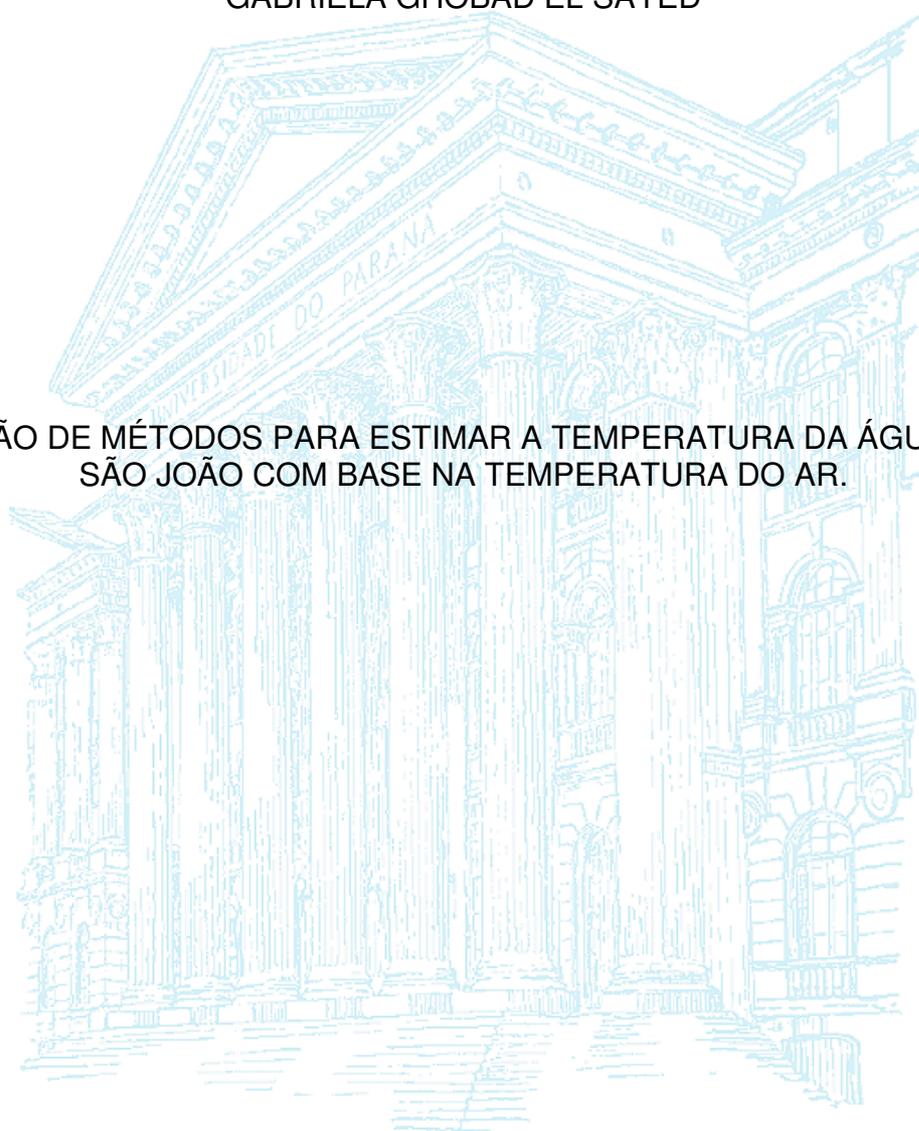


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AMBIENTAL

GABRIELA GHOBAD EL SAYED

AVALIAÇÃO DE MÉTODOS PARA ESTIMAR A TEMPERATURA DA ÁGUA DO RIO
SÃO JOÃO COM BASE NA TEMPERATURA DO AR.



CURITIBA
2016

GABRIELA GHOBAD EL SAYED

AVALIAÇÃO DE MÉTODOS PARA ESTIMAR A TEMPERATURA DA ÁGUA DO RIO
SÃO JOÃO COM BASE NA TEMPERATURA DO AR.

Trabalho de Conclusão do Curso II
apresentado ao curso de Engenharia
Ambiental, Setor de Tecnologia, Universidade
Federal do Paraná como Requisito parcial à
conclusão do curso de Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Michael Mannich.

CURITIBA
2016



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE TECNOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

TERMO DE APROVAÇÃO DE PROJETO FINAL

GABRIELA GHOBAD EL SAYED

AVALIAÇÃO DE MÉTODOS PARA ESTIMAR A TEMPERATURA DA ÁGUA DO RIO SÃO JOÃO COM BASE NA TEMPERATURA DO AR

Projeto Final de Curso, aprovado como requisito parcial para a obtenção do Diploma de Bacharel em Engenharia Ambiental no Curso de Graduação em Engenharia Ambiental do Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, com nota 8,8, pela seguinte banca examinadora:

Orientador(a): 
Michael Mannich
Departamento de Engenharia Ambiental/ Universidade Federal do Paraná

Membro(a) 1: 
Tobias B. Bieinger
Departamento de Engenharia Ambiental/ Universidade Federal do Paraná

Membro(a) 2: 
Emílio Graciliano Ferreira Mercuri
Departamento de Engenharia Ambiental/ Universidade Federal do Paraná

Curitiba, 05 de dezembro de 2018.

