [ACT]: Australian Academy of Science, 1982., 1982.*

Obras Hidráulicas – Barragem. Progestao ANA, 2016. Disponível em < <https://progestao.ana.gov.br/destaque-superior/boas-praticas/seguranca-de-barragens/curso-de-seguranca-de-barragens-dae-1/aula-2-segur-barragem-2016-pla.pdf> >. Acesso em 30 de setembro de 2021.

O problema da escassez de água no mundo. CETESB, 2021. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/aguas-interiores/informacoes-basicas/tpos-de-agua/o-problema-da-escassez-de-agua-no-mundo/>>. Acesso em: 17 de março de 2021.

OLIVEIRA, M. A., & Favero, L. P. L. (2002). Uma breve descrição de algumas técnicas para análise de séries temporais: Séries de Fourier, Wavelets, Arima, Modelos Estruturais para séries de tempos e redes neurais. VI SEMEAD Ensaio mqi. USP. Anais, São Paulo.

OLIVEIRA, S. L. de, MENDES, Z. C., CRISÓSTOMO, L. C. & ARAÚJO, F. G. Resultados preliminares do levantamento ictiológico na represa de Ribeirão das Lajes, Estado do Rio de Janeiro. Public. Avulsas Mus. Nac. do Rio de Janeiro (65): 87-90, 1986.

OLIVEIRA, J. N. P. de. A influência da poluição difusa e do regime hidrológico peculiar do semiárido na qualidade da água de um reservatório tropical. Dissertação de Mestrado. Rio Grande do Norte. 2012.

OSORIO, V. K. L.; OLIVEIRA, Wanda de. Polifosfatos em detergentes em pó comerciais. Química Nova, v. 24, n. 5, p. 700-708, 2001.

PADISÁK, J. et al. Deep layer cyanoprokaryota maxima in temperate and tropical lakes. Archiv Für Hydrobiologie Beiheft Advances in Limnology, v. 58, p. 175-199, 2003.

PAVANELLI, G.. Eficiência de diferentes tipos de coagulantes na coagulação, floculação e sedimentação de água com cor ou turbidez elevada. 2001. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

PETTS, G. E. Impounded rivers: perspectives for ecological management. Wiley, 1984.

PETTS, G. E. Water quality characteristics of regulated rivers. Progress in Physical Geography, v. 10, n. 4, p. 492-516, 1986.

PINHEIRO, M. R., & Paulo, S. R. D. (2011). Utilização da análise de Fourier no estudo de variáveis micrometeorológicas de uma floresta de transição do norte de Mato Grosso. Acta Amazonica, 41, 39-46.

PINTO, A. A. de S.. Avaliação da influência da precipitação e temperatura do ar na dinâmica térmica do reservatório do Descoberto-DF por meio do modelo GLM. 2018.

PORTO, M. F. A.; BRANCO, S. M.; LUCA, S. J. Caracterização da Qualidade da Água. In: PORTO, R. L. L.; BRANCO, S. M.; CLEARY, R. W. et al. Hidrologia ambiental. v.3. São Paulo: Edusp: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1991.

Projeto PLANÁGUA SEMADS/GTZ, 2001. Bacias Hidrográficas e recursos hídricos da macrorregião 2. Bacia da Baía de Sepetiba. Disponível em: <http://www.bibliotecaflorestal.ufv.br/bitstream/handle/123456789/3944/Livro_Bacias-Hidrogr%C3%A1ficas-e-Recursos-H%C3%ADricos-da-Macrorregi%C3%A3o2-Bacia-Ba%C3%ADa-Sepetiba_SEMADS-RJ.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 17 de março de 2021.

Qualidade de Água em Reservatórios. Disponível em <https://capacitacao.ana.gov.br/conhecerh/bitstream/ana/2205/1/Unidade_1.pdf>. Acesso em: 17 de março de 2021.

REYNOLDS, C. S. Phytoplankton periodicity: the interactions of form, function and environmental variability. *Freshwater biology*, v. 14, n. 2, p. 111-142, 1984.

RIBEIRO, H. M. C. et al. Monitoramento da Qualidade da Água em Grandes Reservatórios Usando Sensoriamento Remoto e Redes Neurais. *IEEE Latin America Transactions*, v. 6, n. 5, p. 419-423, 2008.

