

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

JULIANA PEREIRA DE MOURA E CLARO

**ANÁLISE DA ESTRATIFICAÇÃO TÉRMICA NO RESERVATÓRIO DO RIO
VERDE, PARANÁ**

CURITIBA

2016

JULIANA PEREIRA DE MOURA E CLARO

**ANÁLISE DA ESTRATIFICAÇÃO TÉRMICA NO RESERVATÓRIO DO RIO
VERDE, PARANÁ**

Projeto apresentado ao curso de Graduação em Engenharia Ambiental, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à aprovação da disciplina TT037 – Projeto Final II.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Cynara de Lourdes da Nóbrega Cunha.

CURITIBA

2016

RESUMO

O presente trabalho apresenta um estudo sobre o perfil térmico do reservatório do Rio Verde. Este estudo teve como principal objetivo analisar as variáveis meteorológicas que quebram e/ou formam a estratificação térmica na coluna d'água. Foram utilizados dados medidos na estação meteorológica instalada próxima à barragem do reservatório, entre 2008 e 2016, onde foram medidas a intensidade da radiação solar incidente, a temperatura da água em quatro profundidades diferentes e a velocidade e direção do vento. Durante este período foram selecionados quatro períodos que apresentavam o menor número de falhas e foram escolhidos dois dias para uma análise das variações diárias. Para avaliar quantitativamente os processos de mistura e estratificação, foram calculados os parâmetros: número do Lago (L_N), número de Wendderburn (W), estabilidade de Schimdt (S_T) e frequência de Brunt-Väisälä (N). Os cálculos foram realizados utilizando o programa *LakeAnalyzer* e executado no software *Matlab*. Uma segunda análise foi realizada observando a correlação entre as variáveis meteorológicas e a estabilidade de Schmidt. O reservatório do Rio Verde apresentou apenas um intervalo de mistura vertical das massas d'água em todos os períodos estudados, classificando-o como um reservatório monomítico quente. Os parâmetros do número do Lago e número de Wendderburn apresentaram-se elevados na maior parte do período, demonstrando que o vento exerce pouca influência no regime térmico.

Palavras-Chave: Estratificação térmica. *LakeAnalyzer*. Reservatório.

ABSTRACT

The present work presents a study about the thermal profile of the Rio Verde reservoir. This study had as main objective to analyze the meteorological variables that break down and / or form the thermal stratification in the water column. Data measured between 2008 and 2016 at the meteorological station installed near the reservoir dam were used to measure the intensity of incident solar radiation, water temperature at four different depths, and wind speed and direction. During this period, four cycles with the lowest number of failures were selected and two days were chosen for an analysis of the daily variations. To quantitatively evaluate the mixing and stratification processes, the following parameters were calculated: Lake number (L_N), Wendderburn number (W), Schimdt stability (S_T) and Brunt-Väisälä frequency (N). Calculations were performed using the LakeAnalyzer program and run in the Matlab software. A second analysis was performed observing the correlation between the meteorological variables and Schmidt stability. The Rio Verde reservoir presented only one vertical mixing interval of the water masses in all studied periods, classifying it as a hot monomitical reservoir. The parameters of the Lake number and Wendderburn number were high for most of the period, demonstrating that the wind exerts little influence on the thermal regime.

Keyword: Thermal stratification. *LakeAnalyzer*. Reservoir.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 –	MAPA DA LOCALIZAÇÃO DO RESERVATÓRIO DO RIO VERDE	3
FIGURA 2 –	PARÂMETROS DE INFLUÊNCIA NA ESTRATIFICAÇÃO DO RESERVATÓRIO.....	5
FIGURA 3 –	TRANSFERÊNCIA DE ENERGIA NA INTERFACE AR-ÁGUA	7
FIGURA 4 –	VARIAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA DA ÁGUA EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA	9
FIGURA 5 –	PERFIL DA MASSA ESPECÍFICA DO RESERVATÓRIO DO RIO VERDE.....	10
FIGURA 6 –	PERFIL TÉRMICO DO RESERVATÓRIO DO RIO VERDE	10
FIGURA 7 –	CAMADAS GERADAS A PARTIR DA ESTRATIFICAÇÃO TÉRMICA.....	12
FIGURA 8 –	PADRÃO DE VENTO ENTRE SETEMBRO DE 2008 E MARÇO DE 2009, MEDIDOS NA ESTAÇÃO METEOROLÓGICA DO RESERVATÓRIO	14
FIGURA 9 –	VISUALIZAÇÃO TOPOGRÁFICA DE FUNDO E LOCALIZAÇÃO DA ESTAÇÃO METEOROLÓGICA NO RESERVATÓRIO DO RIO VERDE	17
FIGURA 10 –	MÉDIAS DIÁRIAS DA VELOCIDADE DO VENTO (m/s) NO PERÍODO 1.....	20
FIGURA 11 –	MÉDIAS DIÁRIAS DA RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE (W/m ²) NO PERÍODO 1.....	21
FIGURA 12 –	MÉDIAS DIÁRIAS DA RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE (W/m ²) NO PERÍODO 2.....	21
FIGURA 13 –	MÉDIAS DIÁRIAS DA VELOCIDADE DO VENTO (m/s) NO PERÍODO 3.....	22
FIGURA 14 –	MÉDIAS DIÁRIAS DA RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE (W/m ²) NO PERÍODO 3.....	22
FIGURA 15 –	MÉDIAS DIÁRIAS DA VELOCIDADE DO VENTO (m/s) NO PERÍODO 4.....	23
FIGURA 16 –	MÉDIAS DIÁRIAS DA RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE (W/m ²) NO PERÍODO 4.....	23
FIGURA 17 –	VELOCIDADE DO VENTO (m/s) NO DIA 23 DE SETEMBRO DE 2015.....	24
FIGURA 18 –	RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE (W/m ²) NO DIA 23 DE SETEMBRO DE 2015.....	24
FIGURA 19 –	VELOCIDADE DO VENTO (m/s) NO DIA 9 DE DEZEMBRO DE 2015	25
FIGURA 20 –	RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE (W/m ²) NO DIA 9 DE DEZEMBRO DE 2015	25
FIGURA 21 –	PERFIL VERTICAL DA TEMPERATURA DA ÁGUA (°C) NO PERÍODO 1	30
FIGURA 22 –	ESTABILIDADE DE SCHMIDT (J/m ²) NO PERÍODO 1	30
FIGURA 23 –	QUADRADO DA FREQUÊNCIA DE BRUNT-VÄISÄLÄ (s ⁻²) NO PERÍODO 1	30
FIGURA 24 –	NÚMERO DO LAGO NO PERÍODO 1	31
FIGURA 25 –	NÚMERO DE WENDDERBURN NO PERÍODO 1.....	31
FIGURA 26 –	CORRELAÇÃO DA ESTABILIDADE DE SCHMIDT (J/m ²) E RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE (W/m ²) NO PERÍODO 1	31
FIGURA 27 –	CORRELAÇÃO DA ESTABILIDADE DE SCHMIDT E VELOCIDADE DO VENTO (m/s) NO PERÍODO 1.....	32

FIGURA 28 – CORRELAÇÃO DAS MÉDIAS MENSAIS DA ESTABILIDADE DE SCHMIDT (J/m^2) E A) RADIAÇÃO SOLAR (W/m^2) E B) VELOCIDADE DO VENTO (m/s) NO PERÍODO 1	32
FIGURA 29 – PERFIL VERTICAL DA TEMPERATURA DA ÁGUA ($^{\circ}C$) NO PERÍODO 2	33
FIGURA 30 – ESTABILIDADE DE SCHMIDT (J/m^2) NO PERÍODO 2	34
FIGURA 31 – QUADRADO DA FREQUÊNCIA DE BRUNT-VÄISÄLÄ (s^{-2}) NO PERÍODO 2	34
FIGURA 32 – CORRELAÇÃO DA ESTABILIDADE DE SCHMIDT (J/m^2) E RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE (W/m^2) NO PERÍODO 2	34
FIGURA 33 – PERFIL VERTICAL DA TEMPERATURA DA ÁGUA ($^{\circ}C$) NO PERÍODO 3	36
FIGURA 34 – ESTABILIDADE DE SCHMIDT (J/m^2) NO PERÍODO 3	36
FIGURA 35 – QUADRADO DA FREQUÊNCIA DE BRUNT-VÄISÄLÄ (s^{-2}) NO PERÍODO 3	36
FIGURA 36 – NÚMERO DO LAGO NO PERÍODO 3	37
FIGURA 37 – NÚMERO DE WENDDERBURN NO PERÍODO 3	37
FIGURA 38 – CORRELAÇÃO DA ESTABILIDADE DE SCHMIDT (J/m^2) E RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE (W/m^2) NO PERÍODO 3	37
FIGURA 39 – CORRELAÇÃO DA ESTABILIDADE DE SCHMIDT(J/m^2) E VELOCIDADE DO VENTO (m/s) NO PERÍODO 3.....	38
FIGURA 40 – PERFIL VERTICAL DA TEMPERATURA DA ÁGUA ($^{\circ}C$) NO PERÍODO 4	39
FIGURA 41 – ESTABILIDADE DE SCHMIDT (J/m^2) NO PERÍODO 4	39
FIGURA 42 – QUADRADO DA FREQUÊNCIA DE BRUNT-VÄISÄLÄ (s^{-2}) NO PERÍODO 4	40
FIGURA 43 – NÚMERO DO LAGO NO PERÍODO 3	40
FIGURA 44 – NÚMERO DE WENDDERBURN NO PERÍODO 4	40
FIGURA 45 – CORRELAÇÃO DA ESTABILIDADE DE SCHMIDT (J/m^2) E RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE (W/m^2) NO PERÍODO 4	40
FIGURA 46 – CORRELAÇÃO DA ESTABILIDADE DE SCHMIDT (J/m^2) E VELOCIDADE DO VENTO (m/s) NO PERÍODO 4.....	41
FIGURA 47 – PERFIL VERTICAL DA TEMPERATURA DA ÁGUA ($^{\circ}C$) NO DIA 23 DE SETEMBRO DE 2015	42
FIGURA 48 – ESTABILIDADE DE SCHMIDT (J/m^2) NO DIA 23 DE SETEMBRO DE 2015.....	43
FIGURA 49 – QUADRADO DA FREQUÊNCIA DE BRUNT-VÄISÄLÄ (s^{-2}) NO DIA 23 DE SETEMBRO DE 2015	43
FIGURA 50 – NÚMERO DO LAGO NO DIA 23 DE SETEMBRO DE 2015.....	43
FIGURA 51 – NÚMERO DE WENDDERBURN NO DIA 23 DE SETEMBRO DE 2015.....	44
FIGURA 52 – CORRELAÇÃO DA ESTABILIDADE DE SCHMIDT (J/m^2) E RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE (W/m^2) NO DIA 23 DE SETEMBRO DE 2015.....	44

FIGURA 53 – CORRELAÇÃO DA ESTABILIDADE DE SCHMIDT (J/m^2) E VELOCIDADE DO VENTO (M/S) NO DIA 23 DE SETEMBRO DE 2015.....	44
FIGURA 54 – VELOCIDADE DO VENTO (m/s) PARA DIFERENTES DIREÇÕES DO VENTO NO DIA 23 DE SETEMBRO DE 2015.....	45
FIGURA 55 – PERFIL VERTICAL DA TEMPERATURA DA ÁGUA ($^{\circ}C$) NO DIA 9 DE DEZEMBRO DE 2015	46
FIGURA 56 – ESTABILIDADE DE SCHMIDT (J/m^2) NO DIA 9 DE DEZEMBRO DE 2015	47
FIGURA 57 – QUADRADO DA FREQUÊNCIA DE BRUNT-VÄISÄLÄ (s^{-2}) NO DIA 9 DE DEZEMBRO DE 2015	47
FIGURA 58 – NÚMERO DO LAGO NO DIA 9 DE DEZEMBRO DE 2015	47
FIGURA 59 – NÚMERO DE WENDDERBURN NO DIA 9 DE DEZEMBRO DE 2015	48
FIGURA 60 – CORRELAÇÃO DA ESTABILIDADE DE SCHMIDT (J/m^2) E RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE (W/m^2) NO DIA 9 DE DEZEMBRO DE 2015	48
FIGURA 61 – CORRELAÇÃO DA ESTABILIDADE DE SCHMIDT (J/m^2) E VELOCIDADE DO VENTO (m/s) NO DIA 9 DE DEZEMBRO DE 2015	48
FIGURA 62 – VELOCIDADE DO VENTO (m/s) PARA DIFERENTES DIREÇÕES DO VENTO NO DIA 9 DE DEZEMBRO DE 2015	49

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.2 OBJETIVOS.....	3
1.2.1 Objetivo geral	3
1.2.2 Objetivos específicos	3
2 REFERENCIAL TEÓRICO	5
2.1 RADIAÇÃO SOLAR E O BALANÇO DE ENERGIA EM RESERVATÓRIOS	6
2.2 TRANFERÊNCIA DE CALOR	8
2.3 ESTRATIFICAÇÃO TÉRMICA	11
2.4 PARÂMETROS QUANTITATIVOS	15
3 MATERIAL E MÉTODOS	17
3.1 ÁREA DE ESTUDO	17
3.2 COLETA E ANÁLISE DE DADOS	19
3.3 CORRELAÇÃO ENTRE VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS E O PROCESSO DE ESTRATIFICAÇÃO	25
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	28
4.1 ANÁLISE ANUAL	28
4.2. ANÁLISE DAS VARIAÇÕES DIÁRIAS.....	41
5 CONCLUSÕES	50
6 REFERÊNCIAS	52

1 INTRODUÇÃO

Reservatórios são ambientes artificiais construídos para suprir algumas necessidades da sociedade, como o abastecimento de água potável, geração de energia elétrica, suprimento para irrigação, piscicultura, lazer, navegação, entre outros. Esses ambientes são formados a partir do barramento artificial de um ambiente lótico, transformando um rio em um ambiente lêntico, com tempo de retenção significativo e vazão efluente controlada. Essa interferência humana nas condições naturais gera impactos ambientais negativos, portanto torna-se necessário um conhecimento aprofundado desses sistemas aquáticos.

O barramento dos rios e a consequente estagnação da água provocam alterações na escala espacial nas condições de circulação desses ambientes. Essas alterações fazem com que os processos de transporte passem a ocorrer preferencialmente na direção vertical, considerando a diminuição nas variações da circulação nas direções transversais e longitudinais (CUNHA *et al.*, 2011)

Problemas de qualidade da água em ambientes lênticos (lagos e reservatórios) diferem daqueles de ambientes lóticos (rios e estuários). Mesmo que os elementos causadores dos problemas sejam semelhantes para ambos, a escala temporal-espacial dos fenômenos que ocorrem em lagos e reservatório difere das escalas dos rios e estuários; logo, os processos físicos, químicos e biológicos apresentam características, intensidade e importância distintas para cada ambiente (BRANCO *et al.*, 1991).

A estratificação térmica de um reservatório é caracterizada pela formação de um perfil de temperatura na direção vertical. A radiação solar transfere energia calorífica para o corpo d'água, aumentando a temperatura das camadas superficiais e, conseqüentemente, diminuindo sua massa específica. Devido à força de empuxo, as massas de água mais quentes, portanto mais leve, permanecem na superfície, gerando uma barreira física, impedindo o transporte entre camadas.

Os processos de formação e quebra da estratificação térmica estão intimamente ligados aos processos de mistura, destacando-se os processos de distribuição dos gases dissolvidos, a ciclagem de nutrientes e o deslocamento de organismos planctônicos na coluna d'água, podendo alterar a qualidade da água e, conseqüentemente, o ecossistema aquático (MIRANDA, 2009).

No perfil térmico estratificado observa-se a formação de três camadas

distintas denominadas *epilímnio*, *metalímnio* e *hipolímnio*. O *epilímnio* representa a camada superficial com temperaturas maiores e menor densidade, enquanto que o *hipolímnio* apresenta temperaturas menores e maior densidade, devido à ausência de radiação solar capaz de transmitir calor para camadas profundas. O *metalímnio* representa a transição entre o *epilímnio* e o *hipolímnio*.

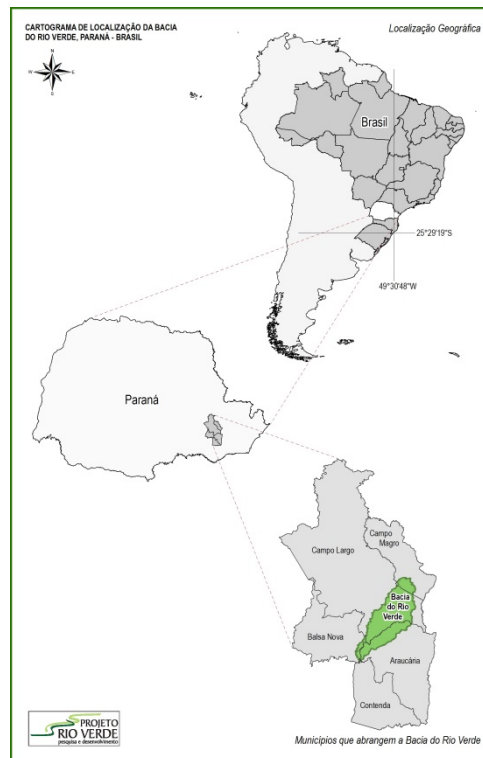
A movimentação de massas d'água na direção vertical pode causar a quebra na estratificação térmica do reservatório, promovida pela força de empuxo ou pela ação do vento, que atua na superfície d'água. Quando o vento é suficientemente eficiente para promover agitação e mistura das camadas superficiais, ocorre a redistribuição das massas e, conseqüentemente, a propagação de calor para as camadas mais profundas. Portanto, a ação do vento, assim como o empuxo, é determinante na formação do perfil térmico dos reservatórios.

Existem vários parâmetros quantitativos que relacionam as forças desestabilizadoras da estratificação (a ação do vento, a força de empuxo, as correntes longitudinais e as variações de vazões afluentes e efluentes) com a formação do perfil térmico do reservatório. Os parâmetros mais utilizados na literatura são o número do Lago (L_N), o número de Wendderburn (W), a estabilidade de Schimdt (S_T) e a frequência de Brunt-Väisälä (N).

Este trabalho mostra uma avaliação e quantificação da estratificação térmica e dos forçantes que formam e/ou quebram a estratificação no reservatório do Rio Verde, a partir da observação de dados meteorológicos e da temperatura da água medidos no reservatório. O reservatório Rio Verde foi construído para suprir a demanda de água da refinaria Presidente Getúlio Vargas (REPAR) em 1976. O reservatório está localizado na região metropolitana de Curitiba, entre os municípios de Araucária, Campo Largo, Campo Magro e Balsa Nova (Figura 1), e faz parte da bacia hidrográfica do Rio Verde. A zona climática é classificada como subtropical úmida, com verões moderados e sem estação de estiagem definida (ANDREOLI *et al.*, 2011).

Na região da barragem do reservatório Rio Verde foi instalada uma estação meteorológica, elevada aproximadamente 10 metros da superfície da água, capaz de medir a temperatura do ar, umidade relativa do ar, precipitação, velocidade e direção do vento e temperatura da água em quatro profundidades diferentes na coluna d'água. Os dados foram coletados durante o período de agosto de 2008 e junho de 2016.

FIGURA 1 – MAPA DA LOCALIZAÇÃO DO RESERVATÓRIO DO RIO VERDE



FONTE: CUNHA, *et. al.* (2011)

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo analisar dados meteorológicos coletados entre 2008 e 2016 no reservatório do Rio Verde, relacionando-os com o perfil térmico do reservatório. A correlação entre os agente que geram variação no perfil de temperatura e a estratificação é avaliada quantitativamente, a partir do cálculo de parâmetros capazes de mensurar a influência desses forçantes na quebra e/ou formação da estratificação.

1.2.2 Objetivos específicos

- Analisar a temperatura da água em quatro profundidades diferentes as variáveis meteorológicas do reservatório do Rio Verde: radiação solar incidente e direção e velocidade do vento;
- Calcular os parâmetros que descrevem a estratificação térmica do

reservatório: número do Lago (L_N), número de Wendderburn (W), estabilidade de Schimdt (S_T) e frequência de Brunt-Väisälä (N);

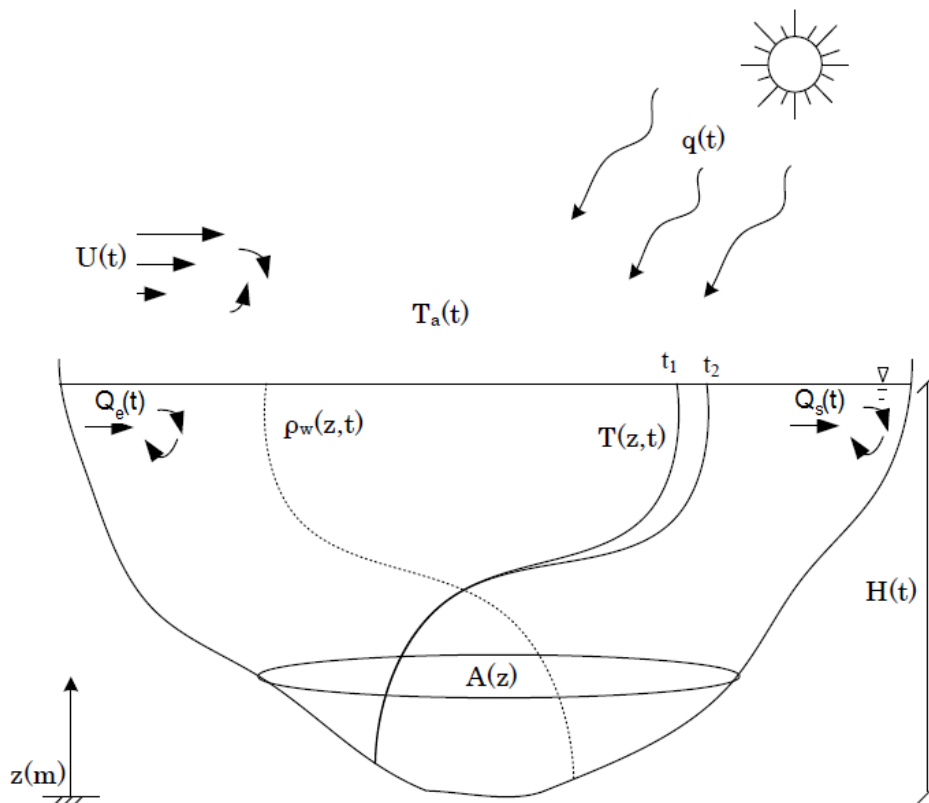
- Avaliar a correlação entre a perda e/ou ganho de energia na superfície do reservatório e os parâmetros que descrevem a estratificação térmica considerando uma escala anual;
- Avaliar a correlação entre a intensidade do vento no reservatório e os parâmetros que descrevem a estratificação térmica considerando uma escala anual;
- Definir um dia com maior e menor ocorrência do vento na direção com maior pista e assim relacionar as escalas diárias da estratificação, considerando dois dias.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

O regime térmico de um reservatório é caracterizado pelos efeitos de energia recebida pela superfície da água, proveniente da radiação solar incidente e da radiação difusa da atmosfera, da ação do vento na superfície, dos transportes advectivos e difusivos do calor e das vazões de entrada e saída do reservatório.

Na Figura 2 são apresentados os parâmetros que podem modificar a estratificação térmica de um reservatório, onde z é a elevação medida a partir do fundo do reservatório (m), t é o tempo (s), $T_a(t)$ é a temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$), $U(t)$ é a velocidade do vento ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), $q(t)$ é a fonte de calor solar e atmosférico ($\text{J}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$), $\rho_w(z, t)$ é a massa específica da água que varia de acordo com a profundidade ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$), $T(z, t)$ é a temperatura da água ($^{\circ}\text{C}$) em função da profundidade, $Q_e(t)$ é a soma das vazões de entrada e $Q_s(t)$ é a soma das vazões de saída ($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$), $H(t)$ é a profundidade (m) e $A(z)$ é a área horizontal em função da profundidade (m^2) (POLLI, 2014).