GABRIELA GHOBAD EL SAYED

Agradeço a meus pais e irmão e a todos que colaboraram para o desempenho e o resultado final deste projeto, e, em especial, ao Professor Doutor Michael Mannich, pela sua total disponibilidade e dedicação não poupando esforços para que os resultados fossem atingidos.

RESUMO

A temperatura da água de um rio depende de vários fatores, como o vento, a umidade do ar, a latitude, o ângulo de incidência do raio solar na superfície terrestre. Estudos relacionados com a temperatura da água, bem como previsões do comportamento ou possíveis variações da mesma, são cruciais e estão sendo cada vez mais utilizados e aprofundados, uma vez que, a temperatura da água é um fator determinante na concentração de oxigênio dissolvido e na taxa de decomposição da matéria orgânica, entre outros fatores. Para determinar e prever a temperatura da água é possível relacioná-la com a temperatura do ar ou outras variáveis meteorológicas. Outra forma é relacioná-la com a temperatura de equilíbrio da água, que é o valor de temperatura quando o fluxo líquido de calor através da superfície da água é zero. No presente estudo, foram utilizados dados de temperatura do Rio São João (PR) e do ar, da Estação meteorológica em Tijucas do Sul (PR), para estabelecer uma relação entre as ambas. O período de coleta de dados foi de agosto de 2015 até outubro de 2016. Três tipos de modelagem foram aplicados nesse estudo, a regressão linear, cujo modelo conseguiu representar 56% os dados observados ao utilizar médias diárias de valores de temperatura, com uma raiz do erro quadrático médio (REQM) de 1,5 °C. A segunda relação foi obtida pela utilização do modelo de regressão exponencial dos dados, também utilizando a escala temporal de médias diárias, e o modelo conseguiu representar em 61% os dados observados, com um REQM de 1,3 °C. Por último, o modelo de temperatura de equilíbrio foi utilizado e levou em consideração diversos aspectos meteorológicos em sua aplicação, como radiação, temperatura do ar, emissividade térmica, capacitância, calor específico, velocidade do vento, entre outros. Apesar da grande variedade de dados que compõe o modelo, esse conseguiu representar 55% os dados observados e teve um REQM de 4°C, quando utilizado valores de médias diárias de temperatura. Todos os três modelos também foram aplicados utilizando os valores de temperatura com médias móveis semanais. Com isso, os resultados melhoraram significativamente, para a regressão linear o coeficiente de determinação teve resultado de 0,8 e REQM 0,9 °C, para a regressão exponencial 0,82 e o 0,8 °C e, para o modelo de temperatura de equilíbrio, 0,77 e o valor da REQM 0,9 °C, respectivamente.

Palavras-Chave: temperatura do ar, temperatura da água, temperatura de equilíbrio, modelagem, parametrização, monitoramento.

ABSTRACT

The water temperature of a river depends on several factors, such as wind, air humidity, latitude, the angle of incidence of the solar ray on the earth's surface. Studies related to water temperature, as well as predictions of the behavior or possible variations thereof, are crucial and are being increasingly used and deepened, since, the water temperature is a determinant factor in the dissolved oxygen concentration and in the rate of organic matter decomposition, among other factors. To determine and predict the water temperature it is possible to relate it to the air temperature or other meteorological variables. Another way is to relate it to the equilibrium temperature of the water, which is the temperature value when the liquid flow of heat through the water surface is zero. In the present study, the temperature data of the São João River (PR) and the air temperature of the Tijucas do Sul (PR) meteorological station were used to establish a relationship between the two of them. The data collection period was from August 2015 to October 2016. Three types of modeling were applied in this study, linear regression, whose model was able to represent 56% of the observed data when using daily averages of temperature values, with a RSME of 1.5 °C. The second relation was obtained using the exponential regression model, also using the time scale of daily averages, and the model was able to represent 61% of the observed data, with an RSME of 1.3 °C. Finally, the equilibrium temperature model was used and took into account several meteorological aspects in its application, such as radiation, air temperature, thermal emissivity, capacitance, specific heat, wind speed, among others. In spite of the wide variety of data that make up the model, it was able to represent 55% of the observed data and had an RSME of 4°C, when using values of daily temperature averages. All three models were also applied using temperature values with weekly moving averages. Thus, the results improved significantly, for the linear regression the coefficient of determination had a result of 0.80 and the RSME 0.90 °C, for the exponential regression 0,82 and 0,80 °C and, for the temperature model of 0.70 and 0.90 °C, respectively.