RODRIGUES, V. A. J.. Influência do sedimento no processo de remoção de nitrogênio por nitrificação/desnitrificação em lagoas de polimento. 2016.

RODRÍGUEZ-RODRÍGUEZ, M. et al. Thermal structure and energy budget in a small high mountain lake: La Caldera, Sierra Nevada, Spain. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, v. 38, n. 5, p. 879-894, 2004.

SABER, A.; JAMES, D. E.; HAYES, D. F. Effects of seasonal fluctuations of surface heat flux and wind stress on mixing and vertical diffusivity of water column in deep lakes. *Advances in water resources*, v. 119, p. 150-163, 2018.

SENA, M. G. T. et al. Variabilidade da condutividade elétrica e do pH nas águas superficiais da Região Semiárida. In: III INOVAGRI International Meeting. 2015.

SERAFIM, M.. UNIDADE 2: Qualidade de Água em Reservatórios. Capacitação ANA, 2020. Disponível em <https://capacitacao.ana.gov.br/conhecercerh/bitstream/ana/2205/2/Unidade_2.pdf> Disponível em: 30 de setembro de 2021.

SHARMA, S. K.; MAENG, S. K.; NAM, S-N. Characterization tools for differentiating natural organic matter from effluent organic matter. *Treatise on Water Science*, v. 3, c. 3.15, p. 417-427, 2011.

SILVA, A. E. P. et al. Influência da precipitação na qualidade da água do Rio Purus. *Acta amazônica*, v. 38, n. 4, p. 733-742, 2008.

SILVA, L. P.. A influência das condições de estabilidade da coluna d'água na estrutura das comunidades planctônicas (fito e zooplâncton) do reservatório de Ribeirão das Lajes. RJ. Dissertação de Mestrado. 2016.

STECH, J. L.; LORENZZETTI, J. A. The response of the South Brazil Bight to the passage of wintertime cold fronts. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, v. 97, n. C6, p. 9507-9520, 1992.

STRAŠKRABA, M. Retention time as a key variable of reservoir limnology. *Theoretical reservoir ecology and its applications*, v. 16, p. 385-410, 1999.

STRASKRABA, M.; TUNDISI, J. G.; DUNCAN, A. (Ed.). *Comparative reservoir limnology and water quality management*. Springer Science & Business Media, 2013.

STRAŠKRABA, M.; TUNDISI, J. G.; DUNCAN, A. State-of-the-art of reservoir limnology and water quality management. In: *Comparative reservoir limnology and water quality management*. Springer, Dordrecht. p. 213-288. 1993.

STREIT, N. M. et al. As clorofilas. *Ciência Rural*, v. 35, n. 3, p. 748-755, 2005.

STUMM, W. et al. Chemistry of the solid-water interface: processes at the mineral-water and particle-water interface in natural systems. John Wiley & Son Inc., 1992.

Stumm, W.; Morgan, J. J.; Aquatic Chemistry – Chemical Equilibria and Rates in Natural Waters. Nova Iorque. John Wiley & Sons, 3ed., 1996.

SYMONS, J. M.; WEIBEL, S. R.; ROBECK, G. G. Impoundment influences on water quality. Journal-American Water Works Association, v. 57, n. 1, p. 51-75, 1965.

TAIZ, L.; ZIEGLER, E. Fisiologia vegetal. 3.ed. Porto Alegre: Artmed, 2004. p.693.
Temperatura da Água. UFRRJ, sem ano. Disponível em <
<http://www.ufrj.br/institutos/it/de/acidentes/tem.htm>>. Acesso em: 17 de março de 2021.

THORNTON, K. W.; KIMMEL, B. L.; PAYNE, F. E. Reservoir limnology: ecological perspectives. John Wiley & Sons, 1990.

TILMAN, D.; KILHAM, S. S.; KILHAM, P.. Phytoplankton community ecology: the role of limiting nutrients. Annual review of Ecology and Systematics, v. 13, n. 1, p. 349-372, 1982.

TONIETTO, A. E.. Especiação Química de Cobre e Zinco nas águas do Reservatório do Iraí: Efeitos da Matéria Orgânica e Interação com microalgas. Tese de Doutorado. Dissertação (mestrado em Química), Universidade Federal do Paraná. 2006.

TUNDISI, J. G. Represas artificiais: perspectivas para o controle e manejo da qualidade da água para usos múltiplos. Anais do VI Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos, v. 4, p. 38-59, 1985.