FIGURA 2 – PARÂMETROS DE INFLUÊNCIA NA ESTRATIFICAÇÃO DO RESERVATÓRIO



FONTE: POLLI (2014).

A energia proveniente da radiação solar exerce grande influência no metabolismo e na dinâmica da água no reservatório. A radiação solar fornece energia ao processo de fotossíntese das algas, assim como o processo de aquecimento do reservatório, contribuindo para a movimentação de massas de água e outros processos dominados pela temperatura dentro desse sistema (WETZEL, 1975).

Quando a radiação solar transfere energia na forma de calor para as camadas superficiais do corpo d'água, a temperatura aumenta e produz alterações na massa específica da água, dificultando a mistura de água na coluna vertical. As camadas com valores de massa específica menor tendem a permanecer na superfície, enquanto que camadas com maior massa específica afundam, provocando a estratificação.

Nesta seção é abordado o comportamento de alguns destes parâmetros com o objetivo de analisar e relacionar o processo de estratificação do reservatório, os forçantes que quebram a estratificação e os parâmetros quantitativos da estratificação térmica.

2.1 RADIAÇÃO SOLAR E O BALANÇO DE ENERGIA EM RESERVATÓRIOS

Segundo Esteves (1988), a radiação difusa é composta pela radiação que atravessa a atmosfera e é absorvida ou refletida nas partículas de poeira, gases e vapor d'água. Deste modo, sobre a superfície dos reservatórios tem-se a radiação difusa da atmosfera e a radiação de incidência direta.

Da radiação de incidência direta, parte é absorvida pelo corpo d'água e parte é refletida, sendo a quantidade de cada parcela dependente das condições de turbulência da superfície da água e do ângulo de incidência do feixe de luz. Essa angulação varia de acordo com a latitude e o dia do ano e hora. A radiação difusa é proveniente do espalhamento da luz por partículas presentes no ar, assim, a presença de nuvens no céu, a umidade relativa do ar e a presença de indústrias no entorno podem alterar também a quantidade de energia absorvida no reservatório. Portanto, a quantidade e a composição espectral da radiação solar na superfície da água dependem da latitude, da sazonalidade, da altitude, da hora do dia e de condições meteorológicas do lago (WETZEL, 1975).

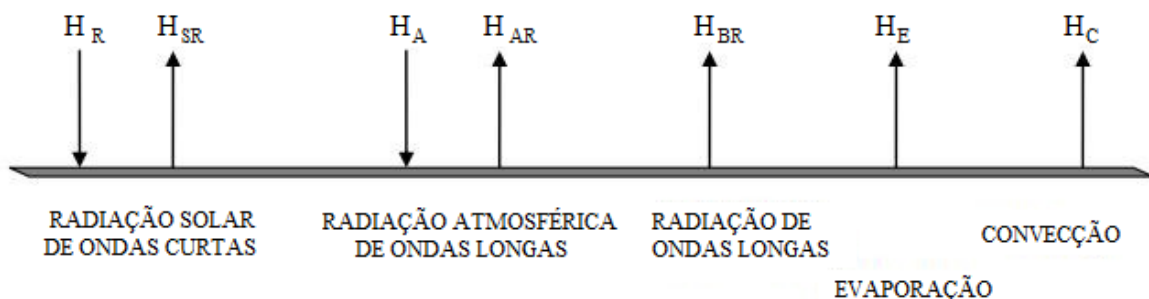
A energia solar pode ser absorvida pela matéria por meio de unidades denominadas fótons, em que a energia associada a cada fóton é proporcional à frequência da onda e inversamente proporcional ao comprimento de onda, segundo a lei de Planck. Ao analisar a relação entre a energia absorvida e a frequência da luz, observamos que a energia máxima absorvida ocorre no infravermelho, para comprimentos de onda próximos de $1\mu\text{m}$ (WETZEL, 1975). Porém, no reservatório não ocorre somente ganho de energia calorífica por radiação solar. O próprio reservatório pode emitir radiação de ondas curtas, perdendo energia calorífica, assim como perde energia devido à evaporação, à precipitação, à absorção de energia por partículas suspensas e outros fatores.

Henderson-Sellers (1986) descreve o balanço energético de um reservatório como:

$$H_N = (H_S - H_{SR}) + (H_A - H_{AR}) - H_{BR} - H_L \quad (1)$$

no qual H_S é a radiação incidente de ondas curtas, H_A é a radiação incidente de ondas longas, H_{SR} e H_{AR} representam a radiação refletida (albedo) de ondas curtas e ondas longas respectivamente, H_{BR} é a perda de radiação de ondas longas a partir da superfície da água, e H_L é a perda de energia não radiativa, que equivale ao somatório da perda por evaporação (H_E) e perda por transferência de calor devido à convecção (H_C). As transferências de energia associadas à precipitação são muito pequenas comparadas com a evaporação, já que não ocorre mudança de estado na precipitação. A Figura 3 mostra os ganhos e perdas de energia na interface ar-água.

FIGURA 3 – TRANSFERÊNCIA DE ENERGIA NA INTERFACE AR-ÁGUA



FONTE: MANNICH (2013).

As variáveis representativas da radiação não dependem da temperatura do lago e são obtidas a partir de observações meteorológicas, diferentemente dos

termos H_{BR} , H_E e H_C , que dependem da temperatura superficial da água, temperatura do ar, pressão de vapor do ar e velocidade do vento (MANNICH, 2013).

2.2 TRANFERÊNCIA DE CALOR

Devido à presença de substâncias dissolvidas, dos organismos clorofilados e de detritos orgânicos e inorgânicos particulados em suspensão na água, a radiação está submetida a processos de dispersão e absorção ao longo da coluna de água. O somatório desses processos resulta no fenômeno de atenuação de radiação, que ocorre de maneira exponencial ao longo na coluna d'água e é função da quantidade de material em suspensão (ESTEVES, 1988). Portanto, a intensidade da luz para cada profundidade (I_z) é função da intensidade de luz incidente na superfície (I_0), do coeficiente de atenuação (η) e da profundidade (z) (WETZEL, 1975):

$$I_z = I_0 e^{-\eta z} \quad (2)$$

A radiação solar é a maior fonte de energia calorífica em reservatórios. Porém, a luz penetra na coluna de água como uma função exponencial relativa à profundidade, decaindo rapidamente e impedindo que camadas inferiores recebam a mesma quantidade de energia. Mesmo assim, o perfil térmico demonstra que ocorre transferência de calor para camadas mais profundas (WETZEL, 1975).

A massa específica da água pura $\rho(T)$, em $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$, sem o efeito da salinidade, é uma função da temperatura T , em $^{\circ}\text{C}$, expressa da seguinte forma (Equação 17; UNESCO, 1981):

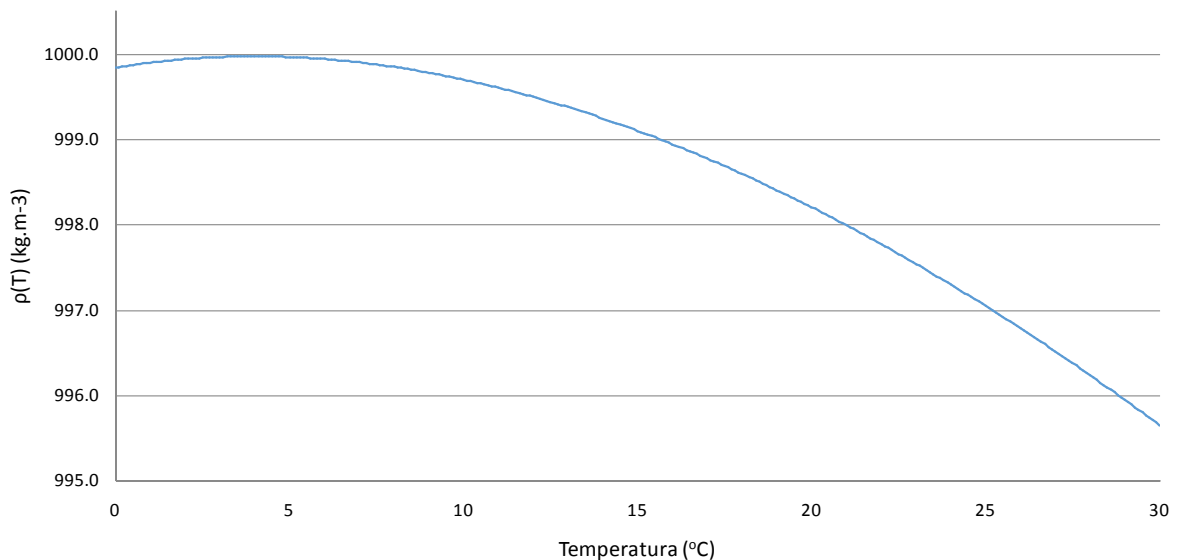
$$\rho(T) = 999,842594 + 6,793952 \times 10^{-2} \cdot T - 9,09529 \times 10^{-3} \cdot T^2 + 1,001685 \times 10^{-4} \cdot T^3 - 1,120083 \times 10^{-6} \cdot T^4 + 6,536336 \times 10^{-9} \cdot T^5 \quad (3)$$

Devido à não linearidade da equação, a massa específica da água diminui mais rapidamente para temperaturas elevadas, assim como para baixas temperaturas é observado uma massa específica maior, como ilustrado na Figura 4.

A estratificação térmica estável é caracterizada por camadas d'água que apresentam massas específicas diferentes que impedem a circulação e redistribuição de calor ao longo da coluna d'água. Porém, quando a radiação solar é reduzida, diminuindo a temperatura da água na superfície, as camadas superficiais esfriam e adquirem massa específica maior, enquanto que camadas imediatamente abaixo continuam com massa específica menores, caracterizando uma estratificação

instável. Esse fenômeno ocorre muito rapidamente, sendo muito difícil a obtenção de medições de perfis com esta condição, pois logo sucede a inversão de camadas e a movimentação das massas d'água, voltando a uma estratificação estável.

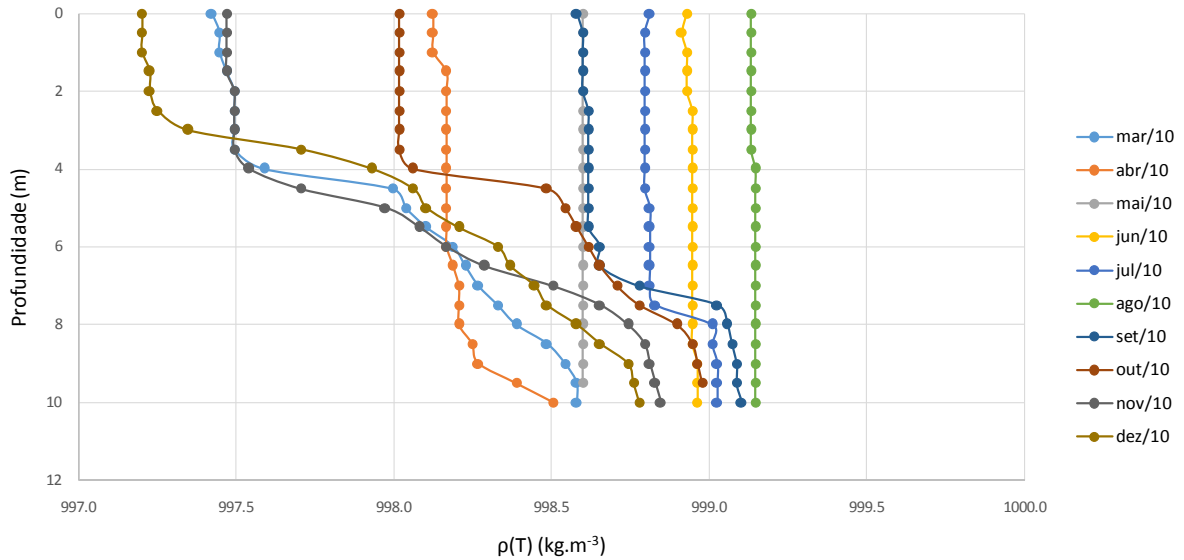
FIGURA 4 – VARIAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA DA ÁGUA EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA



O comportamento da estratificação térmica e da variação da massa específica da água é nítido no reservatório Rio Verde, como ilustram a Figura 5 e Figura 6, onde é possível observar os perfis de massa específica da água no reservatório e o perfil térmico durante o período de um ano, entre julho de 2008 e julho de 2009. Durante os meses mais frios, entre maio e setembro, não é observada estratificação térmica, e, portanto, a variação da massa específica é pequena entre as camadas superficiais e de fundo, significando uma mistura no corpo d'água. Nos meses mais quentes, entre novembro e março, observa-se a elevação da temperatura nas camadas superficiais e, conseqüentemente, a estratificação térmica estável. Para esses meses, ocorre variação da massa específica entre as camadas. Observa-se também que janeiro de 2009 apresenta leve estratificação, contradizendo com o perfil térmico esperado. Segundo Cunha *et al.*, (2011) esse comportamento é resultado de temperaturas do ar mais amenas observadas durante este mês. Os meses de outubro de 2008 e abril de 2009 também apresentam estratificação moderada, devido à transição entre as estações verão-inverno, com aumento gradual da temperatura durante a primavera (outubro) e diminuição da temperatura

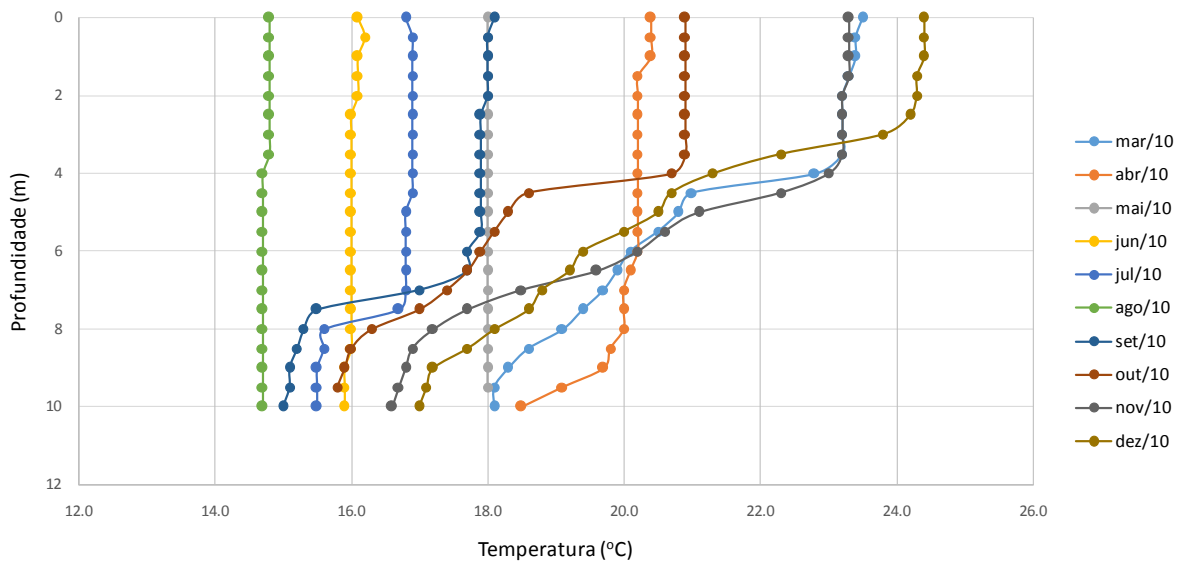
durante o outono (abril).

FIGURA 5 – PERFIL DA MASSA ESPECÍFICA DO RESERVATÓRIO DO RIO VERDE



FONTE: CUNHA & FERREIRA (2013).

FIGURA 6 – PERFIL TÉRMICO DO RESERVATÓRIO DO RIO VERDE



FONTE: CUNHA & FERREIRA (2013).

Os corpos d'água podem realizar trocas de calor por condução para o ar. Ainda assim, essas trocas são muito pequenas quando comparadas com a absorção da radiação direta na água. Outra forma de troca de calor em reservatórios é a entrada e saída de volumes de água significativos no corpo d'água que, dependendo

do tempo de retenção do reservatório, podem promover misturas significativas de massas d'água no reservatório.

A evaporação da água é o maior responsável pela perda de calor no corpo d'água. A intensidade de evaporação varia de acordo com a temperatura do ar, pressão atmosférica sobre o reservatório e movimentação de massas de ar na superfície.

A transferência de calor na coluna d'água pode ocorrer na escala molecular, todavia esse não é o processo dominante de transferência, pois é um fenômeno lento. A redistribuição de calor na coluna de água ocorre principalmente devido ao trabalho do vento na superfície garantindo a mistura e movimentação de massas de água. O processo de resfriamento da camada superficial da água pode promover também a movimentação vertical das massas. As variações diárias de radiação sobre o reservatório, assim como as entradas de afluentes no corpo d'água e variação sazonal na temperatura, influenciam na temperatura superficial do reservatório. A variação da massa específica da água pode ser uma barreira física para a redistribuição de calor massa d'água; assim, em reservatórios com temperatura uniforme na coluna d'água ocorre circulação eficiente das massas, pois não há gradiente de massa específica, enquanto que na ocorrência de estratificação térmica observa-se estagnação das massas.

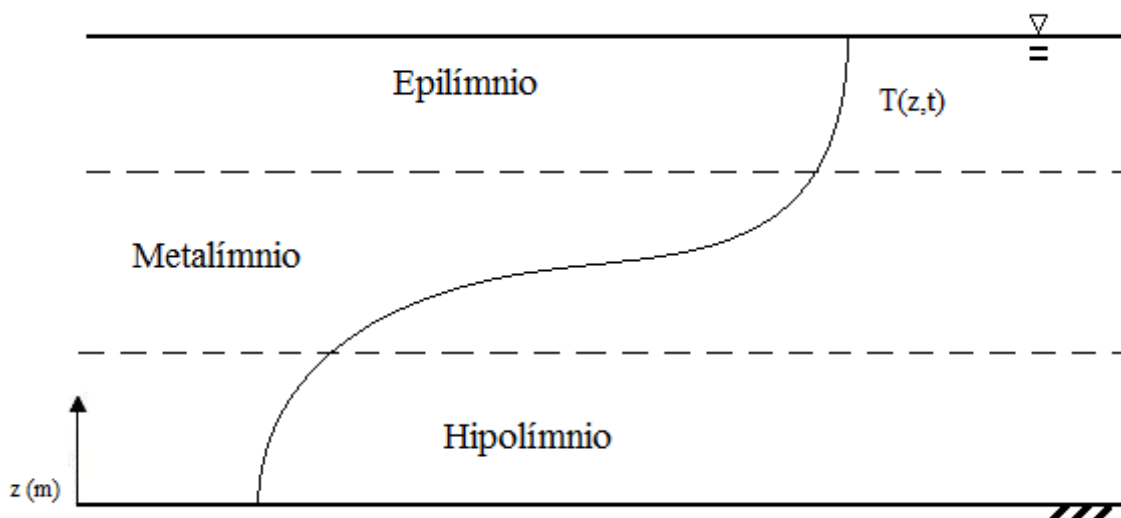
2.3 ESTRATIFICAÇÃO TÉRMICA

Ao analisar o perfil térmico vertical de um reservatório estratificado, observa-se a formação de três zonas de temperatura distintas denominadas *epilímnio*, *metalímnio* e *hipolímnio*, demonstradas na Figura 7. O *epilímnio*, camada superior, é caracterizado por temperaturas uniformes e apresenta mistura devido às ações externas, como ação do vento, radiação solar e empuxo. No *metalímnio* observa-se o maior gradiente de temperatura, a presença da termoclina e onde as forças externas se equilibram. Essas forças determinam a profundidade da termoclina. No *hipolímnio*, camada mais profunda, a ação do vento e a radiação solar são fracas ou inexistentes e o gradiente de temperatura é uniforme. Em lagos em regiões de clima tropical, a termoclina se forma durante a primavera devido ao aquecimento da água superficial do reservatório, e tende a aprofundar-se durante o verão. No início do

outono ocorre resfriamento superficial da água até que se atinja a condição de isoterma do reservatório (WROBEL *et al.*, 1989).

O perfil térmico está intimamente ligado às características químicas e biológicas do sistema, portanto, cada camada apresenta processos químicos e biológicos diferenciados. Nas camadas superficiais, onde ocorre maior penetração da radiação solar, ocorre também maior fotossíntese, consumindo gás carbônico e produzindo quantidades significativas de oxigênio. Já nas camadas mais profundas, ocorre acúmulo de sedimentos e, conseqüentemente, maior atividade microbiana para degradação da matéria orgânica sedimentada. Portanto, observa-se diminuição do oxigênio, pois é consumido para degradar a matéria orgânica (ESTEVES, 1988). Assim, Thienemann¹ (1925 *apud* ESTEVES, 1988) relaciona o perfil de concentração do oxigênio na coluna d'água em função da razão entre o volume do *epilímnio* e o volume do *hipolímnio*.

FIGURA 7 – CAMADAS GERADAS A PARTIR DA ESTRATIFICAÇÃO TÉRMICA



FONTE: POLLI (2014).

Processos de estratificação e desestratificação são diferentes para lagos e reservatórios localizados em regiões de clima temperado e regiões de clima tropical. Wetzel (1975) e Esteves (1988) fizeram uma análise do perfil térmico de lagos localizados em regiões temperadas e tropicais, classificando-os quanto ao período

¹ THIENEMANN, A. Die Binnengewasser Mitteleuropas. Die Binnenge Wasser, 1:1-225

de estratificação e número de episódios de estratificação que ocorrem durante o ano.

Em lagos de climas temperados o processo de estratificação geralmente é observado durante o verão. No início da primavera as temperaturas ainda são baixas, ocorrendo isotermia da coluna d' água e circulação das massas de água. Aproximando-se do verão, ocorre o aquecimento das camadas superficiais e, conseqüentemente, a camada superior torna-se menos densa. Esse processo dificulta a redistribuição de massas de água e é acentuado com o decorrer da estação.

A radiação solar que atua na superfície do reservatório durante o outono é significativamente menor que no verão, facilitando assim a perda de energia calorífica do reservatório para a atmosfera, pelo processo de evaporação, facilitando o processo de desestratificação térmica e dando início a circulação de outono (ESTEVEES, 1988).

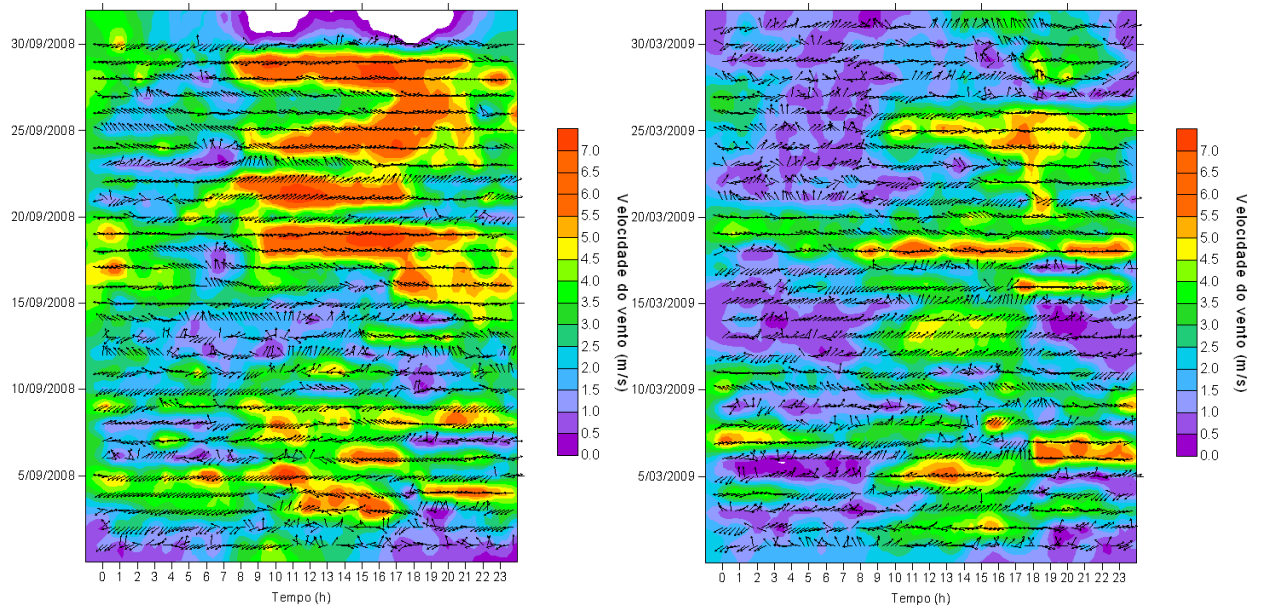
A variação da temperatura do ar, durante o ano, em regiões próximas ao equador é menor do que em latitudes maiores, nessas regiões não é nítida a diferença das estações, geralmente é observado estação de seca (inverno) e estação de chuvas (verão). Assim, o regime térmico desses reservatórios ocorre em uma escala temporal menor, em que se observa estratificação durando o dia, com estabilidade máxima no período das 16–17 horas, e durante a noite ocorrem perdas de energia calorífica para a atmosfera, resultando na quebra da estratificação da coluna d'água. Esse processo é facilitado caso o reservatório seja raso, e a diferença de temperatura entre as camadas superior e inferior são pequenas (ESTEVEES, 1988).

O vento é um importante indutor da movimentação da coluna d' água. Ventos predominantes em uma direção, atuando na superfície do reservatório, geram perturbações e deslocamento da água, com a formação de um desnível na superfície do reservatório entre duas extremidades devido à ação do vento (ESTEVEES, 1988).

A partir do monitoramento da direção e velocidade do vento na superfície da água, é possível identificar períodos de maior ação do vento e assim relacionar com o regime térmico durante esses períodos. A Figura 8 apresenta a direção e a velocidade, em $m.s^{-1}$, do vento medido na barragem no reservatório Rio Verde durante 30 dias no mês de setembro de 2008 e no mês de março de 2009. O padrão

do vento não é definido, porém observa-se que a intensidade do vento é maior na época de estiagem (setembro) do que na época de cheia (março), e a velocidade é reduzida durante a noite (CUNHA, *et al.*, 2011).

FIGURA 8 – PADRÃO DE VENTO ENTRE SETEMBRO DE 2008 E MARÇO DE 2009, MEDIDOS NA ESTAÇÃO METEOROLÓGICA DO RESERVATÓRIO



FONTE: CUNHA, *et al.* (2011).

Com o objetivo de definir se ocorre ou não relação entre as variáveis meteorológicas de uma região e o regime térmico de um lago ou reservatório, alguns autores analisaram a dinâmica dos lagos em diferentes regiões.

Lewis (1983), em um de seus primeiros trabalhos, realizou o estudo da temperatura e mistura da água de lagos tropicais localizados nas Filipinas e, posteriormente, observou o lago Valencia na Venezuela, para comprovar sua hipótese de que lagos tropicais profundos apresentam um episódio de estratificação da coluna d'água ao ano.

Objetivando subsídio à aquicultura e manejo de anfíbios, Angelocci *et al.* (1995) observaram comportamento do regime térmico de um lago artificial raso localizado no município de Piracicaba/SP, para o período de um ano. Angelocci *et al.* (1995) observam apenas um período de estratificação do lago, compreendido entre outono e verão, caracterizado por gradiente de temperatura pequeno entre as camadas superficiais e de fundo.

Em estudo realizado para um reservatório subtropical na região sul do estado

de São Paulo, Lopes e Bicudo (2001) avaliaram a estrutura térmica do reservatório para dois períodos distintos (chuvoso e de estiagem), e relacionaram as variações diárias da temperatura da água com variáveis físicas do sistema. Neste estudo observa-se que o reservatório apresenta circulações diárias durante a estiagem e estratificação térmica nos períodos de chuva, comprovando a influência da sazonalidade no comportamento térmico do reservatório.

2.4 PARÂMETROS QUANTITATIVOS

Alguns parâmetros adimensionais podem auxiliar na caracterização e identificação de períodos de mistura e estratificação do corpo d'água, a partir da relação entre o perfil térmico e as forças desestabilizadoras, como o vento e correntes provocadas por vazões de entrada e de saída (POLLI, 2014). Alguns deles são apresentados a seguir.

O número do Lago (L_N), que avalia a ação do vento na movimentação das massas de água estratificadas de um reservatório, é expresso como:

$$L_N = \frac{S_T(z_e+z_h)}{2\rho_h u_*^2 A_s^{1/2} z_v} \quad (4)$$

onde A_s é a superfície do lago e $A_s^{1/2}$ representa a estimativa da pista de vento, z_h é a espessura do *hipolímnio*, z_e é a espessura do *epilímnio*, u_* é a velocidade de atrito gerada pela perturbação do vento, ρ_h é a massa específica do *hipolímnio* (READ *et al.*, 2011), S_T é a estabilidade de Schimdt ($J.m^{-2}$) dada por:

$$S_T = \frac{g}{A_z} \int_0^{z_D} (z - z_v) \rho_z A_z \partial z \quad (5)$$

na qual g é a aceleração da gravidade, A_z é a área do reservatório na profundidade z , z_D é a profundidade máxima do reservatório e a profundidade do centro de massa do reservatório é dado por $z_v = \int_0^{z_D} z A_z \partial z / \int_0^{z_D} A_z \partial z$ (READ, *et al.*, 2011).

Quando $L_N < 1$ a ação de forças turbulentas aplicadas pelo vento são suficientes para provocar a mistura do *hipolímnio*, caso $L_N > 1$ se espera pouca mistura do *hipolímnio*, pois há forte estratificação do reservatório mitigando a ação

do vento no corpo d'água (MANNICH, 2013).

O número de Wendderburn (W) descreve a suscetibilidade de ressurgência das camadas profundas devido à ação do vento na superfície do reservatório, e é definida como:

$$W = \frac{g' z_e^2}{u_*^2 L_s} \quad (6)$$

onde g' é a gravidade reduzida devido a variação na densidade entre o *hipolímnio* e o *epilímnio*, expressa por $g' = g \cdot \Delta\rho/\rho_h$ e L_s é a pista que o vento percorre sobre a superfície (READ *et al.*, 2011).

Para valores de $W \ll 1$, o processo de turbulência gerado pelo vento é significativo provocando ressurgência na região de mistura superficial. Quando $W \gg 1$, a inclinação das isotermas devido à ação do vento é pequena e há forte estratificação (POLLI, 2014; READ *et al.*, 2011).

A frequência de Brunt-Väisälä (N) é medida somente com base na diferença de densidade da água, e determina a frequência de oscilação periódica sem a componente de energia cinética causada pelo vento (BRANCO *et al.*, 1991). O quadrado da frequência (s^{-2}) é dada pela equação:

$$N^2 = \frac{g}{\rho} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial z} \quad (8)$$

onde g é a aceleração da gravidade, z é a dimensão vertical do reservatório e ρ é a massa específica da água (READ, *et al.*, 2011).

O cálculo destes parâmetros é utilizado para caracterizar o reservatório quanto à estratificação térmica, e quando comparados com os dados do perfil de temperatura previamente coletados, é possível avaliar a influência dos forçantes considerados em cada parâmetro.

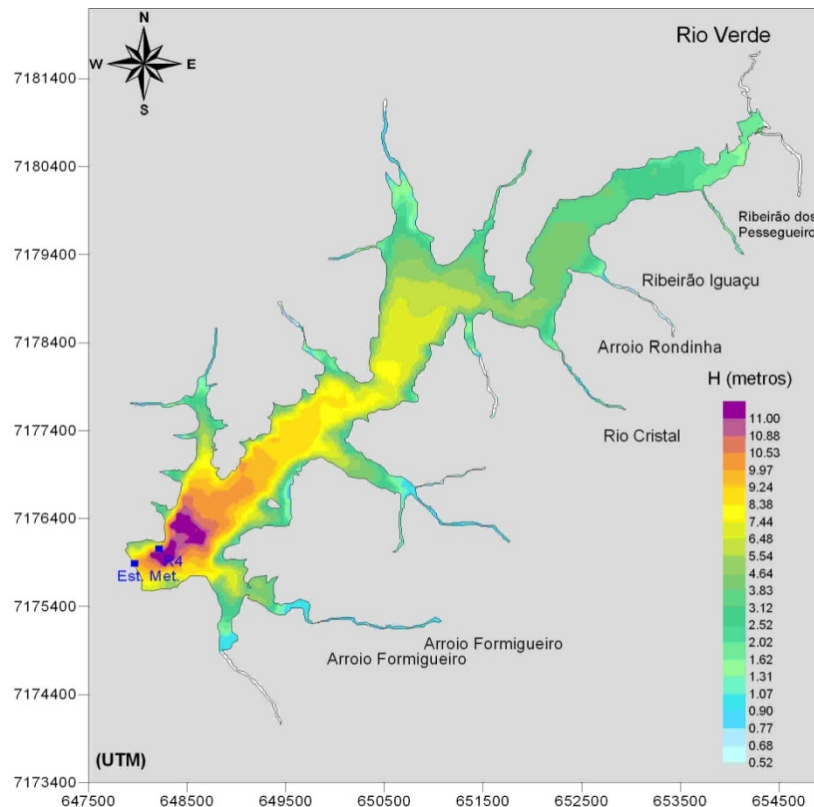
3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 ÁREA DE ESTUDO

O reservatório do Rio Verde está localizado na região metropolitana de Curitiba e sua barragem foi construída entre 1974 e 1976 pela Petróleo Brasileira S.A. A bacia de contribuição do reservatório do Rio Verde está localizada sob clima subtropical úmido com temperatura média anual entre 16,5 °C a 22,6 °C e precipitação média anual de 1450 mm (ANDREOLI, *et al.*, 2011). A

mostra a batimetria do reservatório e a Tabela 1 a relação cota x área. Durante a campanha de batimetria a equipe encontrou problemas para obter informações de determinadas áreas, devido à presença de vegetação submersa (CUNHA, 2011). Portanto, além dos dados obtidos na campanha de medição, foram também utilizadas cartas topográficas da época anterior à construção da barragem.

FIGURA 9 – VISUALIZAÇÃO TOPOGRÁFICA DE FUNDO E LOCALIZAÇÃO DA ESTAÇÃO METEOROLÓGICA NO RESERVATÓRIO DO RIO VERDE



FONTE: CUNHA & FERREIRA (2013).

TABELA 1 – RELAÇÃO COTA × ÁREA DO RESERVATÓRIO RIO VERDE

Profundidade z (m)	Cota (m)	Área (m ²)
15	870	0
14	871	526
13	872	3959
12	873	13256
11	874	177227
10	875	593799
9	876	1003399
8	877	1457180
7	878	1937132
6	879	2532907
5	880	3075908
4	881	3647825
3	882	4157587
2	883	4704043
1	884	5204554
0	885	6127291

FONTE: ADAPTADO CHUNHA, *et. al.* (2011).

A principal finalidade do reservatório é o abastecimento da refinaria Presidente Getúlio Vargas (REPAR). A água é captada próxima à barragem, local em que estão instalados os equipamentos meteorológicos. Não há captação da água do reservatório para abastecimento público, somente captação de água no Rio Verde, principal tributário do reservatório, e é realizado pela Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR). Não ocorre atividade pesqueira intensiva, apenas pesca para fim de entretenimento.

A área do reservatório é de 7,9 km² com volume médio de 25,64 hm³, possuindo um vertedouro de soleira livre; o tempo médio de retenção é de 218 dias. A profundidade média é de 5,6 m e máxima é de 11 m, caracterizando um reservatório raso. As vazões médias de entrada são de aproximadamente 2,80 m³/s (ANDREOLI, *et al.*, 2011).

O reservatório do Rio Verde tem comprimento de aproximadamente 7500 m e largura de 1300 m e é orientado na direção Nordeste (NE)-Sudoeste (SW) (CUNHA, *et. al.*, 2011), sendo esta a orientação do vento de maior pista no reservatório. A orientação do vento com maior predominância encontrado no reservatório é Leste (E)-Oeste (W) (CUNHA & FERREIRA, 2013).

O reservatório é caracterizado por uma estratificação considerável no verão e no inverno observa-se a mistura de massas na coluna d'água. Em reservatórios rasos é esperada uma estratificação térmica suave (CUNHA, *et. al.*, 2011). Cunha e Ferreira (2013) observaram também que a estratificação térmica diária do reservatório ocorre somente no inverno e primavera, no verão não é possível observar a mistura de massas durante a noite.

3.2 COLETA E ANÁLISE DE DADOS

As variáveis meteorológicas foram coletadas na estação meteorológica instalada na plataforma de captação d' água do reservatório (

), próximo à barragem, e a aproximadamente 10 m acima da superfície do reservatório. Essa estação mede radiação solar incidente e direção e velocidade do vento. Para a análise do perfil térmico, foram instalados sensores de temperatura em quatro profundidades diferentes: 2,0 m (T_1), 3,5 m (T_2), 5,5 m (T_3) e 7,0 m (T_4), abaixo da superfície livre do reservatório.

A

Tabela 2 apresenta as especificações dos equipamentos utilizados na obtenção dos dados juntamente com as especificações de leitura e precisão. As leituras dos sensores de vento da estação meteorológica são obtidas a cada 5 segundos e, a partir destes valores, são calculadas as médias da velocidade e da direção do vento para o período de cada 15 minutos (96 amostras), sendo também armazenados os valores máximos e mínimos de velocidade do vento. As outras variáveis meteorológicas e a temperatura da água são obtidas a cada 15 minutos.

TABELA 2 – ESPECIFICAÇÕES DOS EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NA ESTAÇÃO METEOROLÓGICA

Tipo de dados	Equipamento	Faixa de leitura	Precisão
Velocidade (m/s)	Anemômetro de Hélice	0 a 60 m/s	0,3 m/s
Direção (graus)		0 a 360 graus	3 graus
Radiação solar (W/m^2)	Piranômetro	0 a 1500 W/m^2	variável com o ângulo de incidência e temperatura
Temperatura da água ($^{\circ}C$)	Sensores Probes	-5 a 95 $^{\circ}C$	0 a 70 $^{\circ}C$: $< \pm 0,2$ $^{\circ}C$ 70 a 95 $^{\circ}C$: $< \pm 0,3$ $^{\circ}C$

Os dados supracitados foram medidos entre agosto de 2008 e junho de 2016. Durante este período é possível observar falhas em algumas variáveis meteorológicas, que podem ser provenientes de falhas mecânicas dos aparelhos ou perda de dados devido ao atraso na coleta dos dados. Portanto, foram escolhidos alguns períodos, com base na quantidade de erros e falhas encontradas nas variáveis meteorológicas e temperatura da água. Foram obtidos quatro intervalos com ciclo anual completo, apresentando poucas falhas:

- Período 1: corresponde ao ciclo entre janeiro e dezembro de 2010;
- Período 2: corresponde ao ciclo entre janeiro e dezembro de 2011;
- Período 3: corresponde ao ciclo entre fevereiro de 2013 e fevereiro de 2014;
- Período 4: corresponde ao ciclo entre março de 2015 e março de 2016.

Devido à grande quantidade de dados diários obtidos (96 amostras), foram calculadas médias diárias das variáveis meteorológicas e da temperatura da água, para facilitar os cálculos dos parâmetros para a análise anual.

A Figura 10 e Figura 11 apresentam as médias diárias dos dados obtidos para a velocidade do vento e radiação solar para o primeiro período, respectivamente. Observa-se que em outubro houve falha, a estação meteorológica não armazenou dados por aproximadamente 10 dias consecutivos. Outras falhas foram observadas durante esse ciclo, porém em escalas menores de apenas algumas horas ou minutos.

FIGURA 10 – MÉDIAS DIÁRIAS DA VELOCIDADE DO VENTO (m/s) NO PERÍODO 1

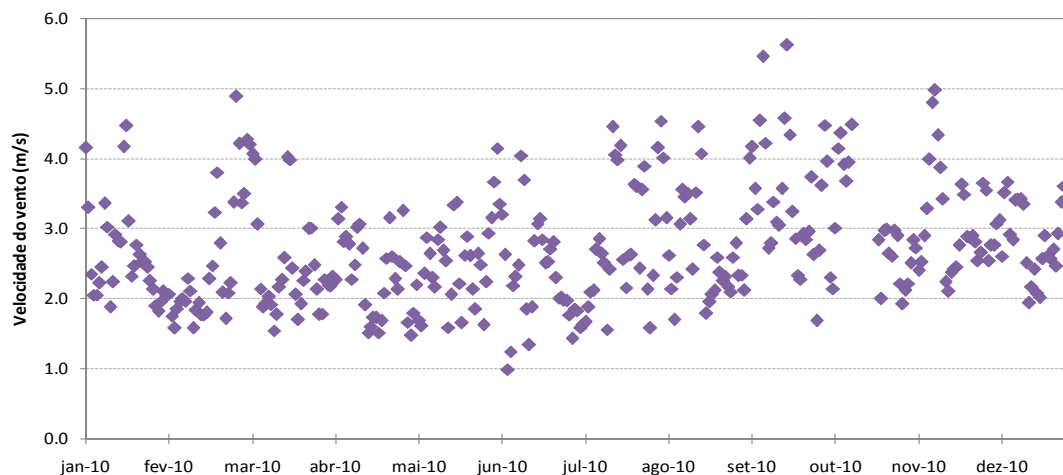
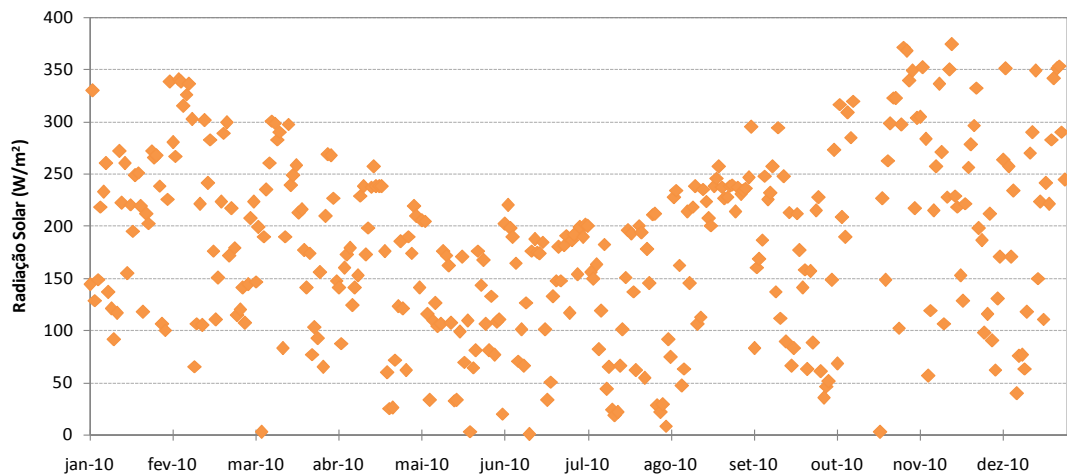
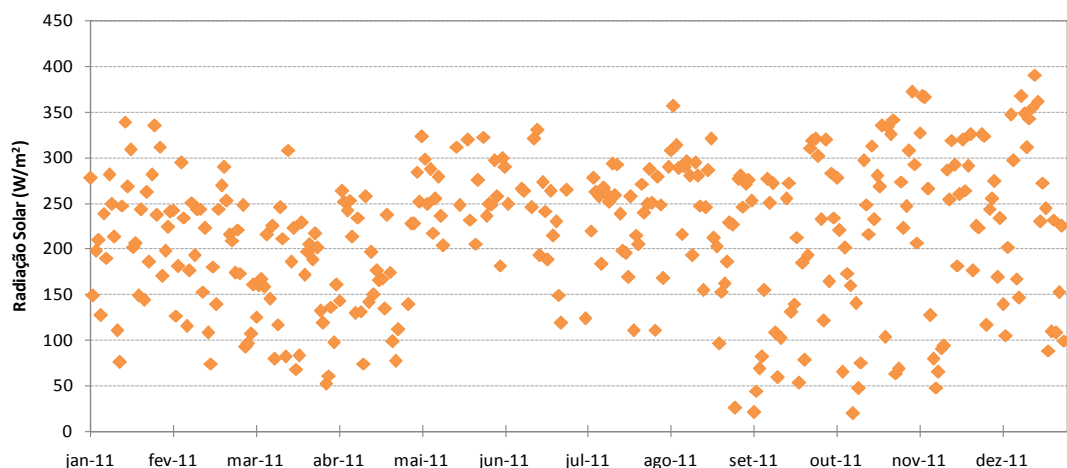


FIGURA 11 – MÉDIAS DIÁRIAS DA RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE (W/m^2) NO PERÍODO 1

No segundo período, ano de 2011, ocorreram problemas com o anemômetro a partir de março, e foram registrados valores nulos para a velocidade e direção do vento. Este problema se estendeu durante o ano de 2012 e começo de 2013, portanto não foram calculados o número do Lago e de Wedderburn para este ciclo e, conseqüentemente, não será analisado a correlação com o vento. A Figura 12 apresenta os dados de radiação solar sem falhas durante o período de 2011, permitindo o cálculo dos parâmetros de estabilidade de Schimdt e frequência de Brunt-Väisälä e análise da correlação desses parâmetros com os valores de radiação solar incidente.

Durante o ano de 2012 não se obteve dados das variáveis meteorológicas e temperatura da água até início de agosto, portanto o ciclo de 2012 não foi analisado, pois não há dados suficientes.