TUNDISI, J. G. Reservatórios como sistemas complexos: teoria, aplicações e perspectivas para usos múltiplos. Ecologia de reservatórios: estrutura, função e aspectos sociais. Botucatu: Fundibio/Fapesp, p. 19-38, 1999.

TUNDISI, J. G.; MATSUMURA-TUNDISI, T.. Integration of research and management in optimizing multiple uses of reservoirs: the experience in South America and Brazilian case studies. In: Aquatic Biodiversity. Springer, Dordrecht. p. 231-242, 2003.

TUNDISI, J. G, et al. The response of Carlos Botelho (Lobo, Broa) reservoir to the passage of cold fronts as reflected by physical, chemical, and biological variables. Brazilian Journal of Biology, v. 64, n. 1, p. 177-186, 2004.

TUNDISI, J. G. et al. The response of reservoirs of southeastern Brazil to the passage of cold fronts as reflected by physical, chemical and biological variables. Internationale Vereinigung für theoretische und angewandte Limnologie: Verhandlungen, v. 29, n. 4, p. 2124-2128, 2006.

TUNDISI, J. G.; TUNDISI, T. M. Limnologia. São Paulo: Oficina de Textos. 631 p. Soils and Sediments, v. 2, n. 4, p. 216-222, 2008.

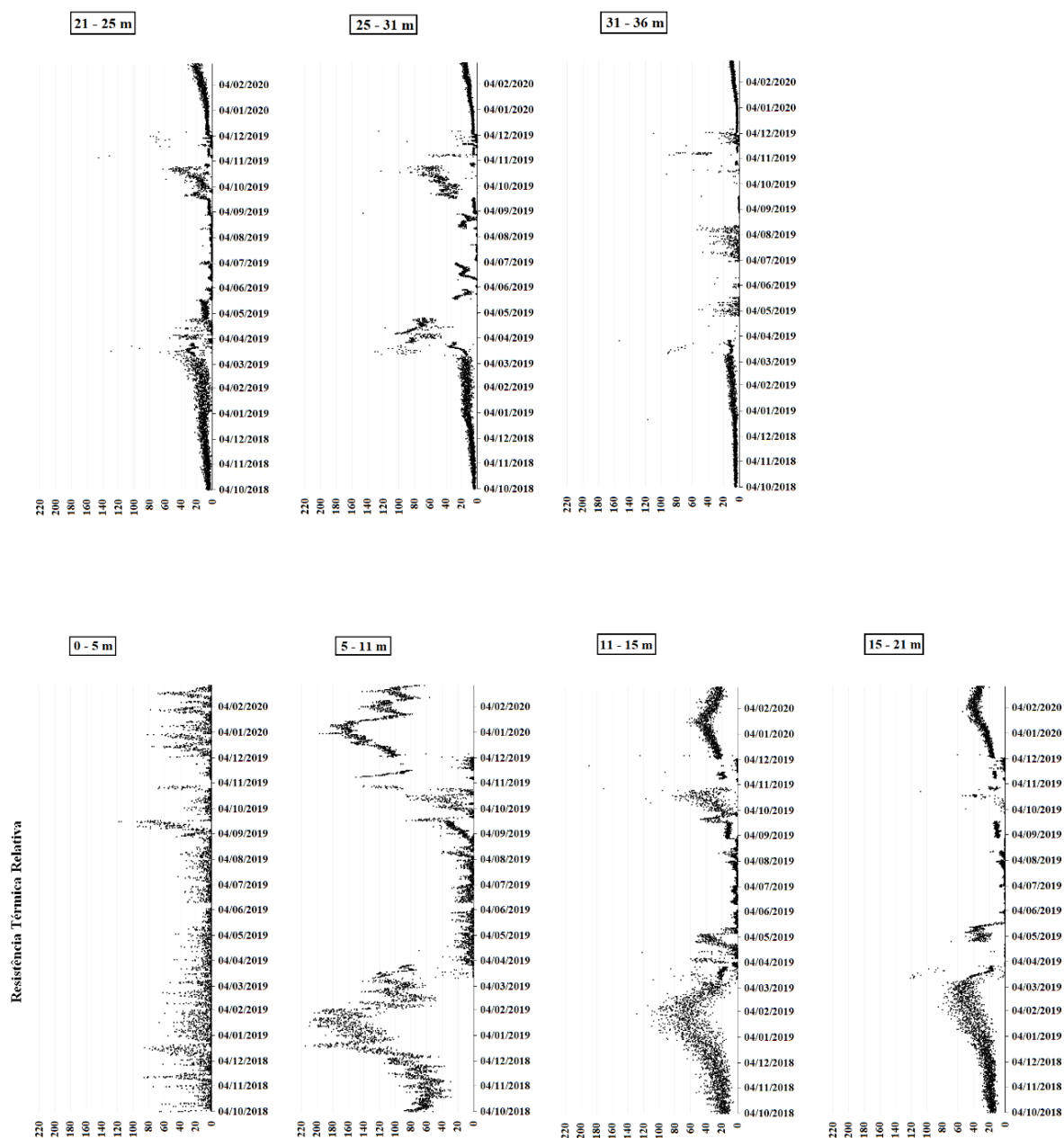
UHLMANN, D. Reservoirs as ecosystems. International Review of Hydrobiology, v. 83, p. 13-20, 1998.