FIGURA 12 – MÉDIAS DIÁRIAS DA RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE (W/m^2) NO PERÍODO 2

Devido às falhas apresentadas pelo anemômetro, que se estenderam até o início de 2013, serão calculados e analisados os parâmetros para os meses entre fevereiro de 2013 e fevereiro de 2014, e denominado como Período 3. A Figura 13 e Figura 14 apresentam as médias diárias da velocidade do vento e radiação solar incidente, respectivamente, no período 3. Durante esse período não foram observadas outras falhas

FIGURA 13 – MÉDIAS DIÁRIAS DA VELOCIDADE DO VENTO (m/s) NO PERÍODO 3

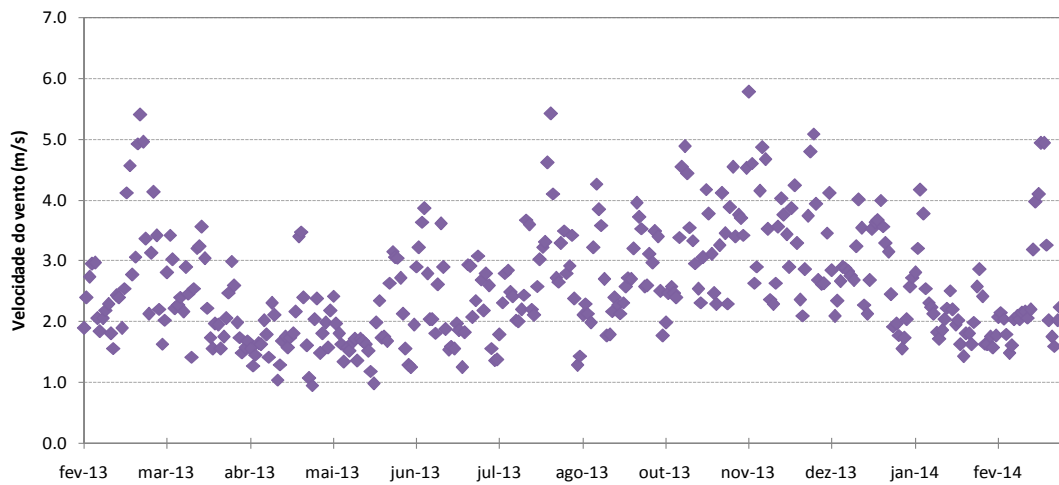
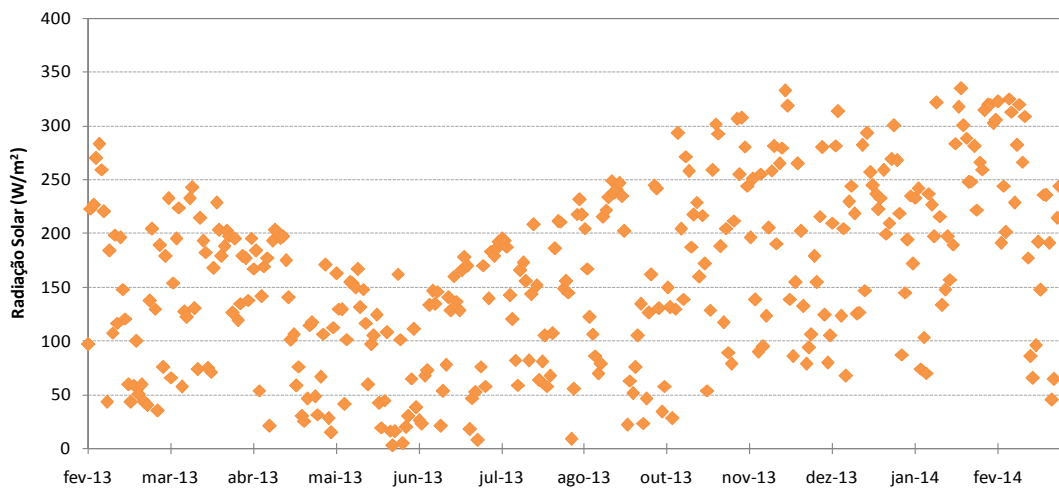
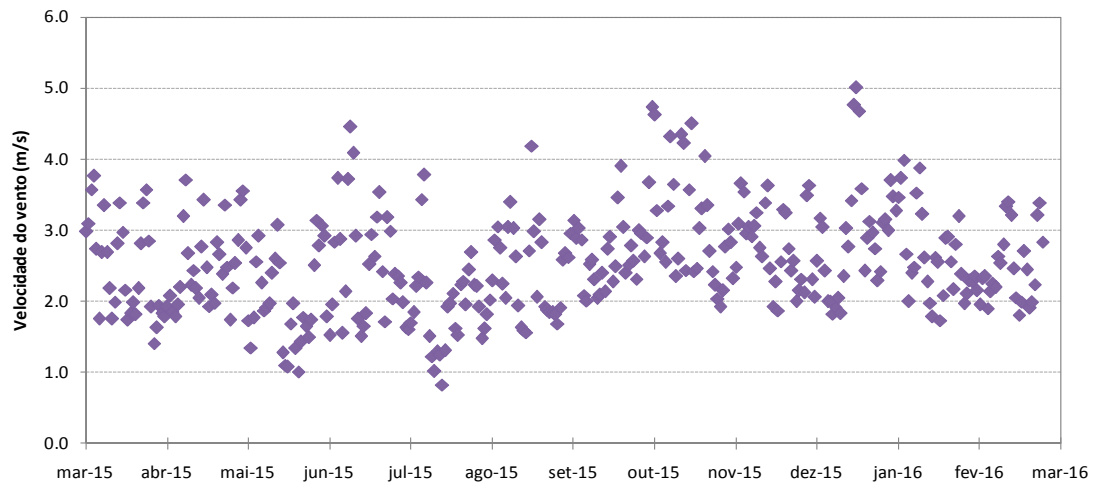
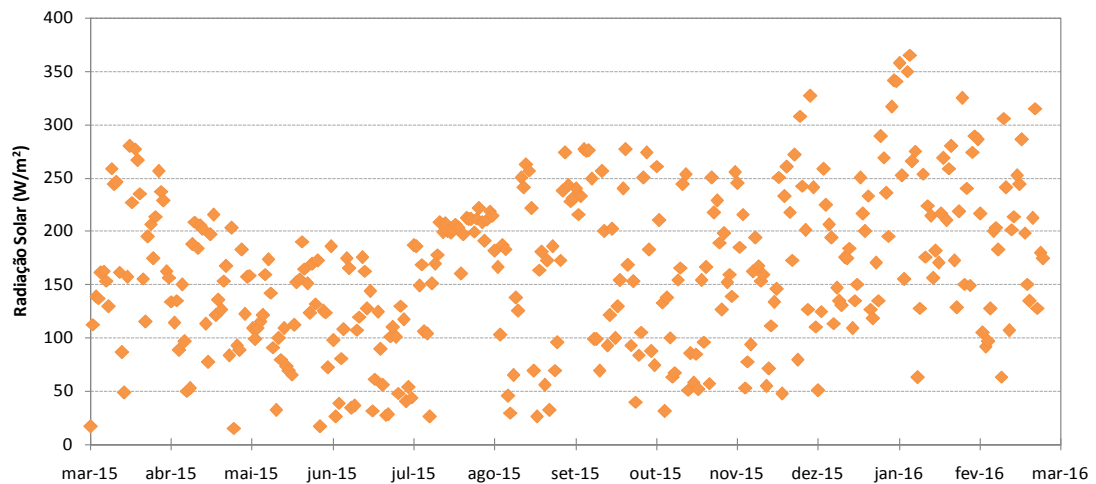


FIGURA 14 – MÉDIAS DIÁRIAS DA RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE (W/m^2) NO PERÍODO 3



A partir de maio de 2014 até março de 2015 não foram registrados dados de temperatura da água e das variáveis meteorológicas, portanto o ciclo de 2014 não é analisado. Para suprir a falha do início do ano de 2015 serão utilizados dados até março de 2016, completando um ciclo hidrológico, e identificado como Período 4 (Figura 15 e Figura 16).

FIGURA 15 – MÉDIAS DIÁRIAS DA VELOCIDADE DO VENTO (m/s) NO PERÍODO 4

FIGURA 16 – MÉDIAS DIÁRIAS DA RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE (W/m^2) NO PERÍODO 4

Foram escolhidos dois dias para a análise das variações diárias no reservatório. O primeiro, 23 de setembro 2015, foi determinado com base na diferença de temperatura d'água entre a superfície e o fundo; o segundo, 9 de dezembro de 2015, foi escolhido com base na ocorrência da direção do vento com maior pista no reservatório.

É esperado um comportamento simétrico das variações diárias da radiação solar incidente na superfície terrestre, apresentando-se crescente a partir das 6:00h, atingindo valores máximos próximo das 12:00h e decrescente até 18:00h. Variações na intensidade de radiação solar podem ser causadas pela presença de nuvens e estações do ano. Não é observado comportamento similar para a variação diária da velocidade do vento, apresentando direções e velocidades sem comportamento padronizado.

As Figura 17 e Figura 18 apresentam a velocidade do vento e a radiação solar, respectivamente, no dia 23 de setembro de 2015. Neste dia foi observado uma diferença de aproximadamente 8 °C entre a temperatura da água de superfície e fundo; este foi o dia que apresentou maior gradiente de temperatura no ciclo de março/2015 a março/2016. A direção do vento Leste (E) foi predominante neste dia, representando, aproximadamente, 33% do período.

FIGURA 17 – VELOCIDADE DO VENTO (m/s) NO DIA 23 DE SETEMBRO DE 2015

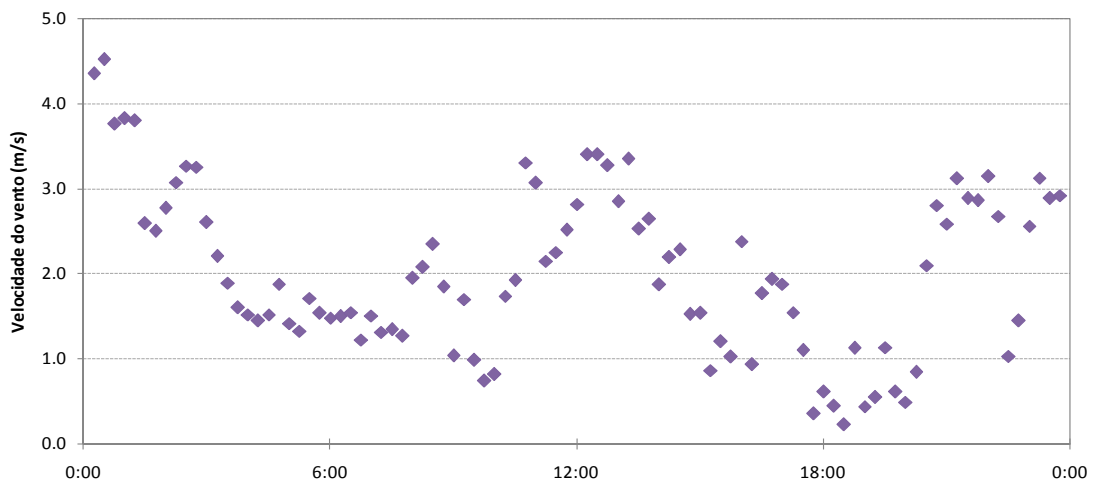
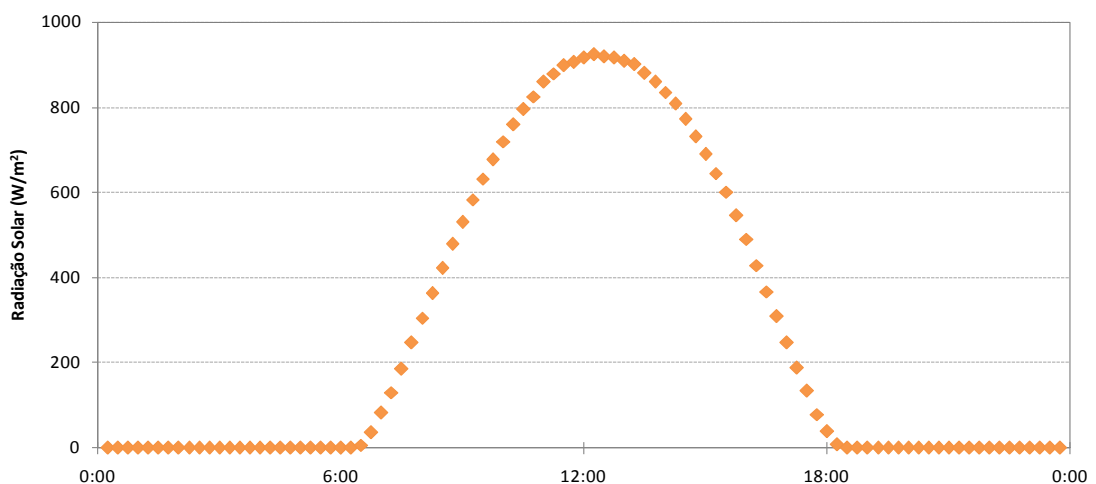


FIGURA 18 – RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE (W/m^2) NO DIA 23 DE SETEMBRO DE 2015



No dia 9 de dezembro de 2015 observou-se que a radiação solar apresentou oscilações durante o dia (Figura 20), diferentemente do dia 23 de setembro de 2015. Ainda assim, a intensidade da radiação solar apresentou-se elevada. A velocidade do vento (Figura 19) apresentou variações entre o dia e a noite, com intensidade maior durante o dia e menor durante a noite, porém, esse comportamento não é

característico do reservatório. Neste dia não se observou predominância na direção do vento, porém foi o dia que apresentou maior ocorrência da direção Nordeste (NE) (15%) durante todo o quarto período.

FIGURA 19 – VELOCIDADE DO VENTO (m/s) NO DIA 9 DE DEZEMBRO DE 2015

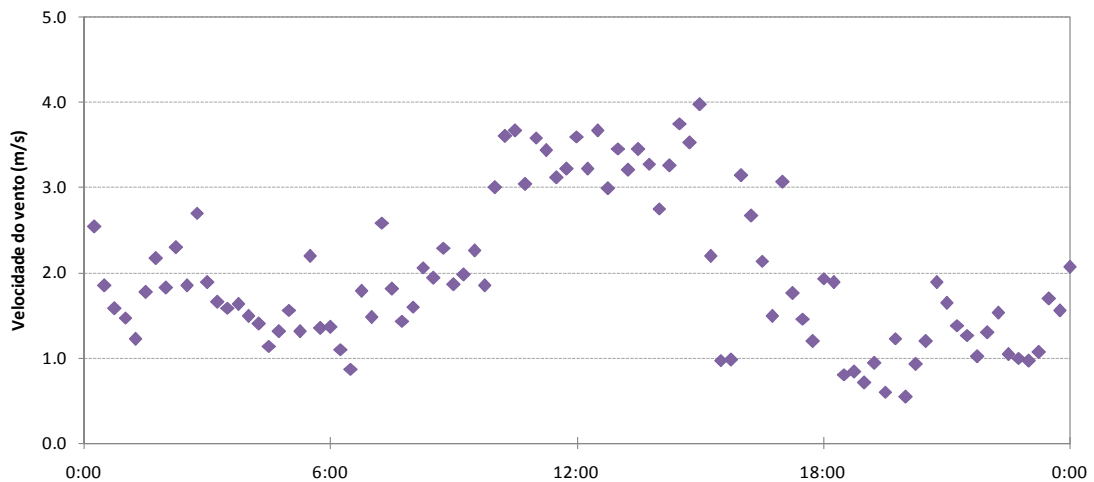
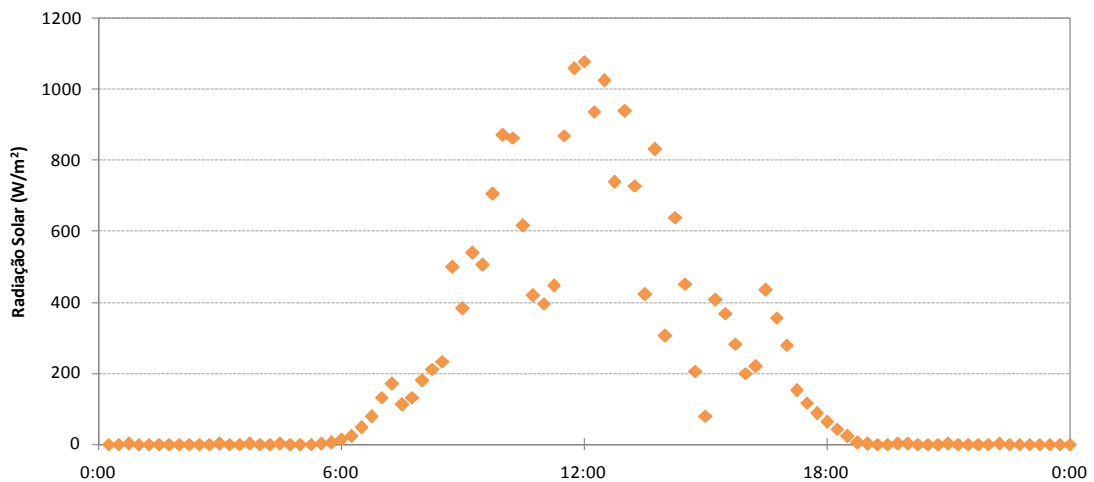


FIGURA 20 – RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE (W/m^2) NO DIA 9 DE DEZEMBRO DE 2015



3.3 CORRELAÇÃO ENTRE VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS E O PROCESSO DE ESTRATIFICAÇÃO

Primeiramente foram calculados os parâmetros: número do Lago (L_N), número de Wendderburn (W), estabilidade de Schmidt (S_T) e a frequência de Brunt-Väisälä (N), a partir das médias diárias das variáveis meteorológicas e da temperatura da água para cada profundidade. O cálculo foi realizado utilizando o

programa *LakeAnalyzer*, desenvolvido por Read *et. al.* (2011) e executado em *Matlab*.

LakeAnalyzer é um código desenvolvido para facilitar a compreensão do regime térmico de um lago, utilizando ferramentas de visualização para determinação de índices de mistura e estratificação do corpo d'água. A partir de variáveis fornecidas ao programa são calculados os valores do número do Lago, o número de Wendderburn, a estabilidade de Schimdt, a frequência de Brunt-Väisälä, entre outros (READ, *et. al.*, 2011). A Tabela 3 apresenta as variáveis que devem ser fornecidas para o cálculo dos índices desejados.

TABELA 3 – LISTA DE INFORMAÇÕES NECESSÁRIAS PARA O CÁLCULO DO CORRESPONDENTE ÍNDICE

Índices calculados	Batimetria	Temperatura da água (°C)	Velocidade do vento (m.s ⁻¹)	Nível da água (m)	Salinidade (PSS)
Profundidade da Termoclina	Não Obrigatório	Obrigatório	Não Obrigatório	Opcional	Opcional
Profundidade do Metalimnio	Não Obrigatório	Obrigatório	Não Obrigatório	Opcional	Opcional
Estabilidade de Schmidt	Obrigatório	Obrigatório	Não Obrigatório	Opcional	Opcional
Velocidade de atrito do vento	Obrigatório	Obrigatório	Obrigatório	Opcional	Opcional
Número do Lago	Obrigatório	Obrigatório	Obrigatório	Opcional	Opcional
Número de Wendderburn	Obrigatório	Obrigatório	Obrigatório	Opcional	Opcional
Frequência de Brunt-Vaisala	Não Obrigatório	Obrigatório	Não Obrigatório	Opcional	Opcional

FONTE: ADAPTADO READ, *et. al.* (2011).

Os resultados da estabilidade de Schmidt (S_T) são correlacionados com as médias diárias da velocidade do vento e radiação solar para observar qual variável que influencia na estratificação do reservatório.

Para avaliar a ação do vento na mistura das massas de água, é analisada primeiramente a influência do vento considerando todas as direções do vento em escala anual, depois foi realizada uma segunda análise selecionando um dia que apresentava maior ocorrência da direção do vento com maior pista, que segue a orientação Nordeste (NE) do reservatório (Figura 9), e um dia que não apresentava ventos nesta orientação. Assim, analisando a velocidade do vento para o mesmo

período de estratificação e mistura e calculando os parâmetros quantitativos, observaremos como o vento na direção de maior pista atua na variação do regime térmico do reservatório.

Para observar a escala diária da estratificação do reservatório Rio Verde foram calculados os parâmetros para o dia que apresenta maior gradiente de temperatura da água entre a superfície e o fundo. Este dia não apresentou direção do vento na orientação de maior pista, sendo analisado também quanto a influência do vento na mistura do reservatório.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos são mostrados para cada período anual definido anteriormente, e em seguida são apresentados os resultados obtidos para as variações diárias. Inicialmente foi realizada uma análise de cada parâmetro individualmente e posteriormente foi discutida a influência de cada variável meteorológica como forçante da mistura vertical das massas d'água no reservatório.

4.1 ANÁLISE ANUAL

Durante primeiro período, ano de 2010, houve mistura da coluna d'água entre os meses de maio a julho, e a partir de outubro até meados de março o reservatório apresentou-se estratificado, como mostra a Figura 21. Os meses de abril e setembro são caracterizados por períodos de transição, com condições ambientais mais amenas. É possível observar a presença de termoclina entre os meses de janeiro e março e novamente entre novembro e dezembro, com profundidade variando entre 4 e 6 m.

A resistência inercial à mistura das massas d'água sem fluxo de energia no processo é quantificada pela estabilidade de Schmidt (Figura 22). No mês de fevereiro/2010 observou-se valores elevados para a Estabilidade de Schmidt, com valor máximo de $95,25 \text{ J.m}^{-2}$, indicando forte estratificação, enquanto que os meses de maio e junho apresentaram os menores valores, com médias mensais menores que $5,00 \text{ J.m}^{-2}$. A frequência de Brunt-Väisälä (Figura 23) apresenta o mesmo comportamento, pois considera apenas a variação da massa específica entre a superfície e o fundo. Valores elevados encontrados nos meses de verão (novembro a março) representam maior gradiente da massa específica, comprovando a presença de barreira física para a mistura das massas d'água.

Bezerra-Neto e Pinto-Coelho (2002) encontraram valores similares para a estabilidade de Schmidt da Lagoa do Nado, localizada em Minas Gerais, com profundidade máxima de 6 m. Entre setembro de 1999 e setembro de 2000, foram coletados dados de temperatura do ar, pluviosidade, velocidade do vento e temperatura da água a cada 0,5 m. Foram obtidos valores elevados da estabilidade de Schmidt no verão, com máxima em janeiro ($131,65 \text{ J.m}^{-2}$), e valores baixos em junho e julho ($5,20 \text{ J.m}^{-2}$ e $8,44 \text{ J.m}^{-2}$).

O pico encontrado no mês de setembro para a frequência e para estabilidade pode ser justificado pelos valores de radiação média elevados durante alguns dias, como mostrado na Figura 11, provavelmente provocado pela ausência nuvens.

A Figura 24 e Figura 25 apresentam os resultados obtidos para o número do lago e o número de Wendderburn, respectivamente, os quais avaliam a influência da ação do vento na mistura da coluna d'água. Para valores de $W \leq 1$, ocorre maior probabilidade da termoclina ascender, fazendo com que as águas do *metalímnio* entrem na região de mistura superficial (MANNICH, 2013). O mesmo ocorre para o número do Lago, valores baixos representam maior potencial de mistura devido a ação do vento, enquanto que valores elevados caracterizam pouca influência do vento no reservatório.

Observando o comportamento do vento (Figura 10), não é possível identificar um padrão sazonal, além de apresentar valores baixos, com média anual de 2010 $2,73 \text{ m.s}^{-1}$, corroborando para a obtenção de valores de $L_N > 1$ e $W > 1$. Os meses entre maio e setembro representam o período com maior ocorrência de ação do vento como forçante principal de mistura na coluna d'água, porém a maior parte do ano os valores de L_N e W apresentaram-se elevados, evidenciando que os processos que ocorrem no reservatório são unidimensionais (IMBERGER & PATTERSON, 1989 *apud* MANNICH, 2013).

A Figura 26 e Figura 27 apresentam a correlação da estabilidade de Schmidt com a radiação solar e a velocidade do vento, respectivamente. A estabilidade de Schmidt apresentou baixa relação com a intensidade do vento ($R = 0,14$), e apresentou uma relação pouco significativa com a radiação solar ($R = 0,44$); quando relacionado às médias mensais da estabilidade com as médias mensais de radiação solar (Figura 28) se obtêm uma forte relação ($R = 0,82$), portanto a radiação solar é o maior forçante da estratificação no reservatório. A diferença das relações entre as médias diárias e as médias mensais se deve ao fato da resposta da temperatura da água à variação da radiação solar ocorrer lentamente, devendo ser avaliada em uma escala temporal maior.