VAREJÃO SILVA, M.A. Meteorologia e climatologia: versão digital 2. Recife, 2006. 449 p. Disponível em: <http://www.agritempo.gov.br/publish/publicacoes/>. Acesso em: Não consigo mais acesso.

VAZ, L. G. de L. et al. Avaliação da eficiência de diferentes agentes coagulantes na remoção de cor e turbidez em efluente de galvanoplastia. Eclética Química, v. 35, n. 4, p. 45-54, 2010.

- VIANA, J.. Physical and chemical post-dam alterations in the Jamari River, a hydroelectric-developed river of the Brazilian Amazon. *Hydrobiologia*, v. 472, n. 1, p. 235-247, 2002.
- VIDAL, J.; CASAMITJANA, X.. Forced resonant oscillations as a response to periodic winds in a stratified reservoir. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 134, n. 4, p. 416-425, 2008.
- VISSER, P. M. et al. Artificial mixing to control cyanobacterial blooms: a review. *Aquatic Ecology*, v. 50, n. 3, p. 423-441, 2016.
- Vodacek, A., Blough, N. V., DeGrandpre, M. D., DeGrandpre, M. D., & Nelson, R. K. (1997). Seasonal variation of CDOM and DOC in the Middle Atlantic Bight: Terrestrial inputs and photooxidation. *Limnology and Oceanography*, 42(4), 674-686.
- VOTRUBA, L.; BROŽA, V.. *Water management in reservoirs*. Elsevier, 1989.
- YUNUS A. C. ,MOURA L. F . M. , ISMAIL K. A. R. *Transferência de calor e massa : uma abordagem prática*. 3. ed. São Paulo: MCGraw-Hill do Brasil, 2009.
- WACHHOLZ, F.. Alterações Espectrais nas Imagens de Satélite nos Reservatórios das Usinas Hidrelétricas Caçu e Barra dos Coqueiros–GO. *Revista Geonorte*, v. 3, n. 5, p. 1170–1179-1170–1179, 2012.
- WESTERHOFF, P.; ANNING, D. Concentrations and characteristics of organic carbon in surface water in Arizona: influence of urbanization. *Journal of hydrology*, v. 236, n. 3-4, p. 202-222, 2000.
- WETZEL, R. G. *Limnology*. Philadelphia. WB Saunder Co, 1975.
- WETZEL, R. G. *Limnology: lake and river ecosystems*. gulf professional publishing, 2001.
- WÜEST, A.; LORKE, A.. Small-scale hydrodynamics in lakes. *Annual Review of fluid mechanics*, v. 35, n. 1, p. 373-412, 2003.
- Yang, B.; Gao, X.; Zhao, J.; Liu, Y.; Xie, L.; Lv, X.; Xing, Q. 2021. Potential linkage between sedimentary oxygen consumption and benthic flux of biogenic elements in a coastal scallop farming area, North Yellow Sea. *Chemosphere*, 273, 1-11p.
- YU, Z.; WANG, L.. Factors influencing thermal structure in a tributary bay of Three Gorges Reservoir. *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, v. 23, n. 4, p. 407-415, 2011.
- XU, Y. et al. Asynchrony of spring phytoplankton response to temperature driver within a spatial heterogeneity bay of Three-Gorges Reservoir, China. *Limnologica*, v. 41, n. 3, p. 174-180, 2011.
- ZHANG, Y. et al. Dissolved oxygen stratification and response to thermal structure and long-term climate change in a large and deep subtropical reservoir (Lake Qiandaohu, China). *Water Research*, v. 75, p. 249-258, 2015.
- Zhu, W., Yu, Q., Tian, Y. Q., Becker, B. L., Zheng, T., & Carrick, H. J. (2014). An assessment of remote sensing algorithms for colored dissolved organic matter in complex freshwater environments. *Remote Sensing of Environment*, 140, 766-778.

APÊNDICE A – Figura 20 - Variação mensal da Resistência Térmica Relativa – RTR no reservatório de Ribeirão das Lajes no período de outubro de 2018 a fevereiro de 2020.



Nota: Variação mensal da Resistência Térmica Relativa – RTR de diferentes camadas de água até os 35 metros de profundidade no reservatório de Ribeirão das Lajes no período de outubro de 2018 a fevereiro de 2020.

Fonte: A autora, 2022.

APÊNDICE B – Figura 21 - Figura 21 - Densidade ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) versus a profundidade (m) no reservatório de Ribeirão das Lajes durante o período de outubro de 2018 a fevereiro de 2020. (continua)

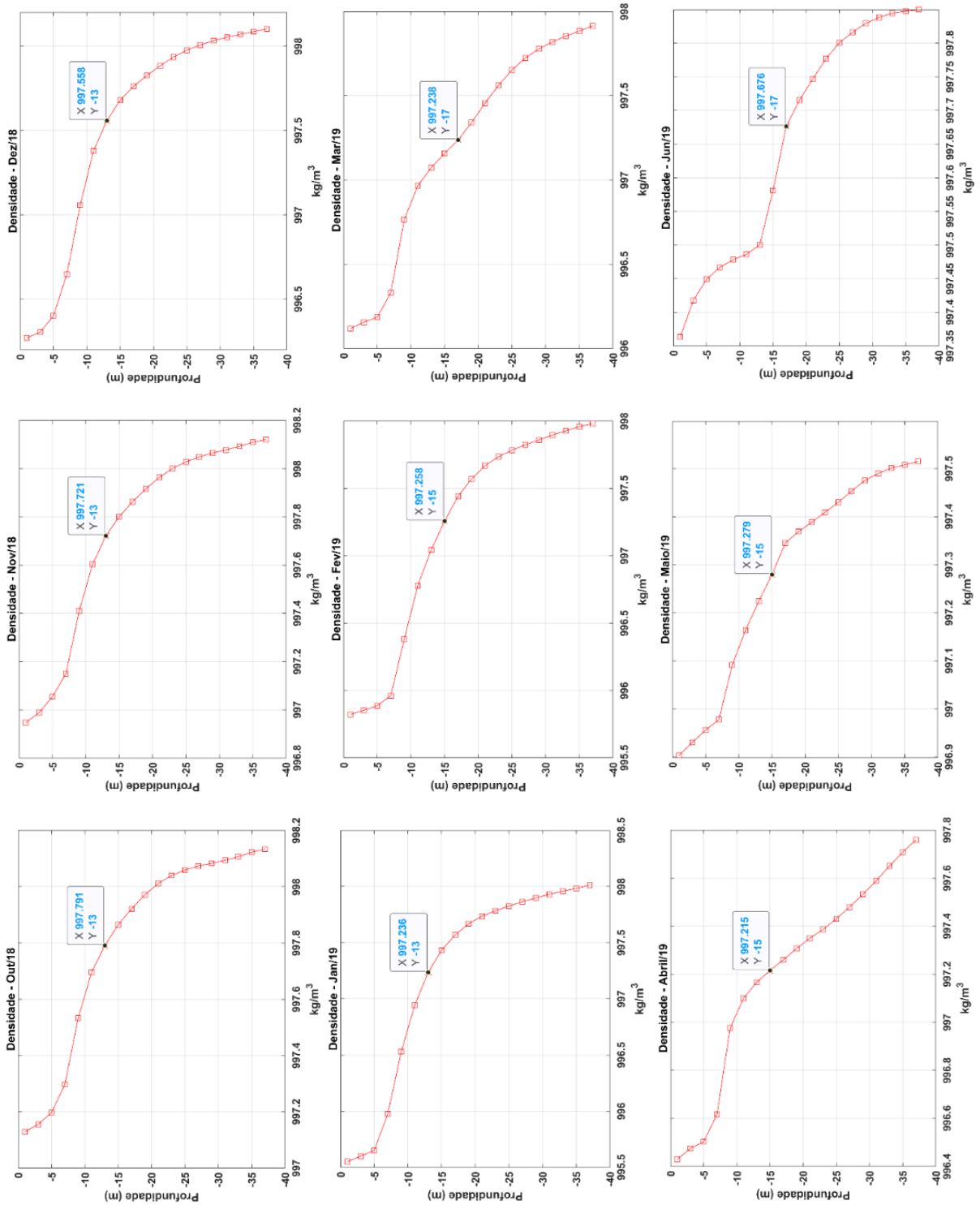
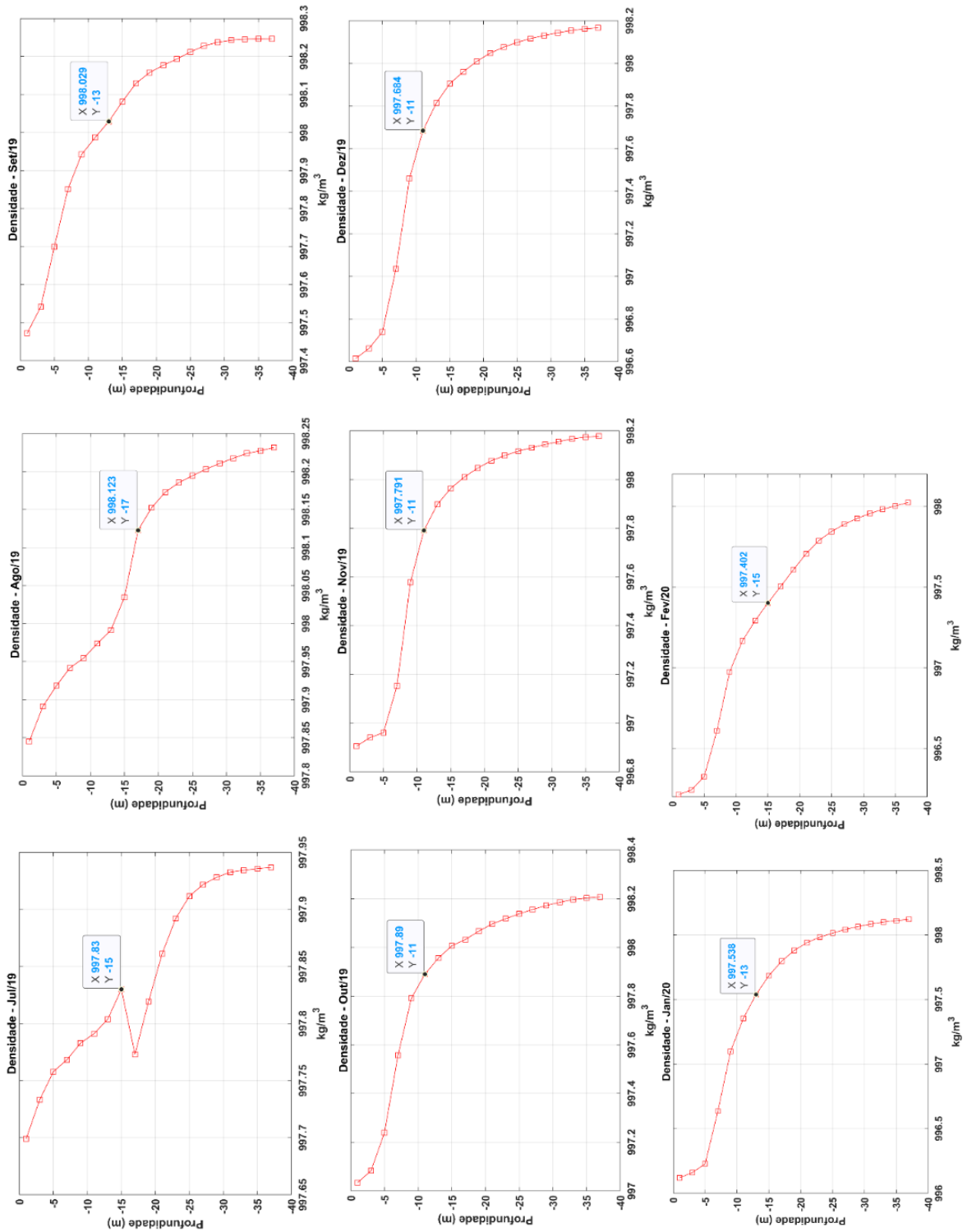


Figura 21 - Densidade ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) versus a profundidade (m) no reservatório de Ribeirão das Lajes durante o período de outubro de 2018 a fevereiro de 2020. (conclusão)



Fonte: A autora, 2022.