FIGURA 21 – DISTRIBUIÇÃO VERTICAL DA TEMPERATURA DA ÁGUA (°C) NO PERÍODO 1

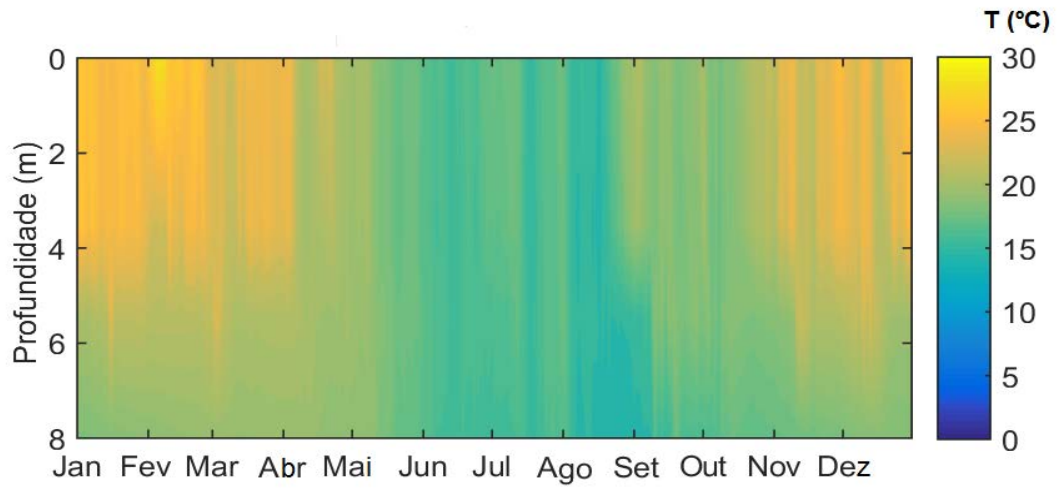
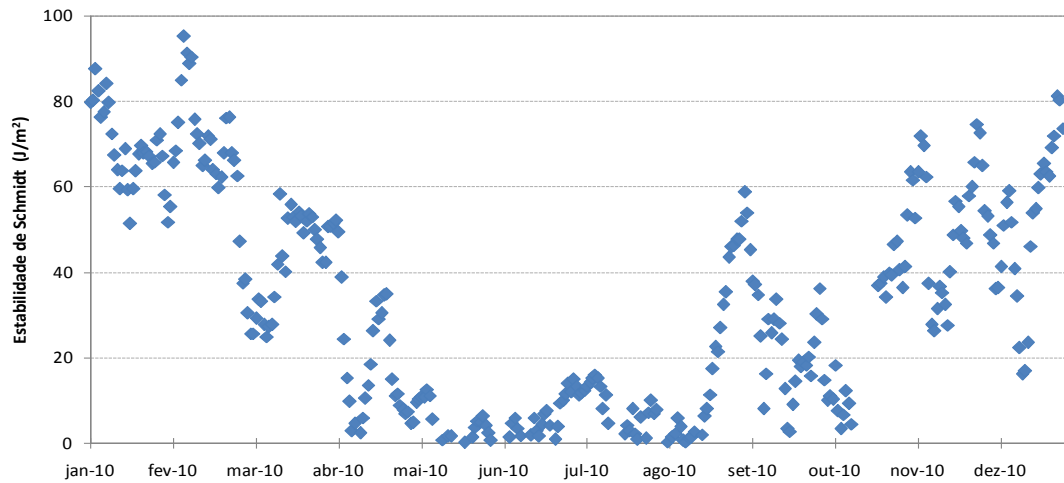
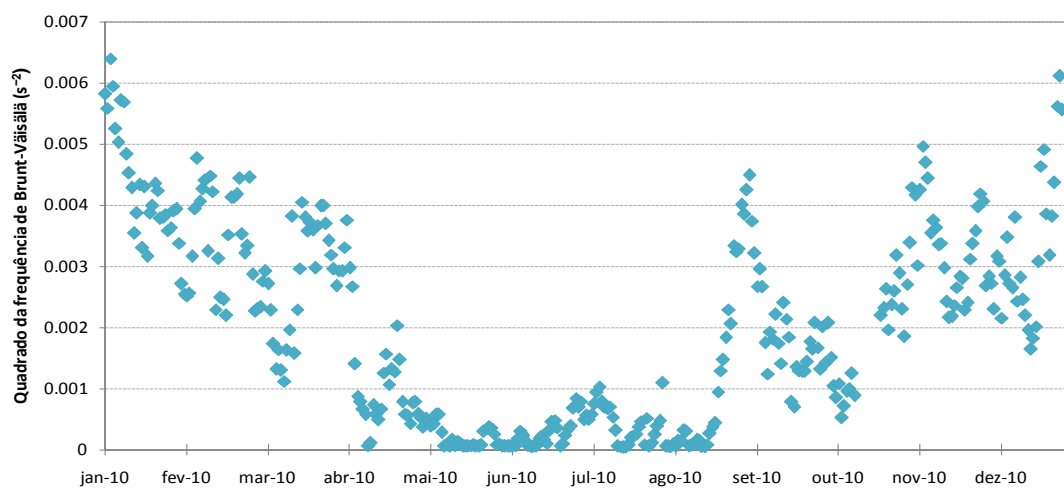
FIGURA 22 – ESTABILIDADE DE SCHMIDT (J/m²) NO PERÍODO 1FIGURA 23 – QUADRADO DA FREQUÊNCIA DE BRUNT-VÄISÄLÄ (s⁻²) NO PERÍODO 1

FIGURA 24 – NÚMERO DO LAGO NO PERÍODO 1

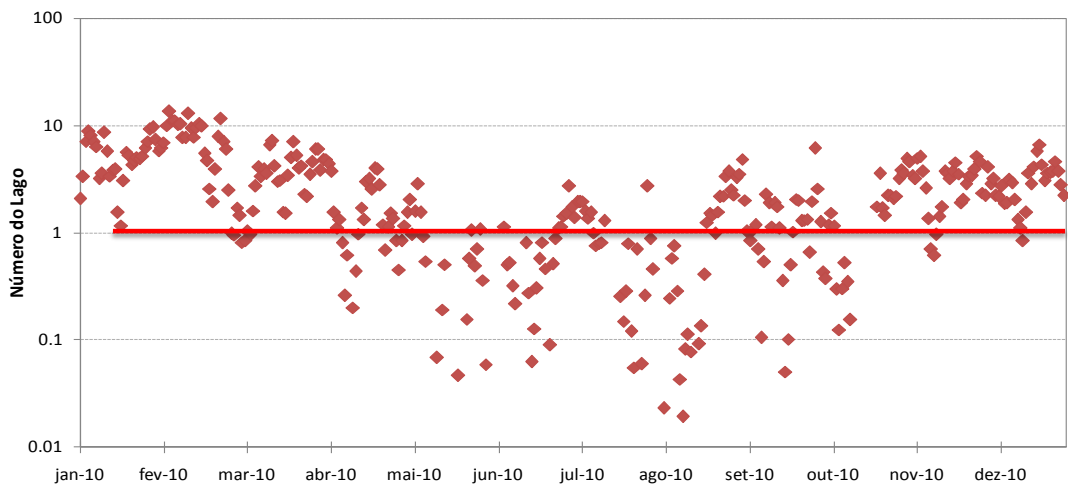


FIGURA 25 – NÚMERO DE WENDDERBURN NO PERÍODO 1

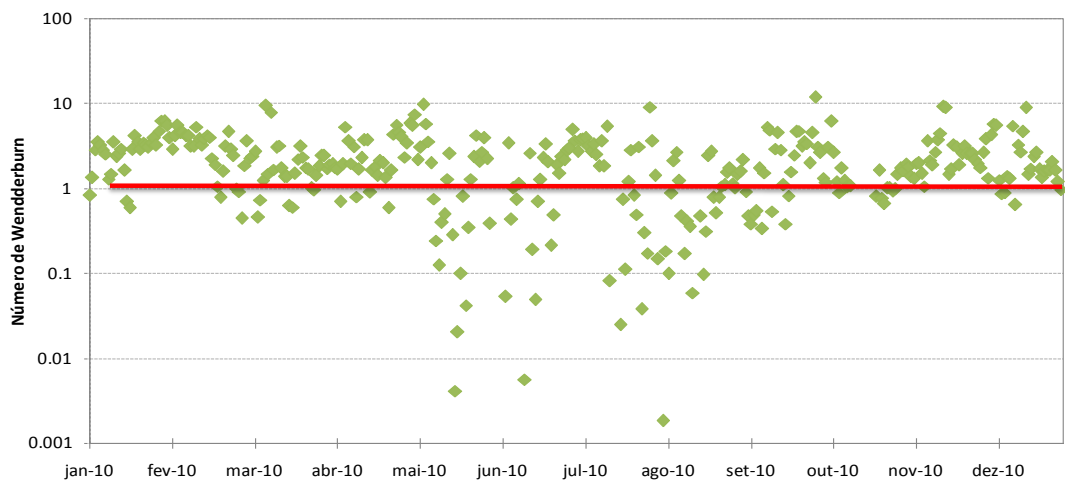
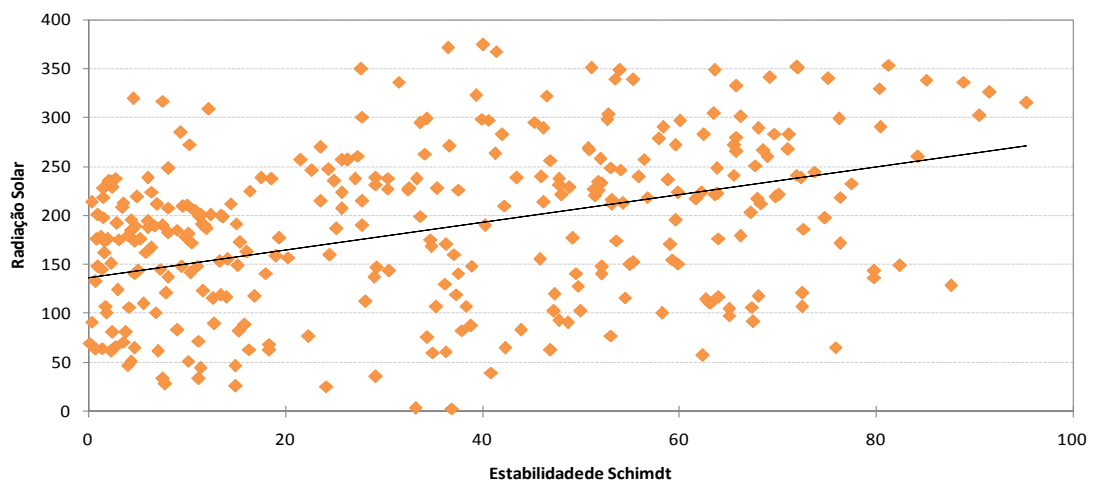
FIGURA 26 – CORRELAÇÃO DA ESTABILIDADE DE SCHMIDT (J/m^2) E RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE (W/m^2) NO PERÍODO 1

FIGURA 27 – CORRELAÇÃO DA ESTABILIDADE DE SCHMIDT E VELOCIDADE DO VENTO (m/s) NO PERÍODO 1

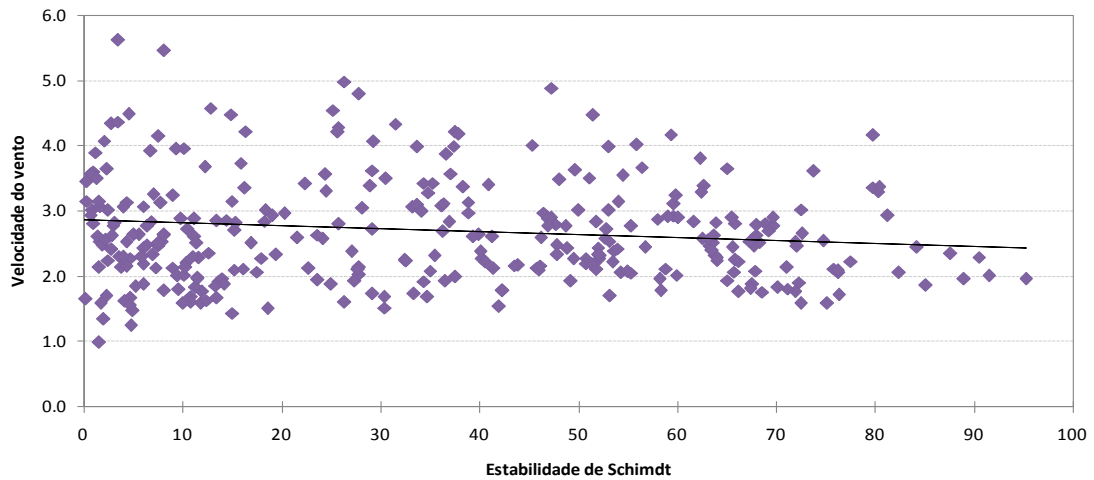
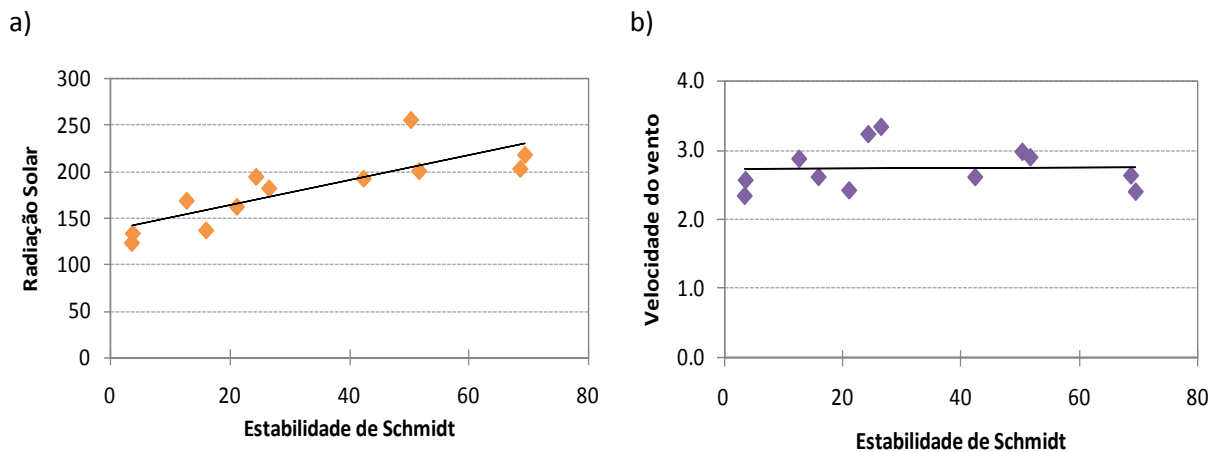


FIGURA 28 – CORRELAÇÃO DAS MÉDIAS MENSIS DA ESTABILIDADE DE SCHMIDT (J/m^2) E A) RADIAÇÃO SOLAR (W/m^2) E B) VELOCIDADE DO VENTO (m/s) NO PERÍODO 1



O segundo período analisado, o ano de 2011, apresentou temperaturas elevadas da água entre os meses de janeiro e março (Figura 29) quando comparado com o período anterior; nestes meses a termoclina apresenta uma tendência de elevar-se. O reservatório apresenta poucos períodos de mistura; nos meses de maio e junho ocorre mistura completa das massas d'água.

A estabilidade de Schmidt (Figura 30) apresentou valores baixos a partir de março até final de setembro. No mês de maio observa-se mistura completa durante o mês inteiro com média mensal próximo de $0,86 J.m^{-2}$, enquanto que janeiro apresenta média mensal de $79,21 J.m^{-2}$. A frequência de Brunt-Väisälä apresenta comportamento similar à estabilidade, como mostra a Figura 31, com valores elevados encontrados entre janeiro e fevereiro.

A radiação solar durante 2011 (Figura 12) não apresentou padrão de sazonalidade, apresentando médias mensais elevadas entre os meses de abril e setembro, com valores em torno de 250 W.m^{-2} , comparando com as médias mensais para os mesmos meses em 2010, que apresentam médias de 150 W.m^{-2} . Devido a esse fato, obteve-se nenhuma correlação ($R = 0,005$) entre a estabilidade de Schmidt e a radiação solar (Figura 32).

A análise dos parâmetros de L_N e W não foi realizada, devido aos problemas apresentados pelo anemômetro, conseqüentemente, não é possível avaliar a ação do vento como forçante da mistura da coluna d'água neste período.

Apesar da precipitação exercer pouca influência no balanço energético do reservatório, eventos de chuvas intensas devem ser considerados como possível explicação para o decaimento brusco da estabilidade de Schmidt, como encontrado nos meses de julho a outubro. Read *et. al.* (2011) realizou um estudo em um lago subtropical localizado na Florida, onde foram calculados os parâmetros de estabilidade de Schmidt, profundidade da termoclina e variação da temperatura para o ano de 2009. Neste período ocorreu um evento de chuva intensa no mês de agosto de 2009, responsável pelo aprofundamento da termoclina, assim como diminuição da estabilidade de Schmidt neste período.

FIGURA 29 – DISTRIBUIÇÃO VERTICAL DA TEMPERATURA DA ÁGUA (°C) NO PERÍODO 2

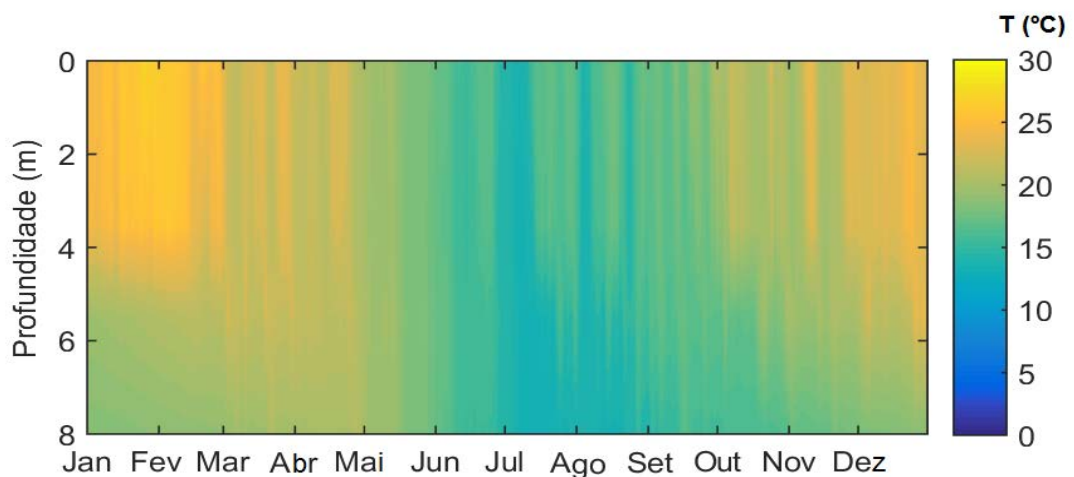
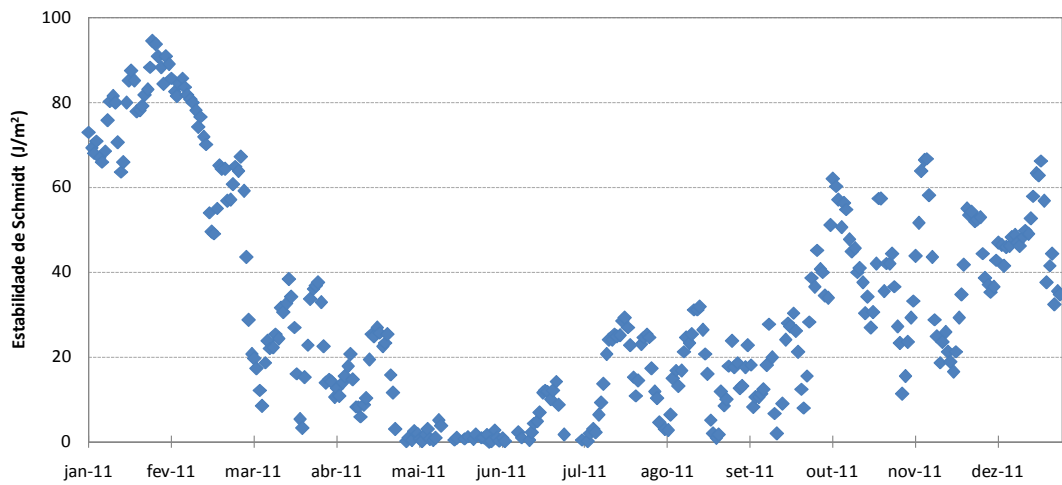
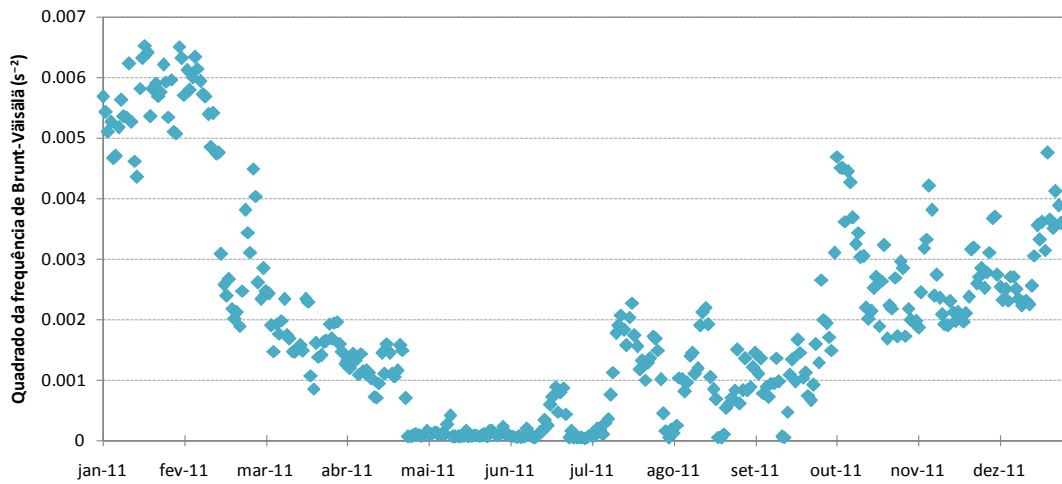
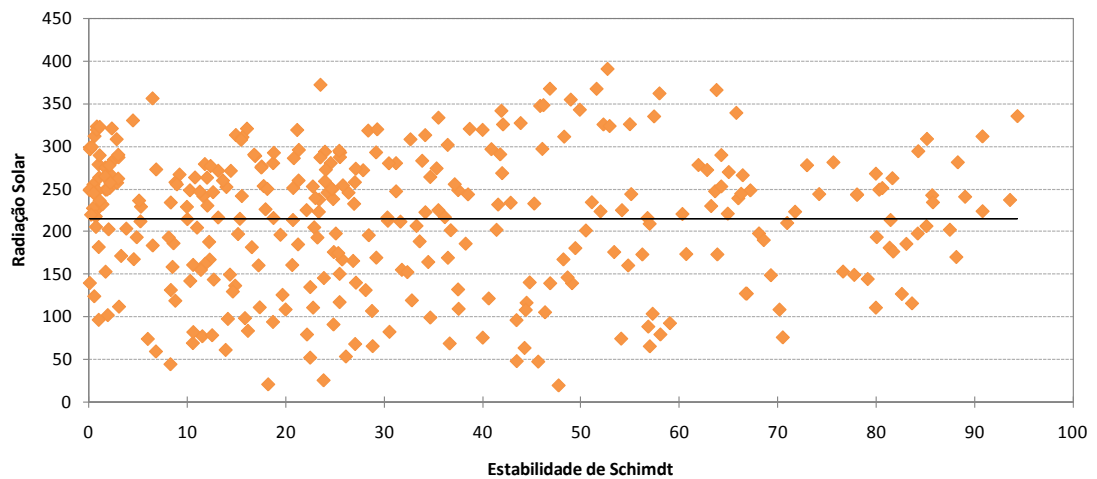


FIGURA 30 – ESTABILIDADE DE SCHMIDT (J/m^2) NO PERÍODO 2FIGURA 31 – QUADRADO DA FREQUÊNCIA DE BRUNT-VÄISÄLÄ (s^{-2}) NO PERÍODO 2FIGURA 32 – CORRELAÇÃO DA ESTABILIDADE DE SCHMIDT (J/m^2) E RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE (W/m^2) NO PERÍODO 2

O terceiro período analisado, entre fevereiro de 2013 e fevereiro de 2014, assim como os ciclos de 2010 e 2011, apresentou apenas um período de mistura, entre maio e julho, com forte estratificação entre janeiro e fevereiro de 2014 e termoclina próximo de 6 m de profundidade, como mostrado na Figura 33.

A Figura 34 apresenta a estabilidade de Schmidt para o ciclo de 2013/2014. O mês de fevereiro de 2014 apresentou a maior estabilidade ($92,57 \text{ J.m}^{-2}$), enquanto que o menor valor foi encontrado em junho de 2013 ($0,14 \text{ J.m}^{-2}$). Em meados de fevereiro de 2014 observam-se drásticas mudanças e queda na estabilidade de Schmidt, valores tão baixos podem ser provenientes de erros na coleta de dados das temperaturas da água, pois em 2014 houve perda de muitos dados indicando problemas com os equipamentos meteorológicos. A frequência de Brunt-Väisälä (Figura 35) apresenta o mesmo comportamento que a estabilidade, com valor máximo em fevereiro de 2014 ($0,07 \text{ s}^{-1}$) e menor valor em maio de 2013 ($7 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$).

A Figura 36 e Figura 37 mostram o número do Lago e o número de Wendderburn para o período 3, respectivamente. Assim como em 2010, o número do Lago apresentou valores menores entre abril e outubro, com menor valor de 0,001 encontrado em maio de 2013, porém, valores de $L_N > 1$ é mais evidenciado durante o ciclo, com valor máximo de 18,93 em fevereiro de 2014. Do mesmo modo, o número de Wendderburn mostrou-se maior que 1,0, para grande parte do período analisado. Entre os meses de maio e agosto, observa-se valores de $W \leq 1$, indicando maior probabilidade de resurgência da termoclina, promovendo mistura.

Männich (2013) encontrou resultados similares de L_N e W para o reservatório de Vossoroca, localizado no Paraná, obtendo valores menores que 1,0 entre maio e agosto de 2012, porém, resultados maiores que 1,0 prevalecendo no reservatório, caracterizando estabilidade da estratificação térmica.

Apesar desse comportamento sazonal do vento para esse período e dos baixos valores de L_N e W , entre os meses de maio e agosto, a intensidade do vento apresenta relação nula com a estabilidade de Schmidt (Figura 39), sugerindo pouca influência do vento na mistura da água. Entretanto, a radiação solar apresentou a maior correlação com a estabilidade de Schmidt ($R = 0,55$) dentre os períodos estudados (Figura 38).

FIGURA 33 – DISTRIBUIÇÃO VERTICAL DA TEMPERATURA DA ÁGUA (°C) NO PERÍODO 3

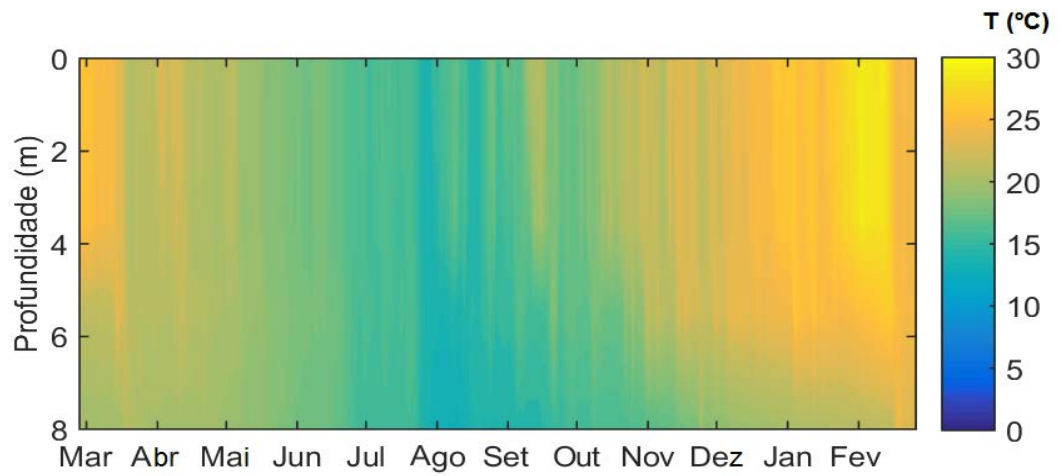
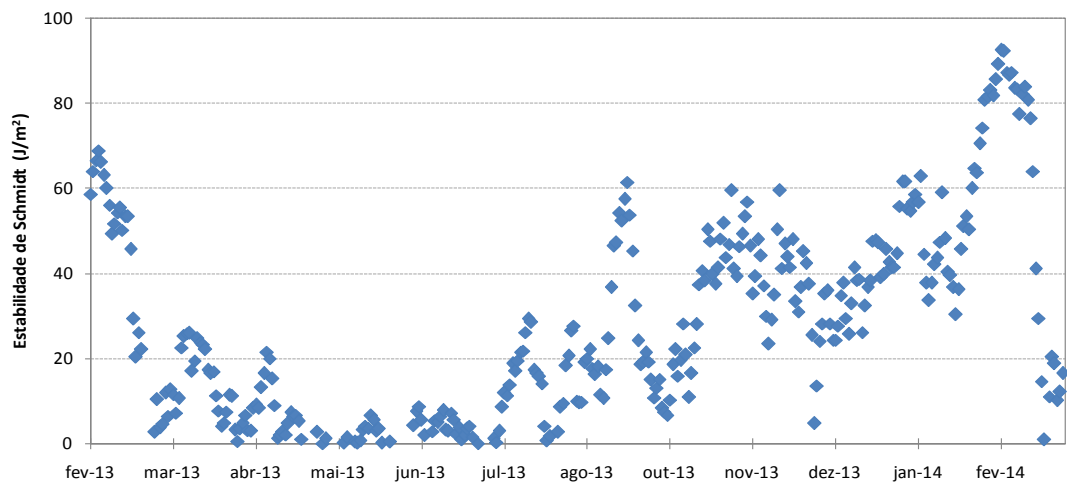
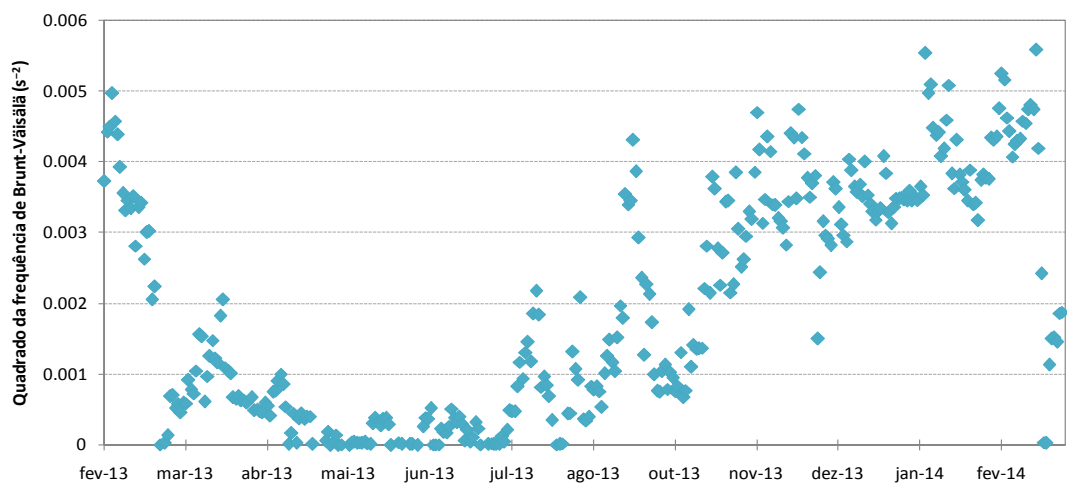
FIGURA 34 – ESTABILIDADE DE SCHMIDT (J/m^2) NO PERÍODO 3FIGURA 35 – QUADRADO DA FREQUÊNCIA DE BRUNT-VÄISÄLÄ (s^{-2}) NO PERÍODO 3

FIGURA 36 – NÚMERO DO LAGO NO PERÍODO 3

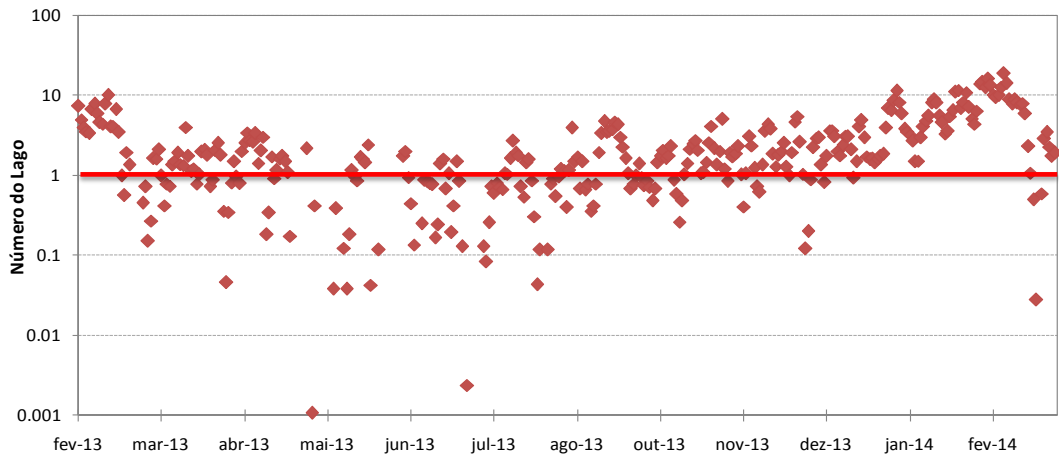


FIGURA 37 – NÚMERO DE WENDDERBURN NO PERÍODO 3

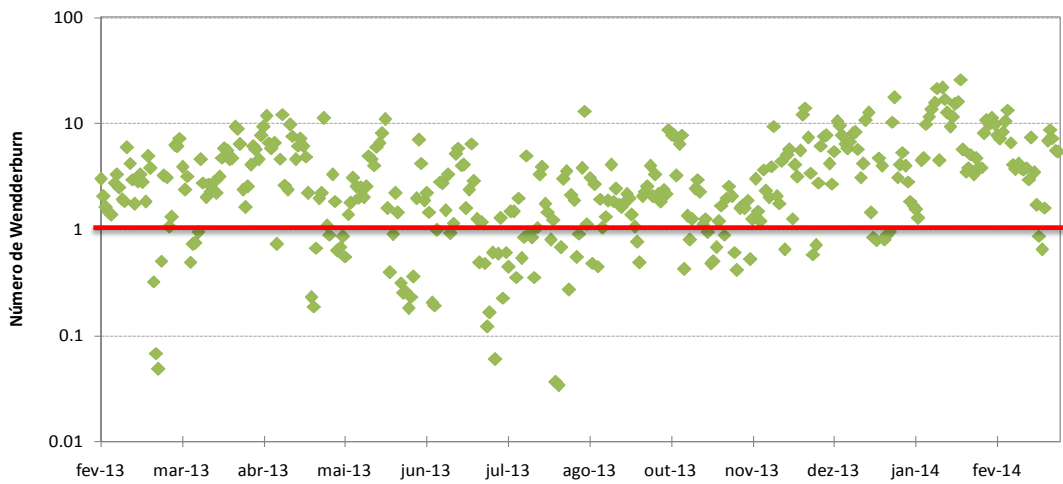
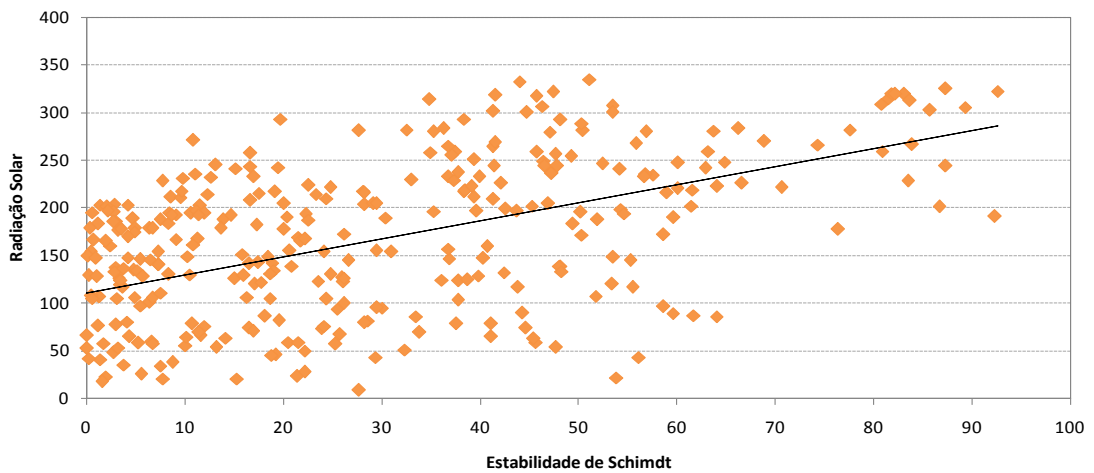
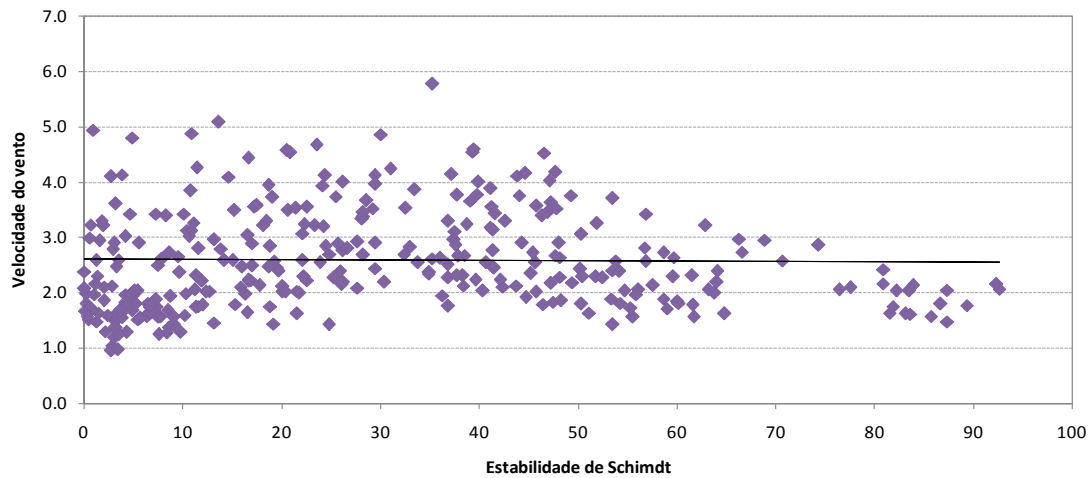
FIGURA 38 – CORRELAÇÃO DA ESTABILIDADE DE SCHMIDT (J/m^2) E RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE (W/m^2) NO PERÍODO 3

FIGURA 39 – CORRELAÇÃO DA ESTABILIDADE DE SCHMIDT(J/m^2) E VELOCIDADE DO VENTO (m/s) NO PERÍODO 3



No quarto período analisado, de março de 2015 a março de 2016, a variação vertical da temperatura da água (Figura 40) apresentou o mesmo padrão encontrado para os anos de 2010 e 2011, com temperaturas da superfície da água mais amenas, menores que 26 °C entre janeiro e março de 2016, comparado com o período anterior, que apresentou temperaturas maiores que 30 °C em fevereiro de 2014. A Figura 40 evidencia erros nos dados de temperatura, em que valores menores que 10 °C foram registrados para a temperatura de superfície, enquanto que as temperaturas de fundo mantiveram-se próximas de 20 °C.

As Figura 41 e Figura 42 apresentam os valores da estabilidade de Schmidt e frequência de Brunt-Väisälä para o período. Os dois parâmetros apresentam a mesma variação, mostrando forte estratificação no reservatório entre dezembro de 2015 e fevereiro de 2016. Observam-se valores incoerentes com o esperado para os meses de agosto e setembro de 2015. Estes meses são caracterizados por períodos de transição, iniciando a primavera, provocando lentamente a estratificação térmica. Essa discordância é justificada pela elevada radiação solar durante aproximadamente 15 dias no início de agosto e 10 dias em meados de setembro, como pode ser observado na Figura 16.

O número do Lago (Figura 43) e o número de Wendderburn (Figura 44) apresentaram-se elevados durante todo o período, exceto para os meses entre abril e junho, em que se observam valores menores, indicando que o aprofundamento da camada de mistura é dominado pelos processos de turbulência gerados pelo vento (MANNICH, 2013).

A relação da estabilidade de Schmidt com a radiação solar (Figura 45) não se mostrou significativa ($R = 0,38$), sendo a menor correlação encontrada entre os períodos analisados. Essa baixa correlação pode ser proveniente dos erros nos dados de temperatura da água que culminaram na redução da estabilidade para o mês de março, mesmo apresentando elevada radiação solar média ($201,46 \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}$). O mesmo ocorre para a correlação da estabilidade com a velocidade do vento (Figura 46), apresentando-se insignificante ($R = 0,109$). Comportamento esperado uma vez que o número de Lago e o número de Wendderburn mostraram-se elevados para o período, e não foi observado sazonalidade na velocidade do vento, com média anual de $2,5 \text{ m/s}$.

FIGURA 40 – DISTRIBUIÇÃO VERTICAL DA TEMPERATURA DA ÁGUA ($^{\circ}\text{C}$) NO PERÍODO 4

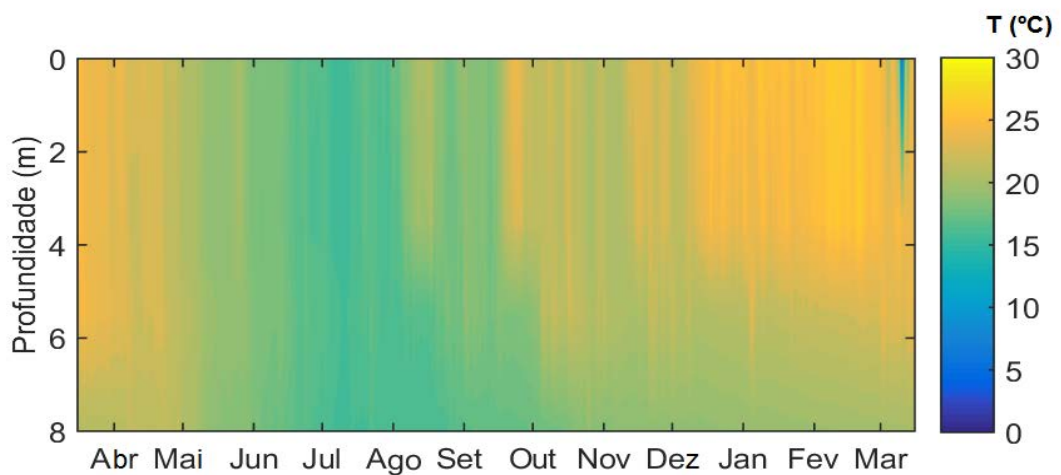


FIGURA 41 – ESTABILIDADE DE SCHMIDT (J/m^2) NO PERÍODO 4

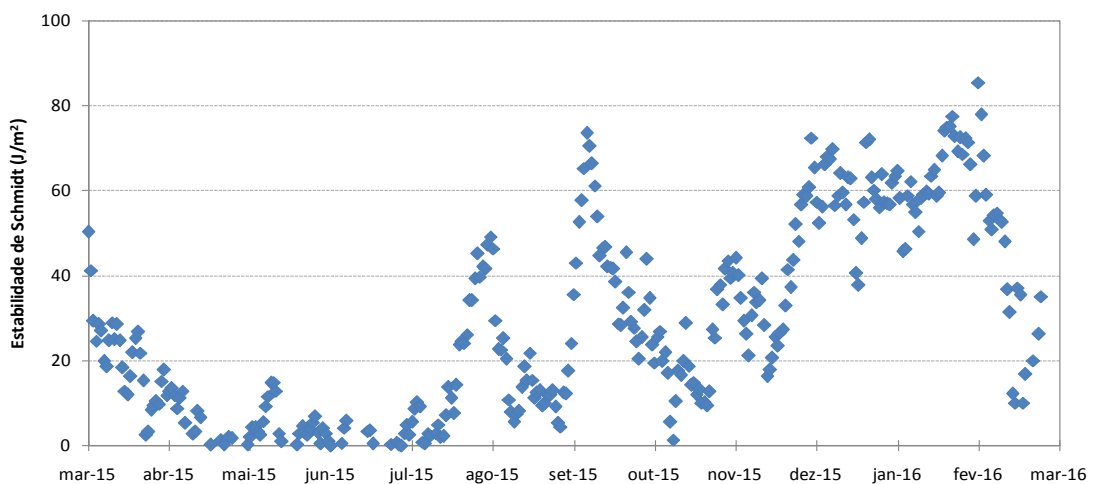


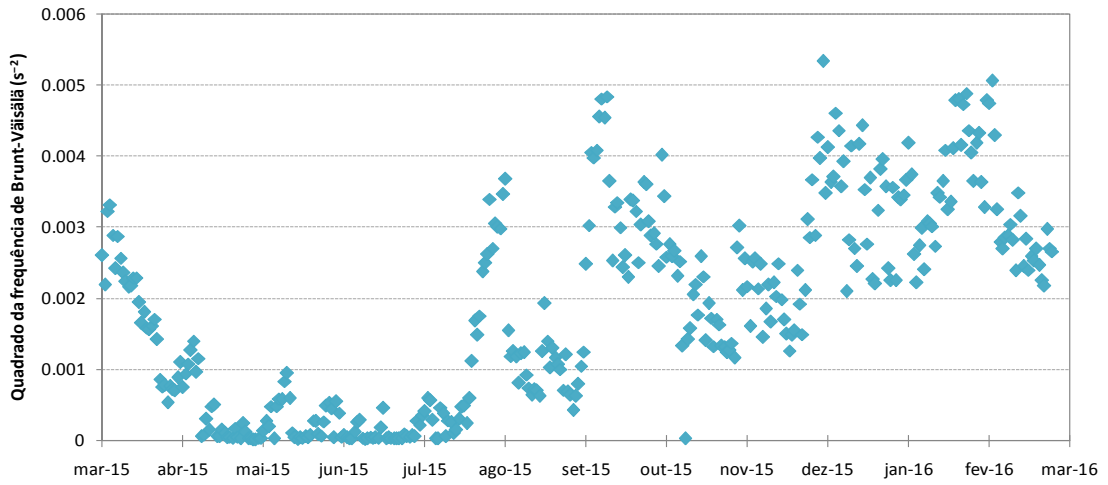
FIGURA 42 – QUADRADO DA FREQUÊNCIA DE BRUNT-VÄISÄLÄ (s^{-2}) NO PERÍODO 4

FIGURA 43 – NÚMERO DO LAGO NO PERÍODO 3

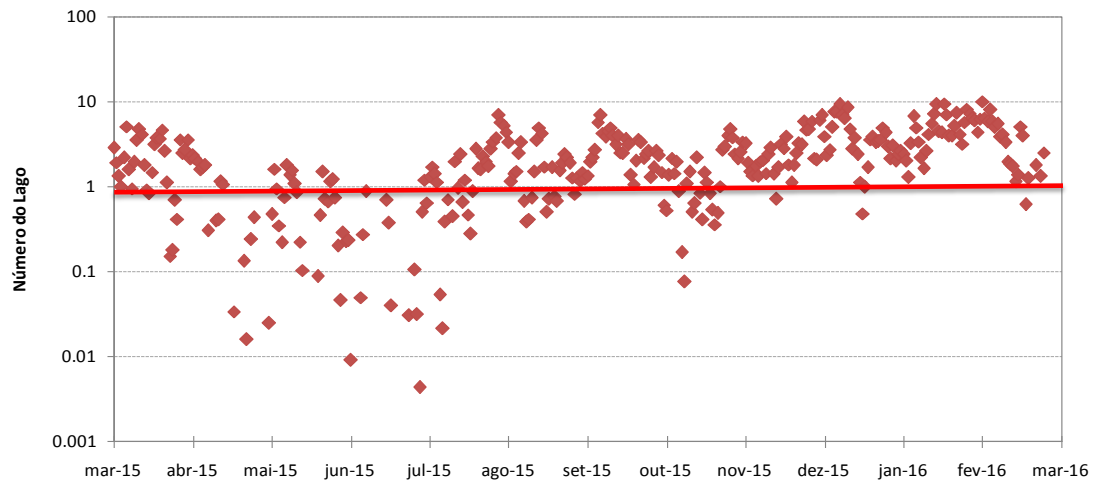
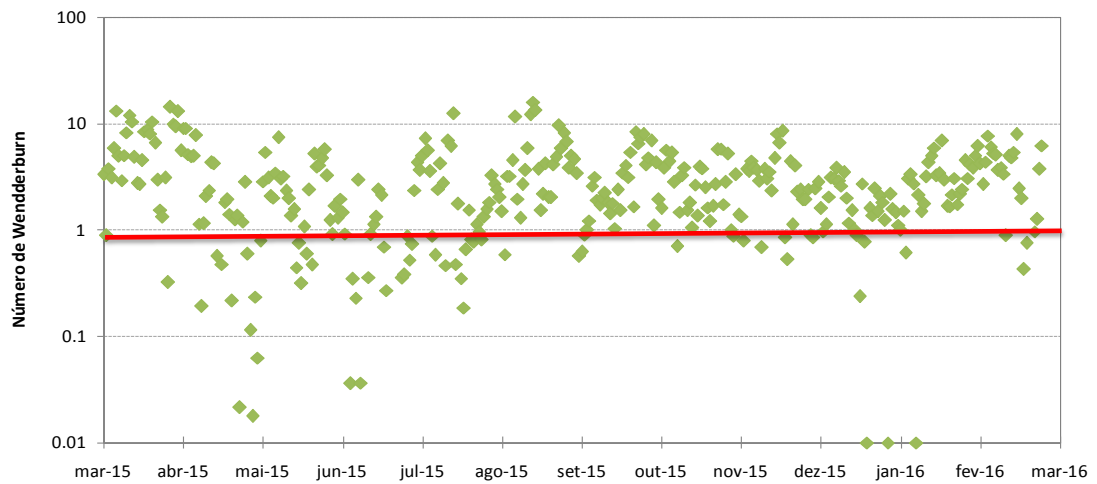