APÊNDICE C – Figura 22 - Curva de Estabilidade do período de outubro de 2018 a fevereiro de 2020 no reservatório de Ribeirão das Lajes. (continua)

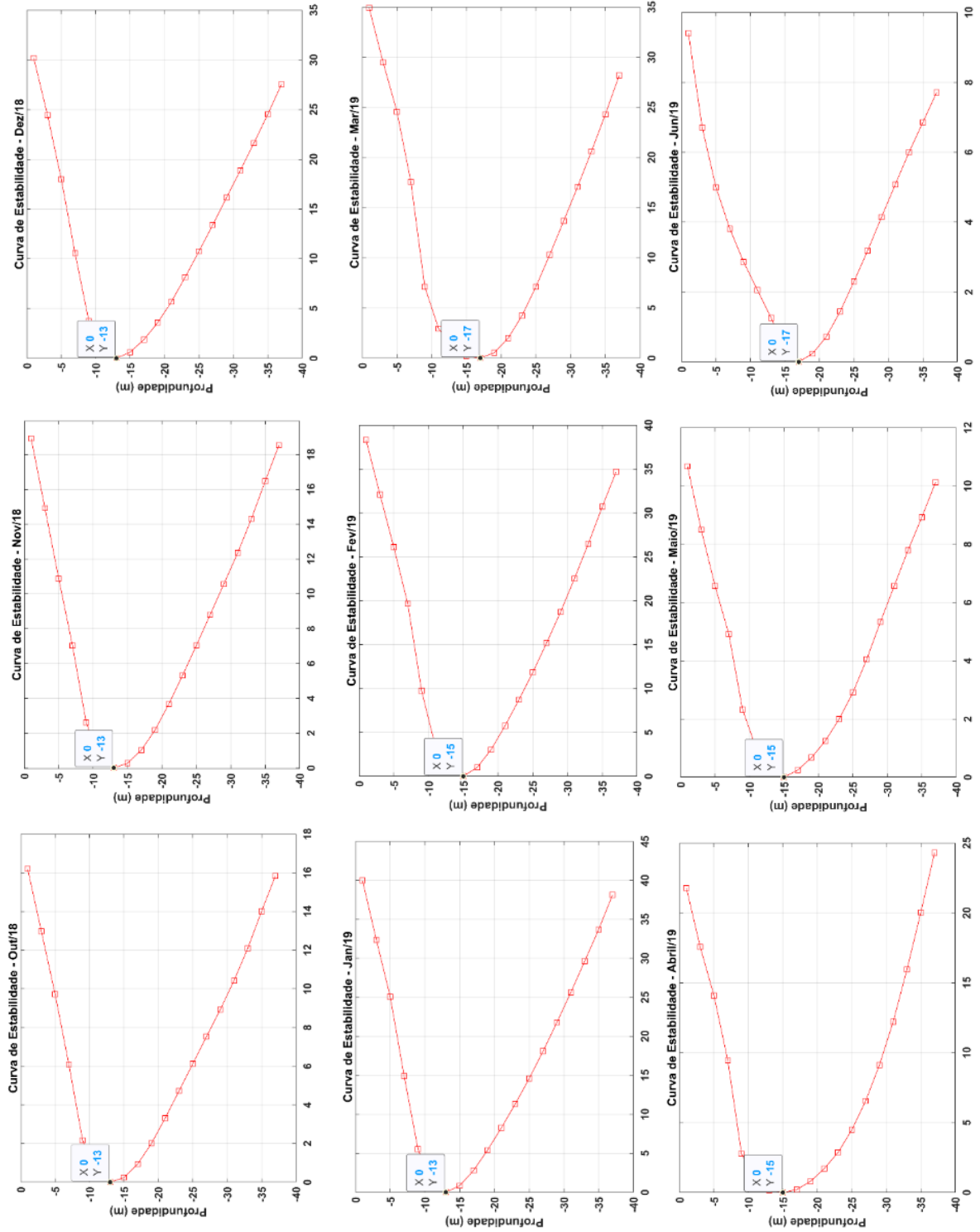
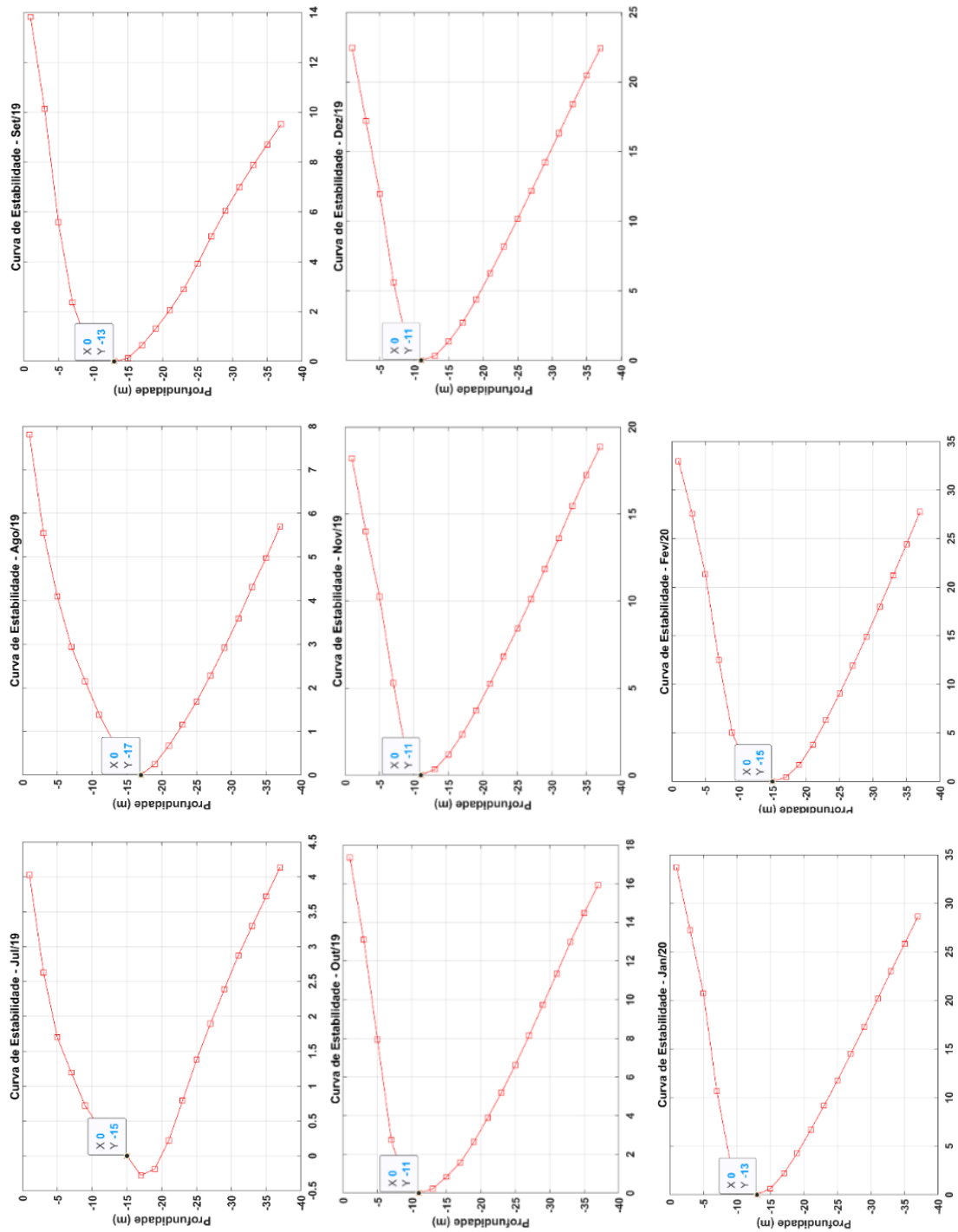


Figura 22 - Curva de Estabilidade do período de outubro de 2018 a fevereiro de 2020 no reservatório de Ribeirão das Lajes. (conclusão)



Legenda: Os valores $X = 0$ definem a densidade média (X) igual a 0 e Y é o valor da profundidade na qual $X = 0$.

Fonte: A autora, 2022.