FIGURA 44 – NÚMERO DE WENDDERBURN NO PERÍODO 4

FIGURA 45 – CORRELAÇÃO DA ESTABILIDADE DE SCHMIDT (J/m^2) E RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE (W/m^2) NO PERÍODO 4

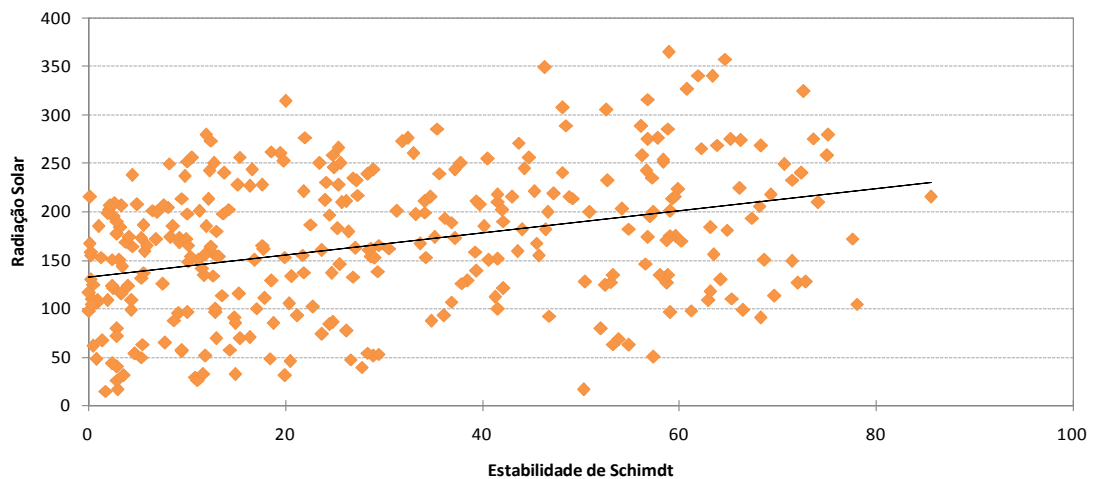
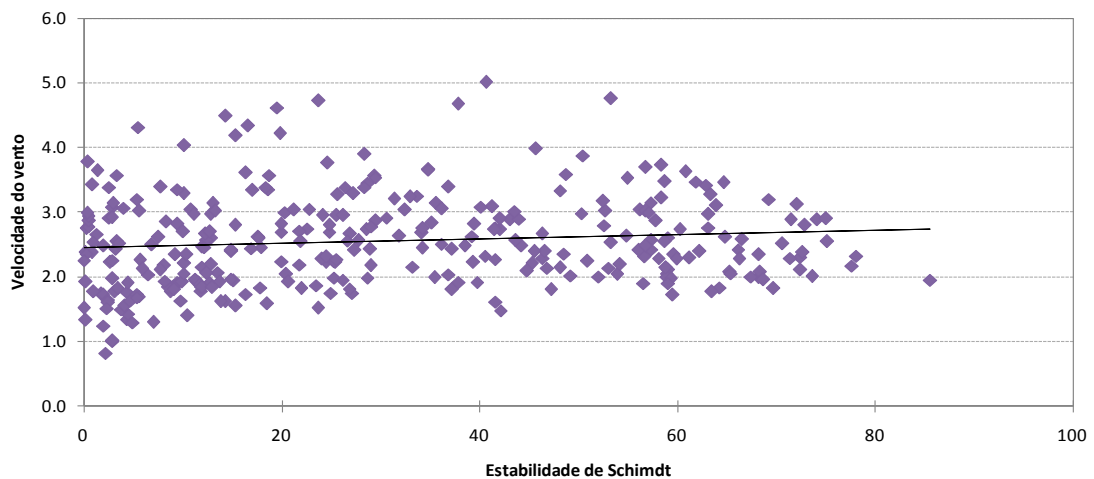


FIGURA 46 – CORRELAÇÃO DA ESTABILIDADE DE SCHMIDT (J/m^2) E VELOCIDADE DO VENTO (m/s) NO PERÍODO 4



4.2. ANÁLISE DAS VARIAÇÕES DIÁRIAS

Com os dados de temperatura da água e velocidade do vento obtidos a cada 15 minutos, foi possível realizar uma análise dos parâmetros para um dia. Selecionou-se o dia com maior gradiente de temperatura da água entre a superfície e o fundo do reservatório e outro com maior ocorrência da direção do vento com maior pista.

A Figura 47 apresenta a variação temporal da distribuição vertical da temperatura da água durante o dia 23 de setembro de 2015. A temperatura de superfície apresentou-se maior a partir das 17:00h até 23:45h, em torno de 25,4 °C, porém sem muita oscilação durante o dia; a menor temperatura registrada foi de

22,9 °C.

A estabilidade de Schmidt, mostrada na Figura 48, representa a estratificação e quebra da estratificação durante o dia. Os valores da estabilidade apresentam-se elevados, classificando o reservatório como estratificado, e há pouca variação entre o dia e a noite, comprovando que a estratificação e a mistura no reservatório ocorrem em uma escala temporal maior. A frequência de Brunt-Väisälä (Figura 49) apresenta o mesmo comportamento da estabilidade de Schmidt.

O número do Lago (Figura 50) e o número de Wendderburn (Figura 51) mostraram-se elevados neste dia, e acompanham o comportamento do vento (Figura 17). Apesar de a intensidade do vento não ser suficiente para promover mistura na coluna d'água, é possível observar decaimento nos parâmetros de estabilidade de Schmidt, número do Lago e número de Wendderburn por volta das 12:00h, assim como observa-se elevação dos parâmetros por volta das 18:00h, quando a velocidade do vento é menor (Figura 17).

A intensidade do vento neste dia não apresentou valores de correlação elevadas ($R = 0,23$) com a estabilidade de Schmidt, como mostra a Figura 53. A estabilidade apresentou maior correlação com a radiação solar (Figura 52) do que a velocidade do vento, porém ainda muito baixa ($R = 0,35$).

Neste dia não foi observado direção do vento com maior pista, porém apresenta ventos na direção Leste (E) (40%), como mostra a Figura 54. As outras direções observadas variam nos quatro quadrantes da rosa dos ventos, com maior ocorrência do vento na direção Leste-Nordeste (ENE) (50%).

FIGURA 47 – DISTRIBUIÇÃO VERTICAL DA TEMPERATURA DA ÁGUA (°C) NO DIA 23 DE SETEMBRO DE 2015

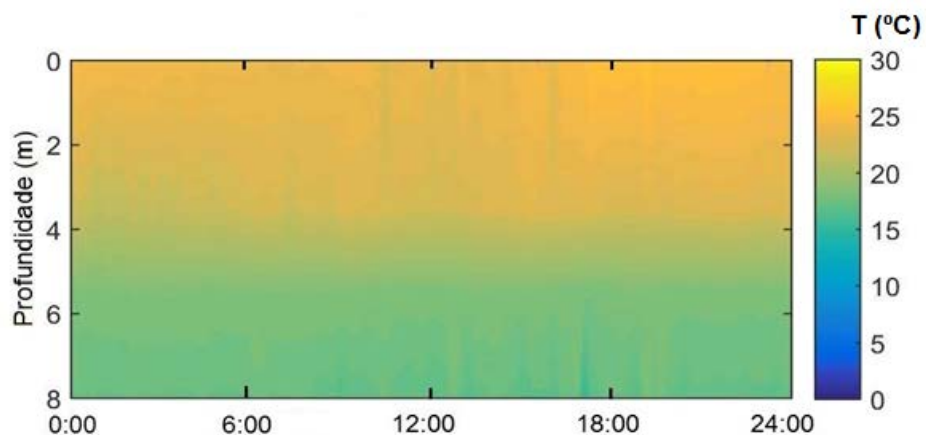


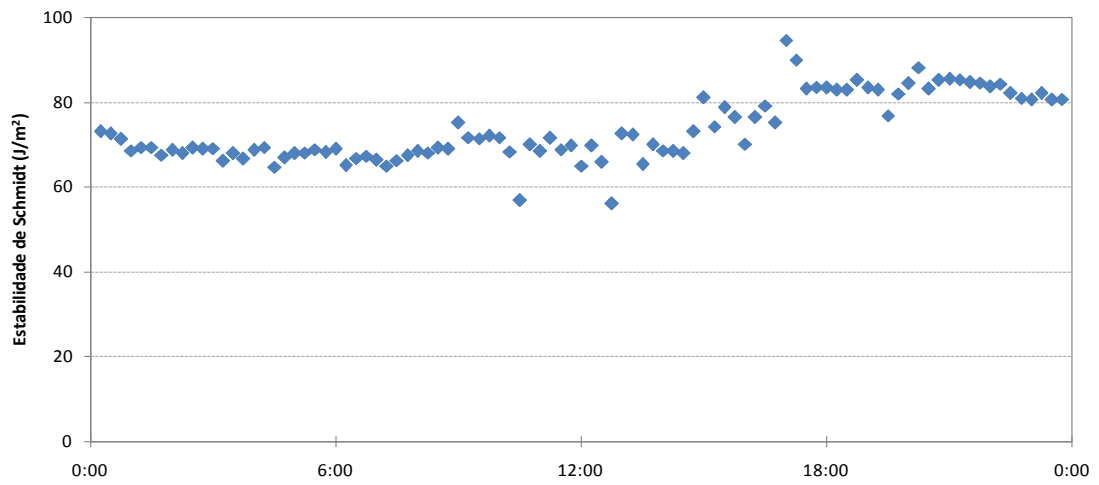
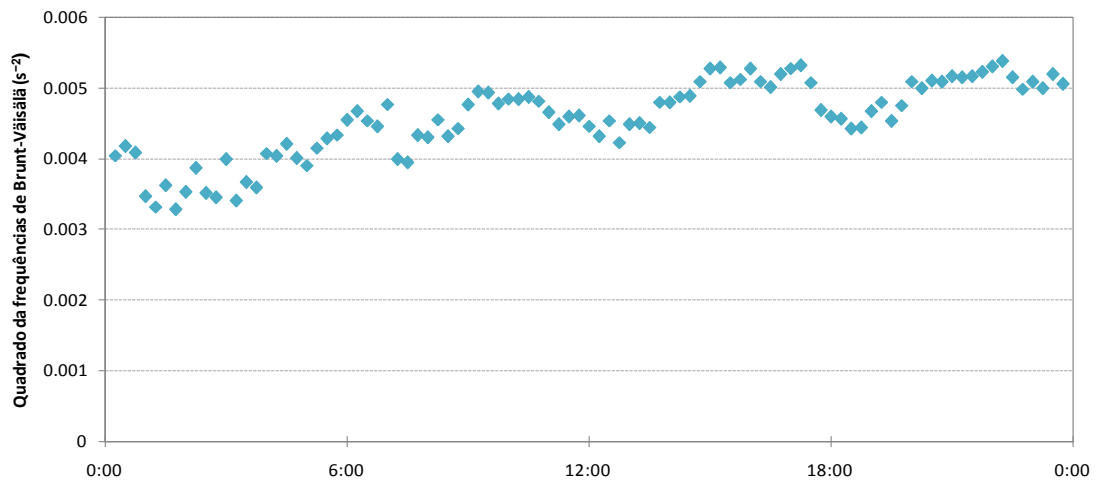
FIGURA 48 – ESTABILIDADE DE SCHMIDT (J/m^2) NO DIA 23 DE SETEMBRO DE 2015FIGURA 49 – QUADRADO DA FREQUÊNCIA DE BRUNT-VÄISÄLÄ (s^{-2}) NO DIA 23 DE SETEMBRO DE 2015

FIGURA 50 – NÚMERO DO LAGO NO DIA 23 DE SETEMBRO DE 2015

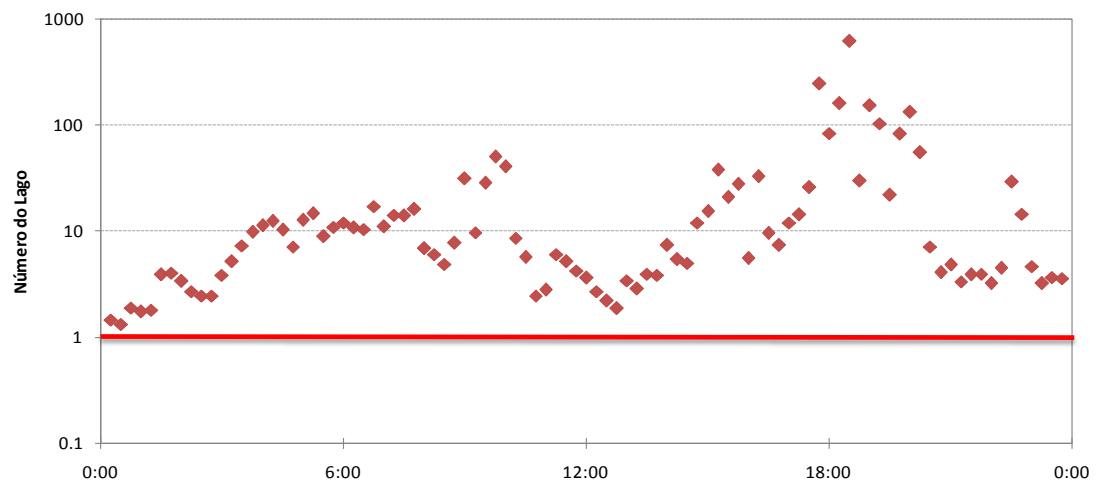


FIGURA 51 – NÚMERO DE WENDDERBURN NO DIA 23 DE SETEMBRO DE 2015

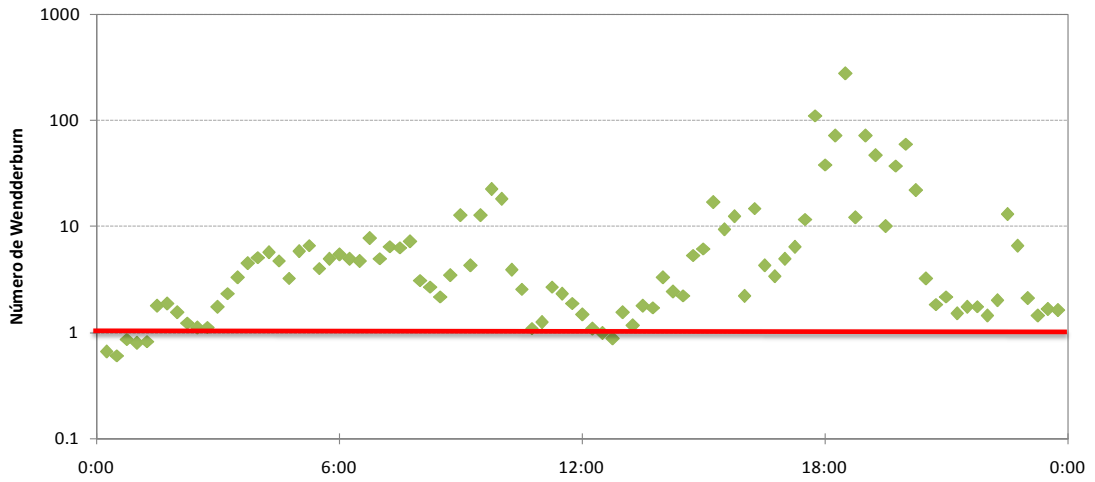


FIGURA 52 – CORRELAÇÃO DA ESTABILIDADE DE SCHMIDT (J/m^2) E RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE (W/m^2) NO DIA 23 DE SETEMBRO DE 2015

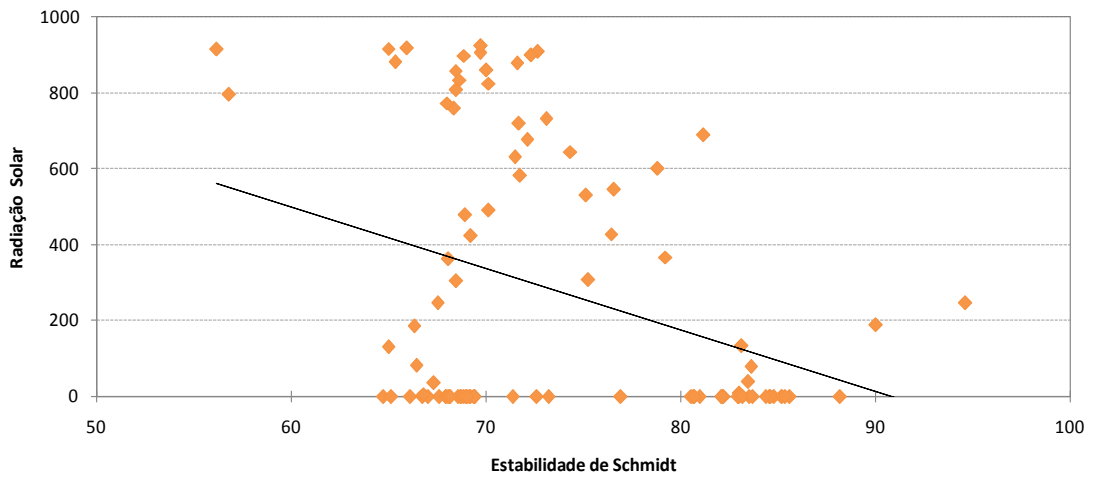


FIGURA 53 – CORRELAÇÃO DA ESTABILIDADE DE SCHMIDT (J/m^2) E VELOCIDADE DO VENTO (m/s) NO DIA 23 DE SETEMBRO DE 2015

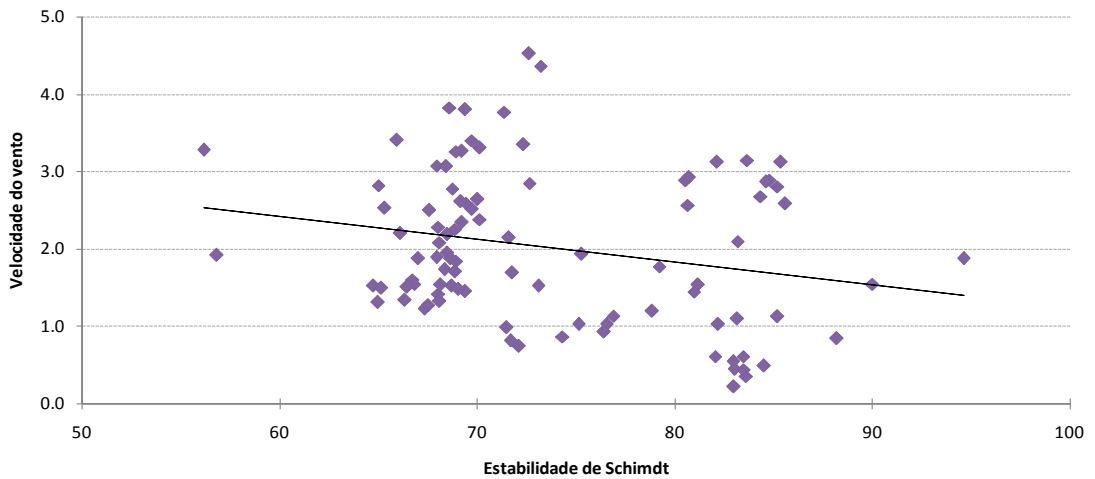
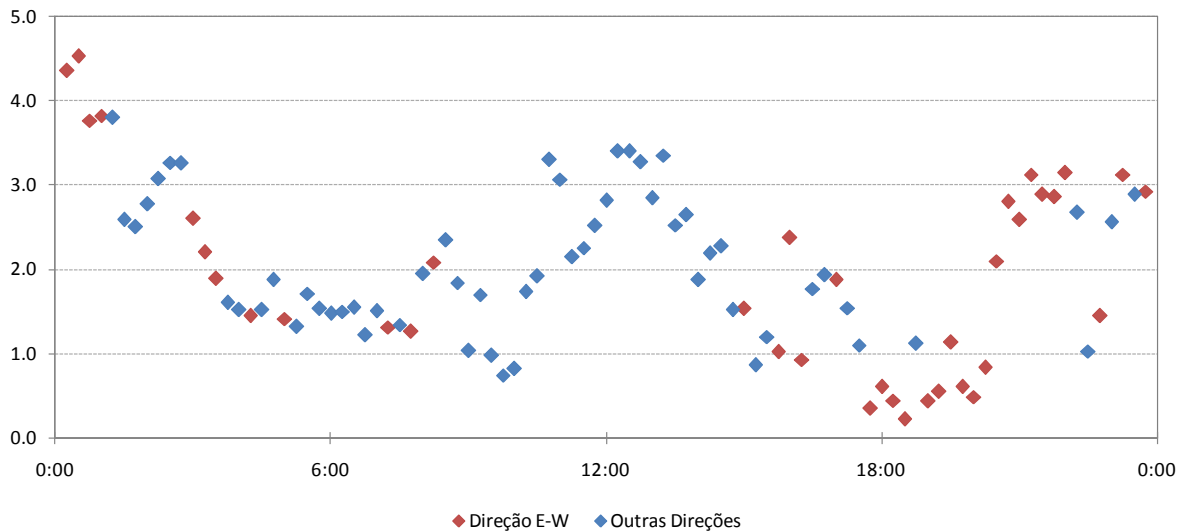


FIGURA 54 – VELOCIDADE DO VENTO (m/s) PARA DIFERENTES DIREÇÕES DO VENTO NO DIA 23 DE SETEMBRO DE 2015



A distribuição vertical da temperatura da água no dia 9 de dezembro de 2015, mostrado da Figura 55, apresenta-se estratificado com aprofundamento da termoclina entre 12:00h e 18:00h. É possível observar elevação da temperatura a partir das 16:00h, mantendo-se em torno de 24 °C até às 24:00h.

A estabilidade de Schmidt apresenta oscilações significativas durante o dia (Figura 56). O reservatório apresenta maior estratificação a partir das 18:00h, consequência das elevadas temperaturas obtidas neste horário. A frequência de Brunt-Väisälä (Figura 57) apresenta variações durante o dia, acompanhando o comportamento da estabilidade, porém não há variação significativa entre o dia e a noite como observado na estabilidade.

Observa-se no comportamento da radiação solar (Figura 20), dois picos intercalados por um decaimento entre as 10:00h e 13:00h. O primeiro aumento da radiação solar corresponde aos valores elevados encontrados para a estabilidade e frequência (54,28 J.m⁻² e 0,0039 s⁻², respectivamente). Ocorre então o decaimento na radiação solar, estabilizando novamente o reservatório, e não é observada variação na estabilidade e na frequência quando o segundo pico da radiação ocorre. Esse comportamento pode ser consequência da ação do vento na superfície do reservatório, que apresentou valores elevados a partir das 12:00h, como mostra a Figura 19.

O número do Lago (Figura 58) e o número de Wendderburn (Figura 59) mostram que o vento foi suficiente para gerar mistura na coluna d'água entre as

12:00h e 16:00h, apresentando valores menores neste período. A partir das 16:00h ocorre o decaimento na intensidade do vento e os parâmetros L_N e W aumentam. Portanto o vento deixa de atuar como forçante da mistura causando estratificação e aumento na estabilidade de Schmidt.

A correlação da estabilidade de Schmidt com a velocidade do vento (Figura 61) foi maior ($R = 0,53$), comparada com o dia 23 de setembro de 2015. Neste dia, porém, a correlação da radiação solar com a estabilidade de Schmidt (Figura 60) apresentou-se menor ($R = 0,45$) que a correlação com o vento, indicando que o vento pode ter atuado como forçante na mistura da água, porém não causou quebra da estratificação, pois os valores de estabilidade apresentam-se elevados (próximos de $40 \text{ (J/m}^2\text{)}$).

A Figura 62 apresenta a distribuição temporal da velocidade do vento para as direções Nordeste (NE), Leste (E) e demais direções. Quando analisados a direção do vento, observa-se que o vento com maior pista não apresenta intensidade suficiente para promover turbulência na coluna d'água, assim como o vento com maior predominância (direção Leste) no reservatório. Portanto a direção do vento não é determinante para geração de turbulência na superfície d'água.

FIGURA 55 – DISTRIBUIÇÃO VERTICAL DA TEMPERATURA DA ÁGUA (°C) NO DIA 9 DE DEZEMBRO DE 2015

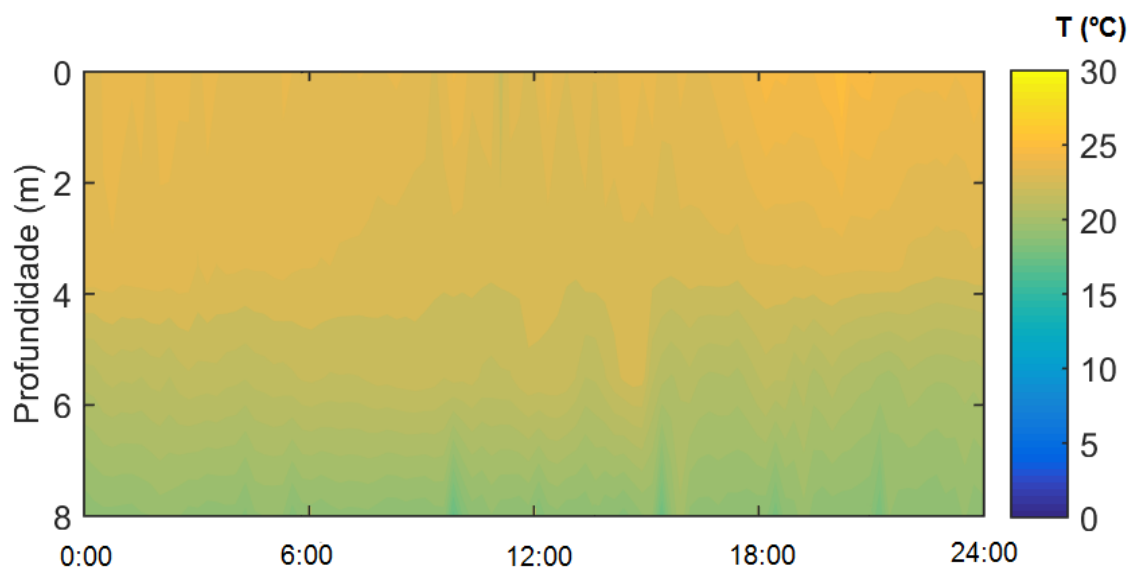


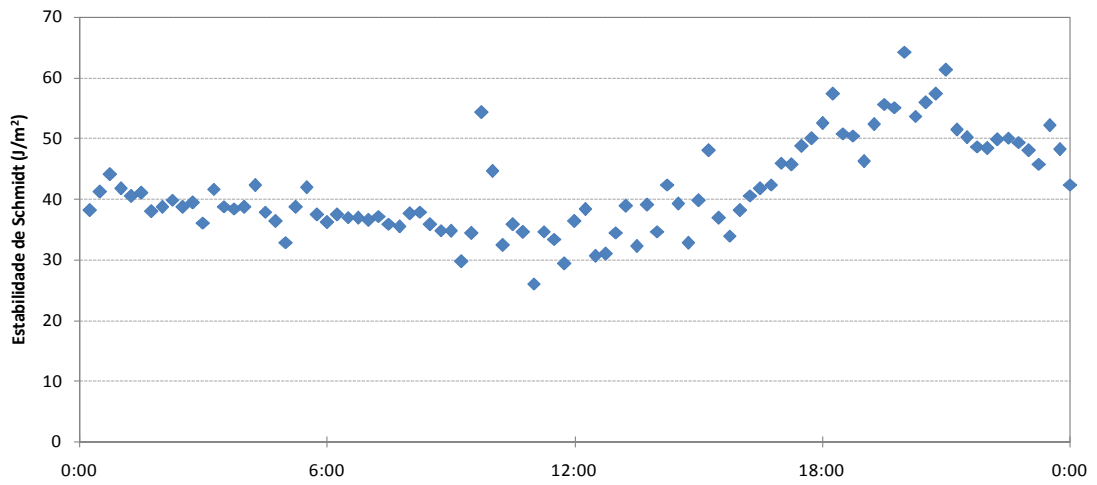
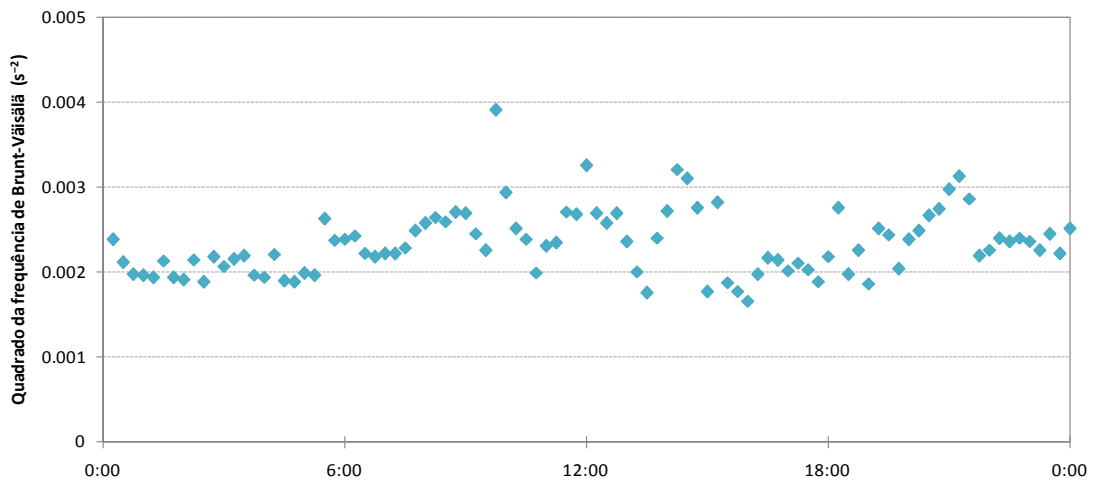
FIGURA 56 – ESTABILIDADE DE SCHMIDT (J/m^2) NO DIA 9 DE DEZEMBRO DE 2015FIGURA 57 – QUADRADO DA FREQUÊNCIA DE BRUNT-VÄISÄLÄ (s^{-2}) NO DIA 9 DE DEZEMBRO DE 2015

FIGURA 58 – NÚMERO DO LAGO NO DIA 9 DE DEZEMBRO DE 2015

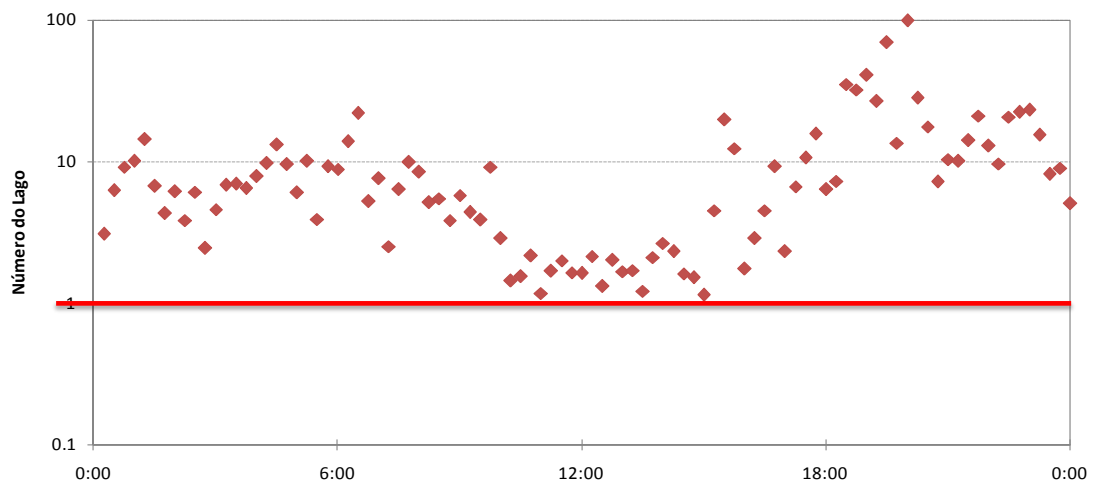


FIGURA 59 – NÚMERO DE WENDDERBURN NO DIA 9 DE DEZEMBRO DE 2015

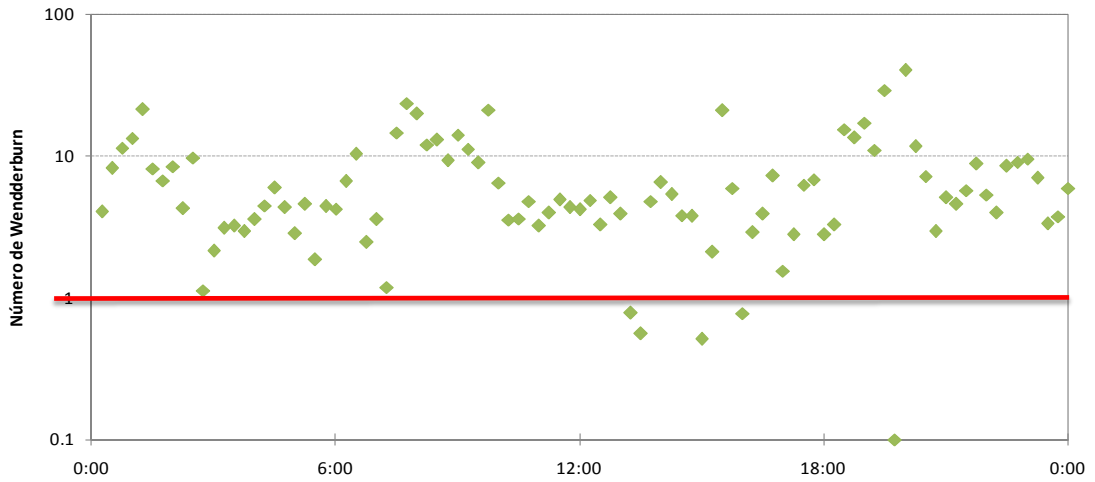


FIGURA 60 – CORRELAÇÃO DA ESTABILIDADE DE SCHMIDT (J/m^2) E RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE (W/m^2) NO DIA 9 DE DEZEMBRO DE 2015

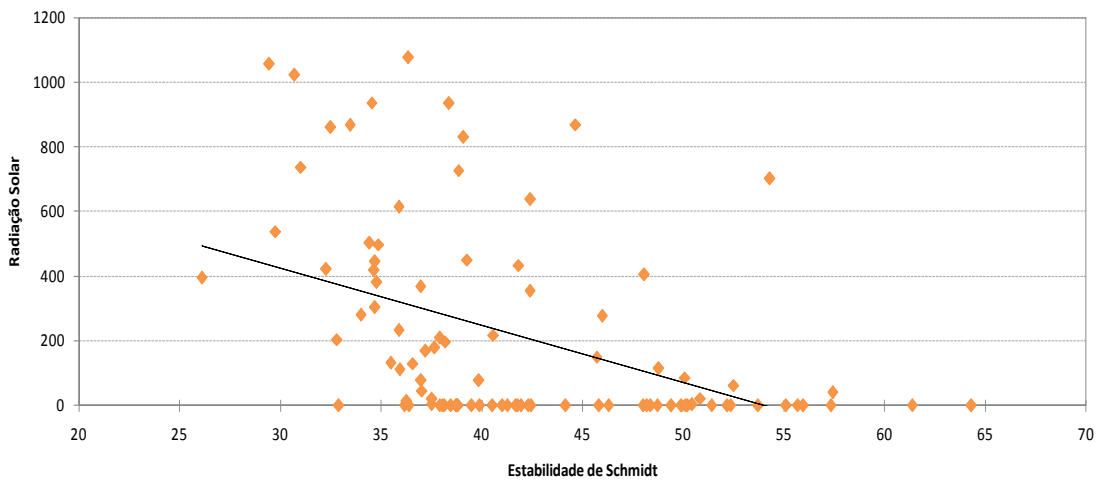


FIGURA 61 – CORRELAÇÃO DA ESTABILIDADE DE SCHMIDT (J/m^2) E VELOCIDADE DO VENTO (m/s) NO DIA 9 DE DEZEMBRO DE 2015

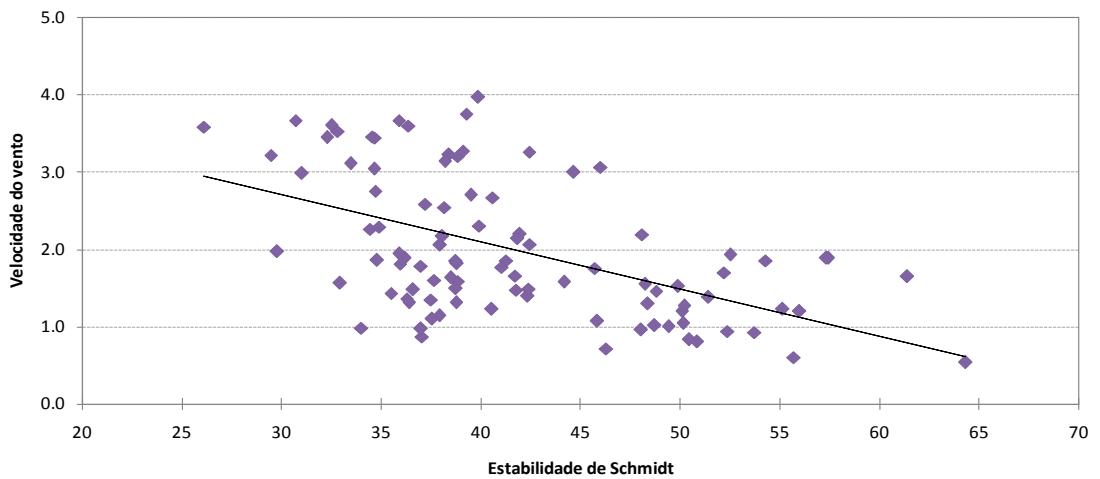
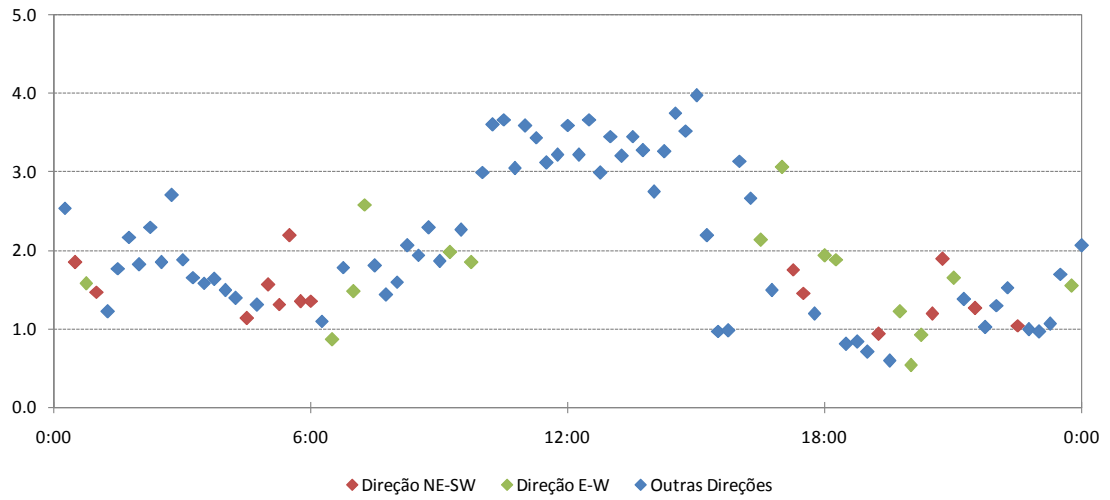


FIGURA 62 – VELOCIDADE DO VENTO (m/s) PARA DIFERENTES DIREÇÕES DO VENTO NO DIA 9 DE DEZEMBRO DE 2015



5 CONCLUSÕES

O presente estudo teve como objetivo principal analisar dados meteorológicos coletados entre 2008 e 2016 no reservatório do Rio Verde, e sua influência como forçantes na quebra e/ou formação da estratificação.

O reservatório Rio Verde apresentou apenas um período de circulação para todos os ciclos analisados, portanto é classificado, segundo Lewis (1983), como monomítico quente, para todos os períodos analisados. Esse comportamento se deve à morfometria do reservatório, apresentando profundidade média de 5,6 m e máxima de 11 m, e tempo médio de retenção de 218 dias, garantindo a estagnação da água e diminuição dos processos horizontais.

O padrão sazonal da estabilidade de Schmidt apresentou-se fortemente ligado à radiação solar, quando analisadas as médias mensais, enquanto que a intensidade do vento não apresentou influência na estabilidade do reservatório. Portanto, os períodos de mistura e estratificação devem ser determinados pela radiação solar.

Na análise das variações diárias obteve-se baixa correlação da estabilidade com a radiação solar incidente. Uma análise em maior escala temporal, avaliando as diferenças entre meses ou estações, pode garantir maior correlação. As trocas de energia na interface ar-água ocorrem lentamente, provocando atraso na resposta do reservatório quanto à variação diária da radiação solar incidente. Uma correlação maior foi observada para o primeiro período estudado quando analisadas as médias mensais.

As correlações da estabilidade de Schmidt e velocidade do vento foram satisfatórias para as análises diárias, onde foi possível observar um comportamento definido da intensidade do vento, diferente da correlação obtida na análise anual. Apesar de o vento apresentar intensidade suficiente para provocar turbulência na coluna d'água, não foi observada uma direção predominante do vento, apresentando orientações aleatórias durante todo o dia.

No reservatório do Rio Verde não é observada grande influência dos ventos orientados na direção de maior pista (direção Nordeste) no processo de quebra da estratificação. Observa-se pouca ocorrência dos ventos na direção Nordeste e baixas velocidades em todos os períodos analisados.

Na análise anual da correlação entre a estabilidade e velocidade do vento

obtiveram-se valores praticamente nulos, indicando que as médias diárias do vento não são capazes de provocar mistura das massas de água, quando analisados anualmente. A baixa correlação encontrada pode ser justificada pelo fato de coletar-se dados de temperatura d'água à dois metros de profundidade; nessa profundidade as forças geradas pelo vento podem não ser suficiente para promover turbulência. Portanto, para análises futuras, seria interessante a obtenção de dados de temperatura da água mais próximos à superfície.

Uma alternativa de avaliação do principal forçante dos processos de estratificação e mistura é avaliar a estabilidade e as variáveis meteorológicas no período de 12 horas, diferenciando período diurno e noturno. Essa alternativa facilita a avaliação do vento como forçante na mistura d'água, uma vez que a velocidade do vento não apresenta comportamento diferenciado entre dia e noite.

A análise da correlação linear não apresentou resultados satisfatórios, pois para todos os períodos analisados a correlação obtida apresentou valores baixos. Possivelmente neste caso, é adequado adotar outro método estatístico, como por exemplo, uma análise estatística multivariada.

Os valores elevados para o número de Lago e o número de Wendderburn encontrados em todos os períodos analisados mostram, novamente, que vento tem pouca influência sobre os processos de mistura (MANNICH, 2013). Soma-se a isso as baixas velocidade do vento, que pode ser classificado como brisas muito fracas ($1,6 - 3,3 \text{ m.s}^{-1}$) a fracas ($3,4 - 5,4 \text{ m s}^{-1}$) e a pouca frequência do vento com maior pista no reservatório.

O regime térmico do reservatório pode ser alterado pelas vazões de entrada e saída do corpo d'água, assim como a precipitação na superfície d'água. Porém, não se pode concluir quanto à influências desses parâmetros na estratificação do reservatório, pois não foram obtidos dados para precipitação e não foram calculados o número de Froude, que considera a influência das vazões de entrada e saída.

Conclui-se que o presente trabalho não esgota as possibilidades de novos encaminhamentos de pesquisa sobre a análise da relação das variáveis meteorológicas com os processos de quebra e/ou a estratificação do reservatório.

6 REFERÊNCIAS

- ANDREOLI, C. V.; CARNEIRO, C.; GUTSEIT, K. C.; XAVIER, C. da F. Caracterização geral da bacia. In: CUNHA, C. L. N.; CARNEIRO, C.; GOBBI, E. F.; ANDREOLI, C. V. Eutrofização em reservatórios: gestão preventiva – Estudo Interdisciplinar na bacia do Rio Verde, PR. Curitiba: Editora UFPR, 2011.
- ANGELOCCI, L. R.; VILLANOVA, N. A. Variações da temperatura da água de um pequeno lago artificial ao longo de um ano em Piracicaba-SP. *Scientia agrícola*, v.52, n.3, p.431-438, 1995.
- BEZERRA-NETO, J. F.; PINTO-COELHO, R. M. A estrutura térmica, o trabalho do vento e a estabilidade de um reservatório tropical raso: Lagoa do Nado, BH - MG. BIOS, Caderno do Departamento de Ciências Biológicas da PUC Minas, v.10, n.10, p.19-33, 2002.
- BRANCO, S. M.; CLEARY, R. W.; COIMBRA, R. M.; EIGER, S.; LUCA, S. J.; NOGUEIRA, V. P. Q.; PORTO, M. F. A. Hidrologia Ambiental. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1991.
- CUNHA, C. de L. da N.; FRANZ, G.; SOARES, A. P. K.; GONÇALVES, J. E.; ROSMAN, P. C. C. Hidrodinâmica e transporte no reservatório Rio Verde. In: CUNHA, C. L. N.; CARNEIRO, C.; GOBBI, E. F.; ANDREOLI, C. V. Eutrofização em reservatórios: gestão preventiva – Estudo Interdisciplinar na bacia do Rio Verde, PR. Curitiba: Editora UFPR, 2011, p.249-282.
- CUNHA, C. L. N.; FERREIRA, D. M. Simulação numérica do comportamento térmico do reservatório do Rio Verde. *Engenharia Sanitária Ambiental*, v.18, n.1, p.83-93. 2013.
- ESTEVES, F. A. Fundamentos de Limnologia. Rio de Janeiro: Interciência/FINEP, 1988.
- HENDERSON-SELLERS, B. Calculating the Surface Energy Balance for Lake and Reservoir Modeling: A Review. *Reviews of Geophysics*, v.24, n.3, p.625-649. 1986.
- LEWIS, W. M. Temperature, heat and mixing in Lake Valencia, Venezuela. *American Society of Limnology and Oceanography*, v.28, n.2, p. 273-286, 1983.
- LOPES, M. R. M.; BICUDO, C. E. M. Short term variation of physical characteristics of a shallow subtropical oligotrophic reservoir, southeast Brazil. *Acta Limnologica Brasiliensia*, v.13, n.2, p.87-98, 2001.
- MANNICH, M. Estimativa de emissão de gases de efeito estufa em reservatórios e lagos - contribuições para monitoramento e modelagem 1D-vertical. 284 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambientais) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.
- MIRANDA, T. L. G. D. et al. Estudos dos processos de estratificação em grandes reservatórios da bacia do rio Iguaçu. XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos.

ABRH. Campo Grande: ABRH, 2009.

POLLI, B. A. Modelagem 1D do fluxo vertical de calor em corpos de água horizontalmente homogêneos. 105 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

READ, J. S.; HAMILTON, D. P.; JONES, I. D.; MURAOKA, K.; WINSLOW, L. A.; KROISS, R.; WU, C. H.; GAISER, E. Derivation of lake mixing and stratification indices from high-resolution lake buoy data. *Environmental Modelling & Software*, v.26, p.1325-1336, 2011.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA A EDUCAÇÃO, A CIÊNCIA E A CULTURA (UNESCO) (1981). Tenth report of the joint panel on oceanographic tables and standards. Paris: UNESCO. (UNESCO Technical Papers in Marine Science 36).

WETZEL, R. G. *Limnology*. Philadelphia: W. B. Saunders Company, 1975.

WROBEL, L. C.; EIGER, S.; ROSMAN, P. C.; TUCCI, C. E.; CIRILLO, J. A.; CABRAL, J. P. *Métodos numéricos em recursos hídricos*. Rio de Janeiro: ABRH, 1989.