Key-words: air temperature, water temperature, equilibrium temperature, modeling, parameterization, monitoring.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 – REPRESENTAÇÃO DOS FLUXOS DE CALOR.....	17
FIGURA 2 – ESTAÇÃO METEOROLÓGICA NO RESERVATÓRIO VOSSOROCA.	29
FIGURA 3 – IMAGEM DE SATÉLITE DA ÁREA DE ESTUDO.....	30
FIGURA 4 – IMAGEM DE SATÉLITE DA ÁREA DE ESTUDO.....	31
FIGURA 5 – IMAGEM DO LOCAL DE ESTUDO ONDE ESTÁ INSTALADA A ESTAÇÃO DE MEDIÇÃO DE TEMPERATURA DO RIO SÃO JOÃO	31
FIGURA 6 – GRÁFICOS DO COMPORTAMENTO DA TEMPERATURA DO RIO SÃO JOÃO AO LONGO DE QUATRO DIAS DISTINTOS; UM NO MÊS DE JANEIRO (15/01/2016), ABRIL (15/04/2016), AGOSTO (29/08/2016) E OUTUBRO (15/10/2016)	37
FIGURA 7 – MÉDIAS DIÁRIAS DOS DADOS REFERENTES À TEMPERATURA, VENTO, RADIAÇÃO E UMIDADE AO LONGO DO PERÍODO ESTUDADO.	39
FIGURA 8 – ROSA DOS VENTOS REPRESENTANDO O COMPORTAMENTO DO VENTO NA REGIÃO	41
FIGURA 9 – TEMPERATURA DO RIO SÃO JOÃO AO LONGO DO PERÍODO DE AGOSTO DE 2015 ATÉ OUTUBRO DE 2016.....	42
FIGURA 10 – MÉDIAS DIÁRIAS DA TEMPERATURA DO RIO SÃO JOÃO E DA ESTAÇÃO METEOROLÓGICA AO LONGO DO PERÍODO ESTUDADO	43
FIGURA 11 – GRÁFICO DO MÉTODO DE REGRESSÃO LINEAR ENTRE A TEMPERATURA DO RIO SÃO JOÃO - ESTAÇÃO SÃO JOÃO - E DO AR - ESTAÇÃO METEOROLÓGICA.....	44
FIGURA 12 – GRÁFICO DO MÉTODO DE REGRESSÃO LINEAR ENTRE AS MÉDIAS MÓVEIS SEMANAIS DA TEMPERATURA DO RIO SÃO JOÃO E DA TEMPERATURA DO AR	45
FIGURA 13 – GRÁFICO DO MÉTODO DE REGRESSÃO NÃO-LINEAR (EXPONENCIAL) ENTRE AS MÉDIAS DIÁRIAS DA TEMPERATURA DO RIO SÃO JOÃO E DA TEMPERATURA DO AR.....	47
FIGURA 14 – GRÁFICO DO MÉTODO DE REGRESSÃO NÃO-LINEAR (EXPONENCIAL) ENTRE AS MÉDIAS MÓVEIS SEMANAIS DA TEMPERATURA DO RIO SÃO JOÃO E DA TEMPERATURA DO AR	47

FIGURA 15 – GRÁFICO DO MÉTODO DE REGRESSÃO LINEAR ENTRE AS MÉDIAS DIÁRIAS DA TEMPERATURA DO RIO SÃO JOÃO E DA TEMPERATURA DE EQUILÍBRIO	50
FIGURA 16 – GRÁFICO DO MÉTODO DE REGRESSÃO LINEAR ENTRE AS MÉDIAS MÓVEIS SEMANAIS DA TEMPERATURA DO RIO SÃO JOÃO E DA TEMPERATURA DE EQUILÍBRIO	50
FIGURA 17 – GRÁFICO REPRESENTANDO O ERRO DOS AJUSTES PARA A REGRESSÃO LINEAR, A REGRESSÃO NÃO-LINEAR E A TEMPERATURA DE EQUILÍBRIO, COM BASE NOS VALORES DE MÉDIAS DIÁRIAS DE TEMPERATURA.....	52
FIGURA 18 – GRÁFICO REPRESENTANDO O ERRO DOS AJUSTES PARA A REGRESSÃO LINEAR, A REGRESSÃO NÃO-LINEAR E A TEMPERATURA DE EQUILÍBRIO, COM BASE NOS VALORES DE MÉDIAS MÓVEIS SEMANAIS DE TEMPERATURA.....	53
FIGURA 19 – GRÁFICO DOS VALORES DAS MÉDIAS DIÁRIAS DE TEMPERATURA DA ESTAÇÃO METEOROLÓGICA DO MUNICÍPIO DE TIJUCAS DO SUL E DA CIDADE DE CURITIBA DE OUTUBRO DE 2015 ATÉ FEVEREIRO DE 2016	61
FIGURA 20 – GRÁFICO DOS VALORES DAS MÉDIAS DIÁRIAS DE TEMPERATURA DA ESTAÇÃO METEOROLÓGICA DO MUNICÍPIO DE TIJUCAS DO SUL E DA CIDADE DE CURITIBA DE OUTUBRO DE 2015 ATÉ FEVEREIRO DE 2016.....	62

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – RESUMO DOS MODELOS ESTATÍSTICOS.....	26
TABELA 2 – SÍNTESE DE MODELOS PESQUISADOS COM SEUS RESPECTIVOS AUTORES, LOCAIS DE ESTUDO E ESCALA TEMPORAL.....	28
TABELA 3 – DESCRIÇÃO DOS SENSORES DA ESTAÇÃO METEOROLÓGICA .	30
TABELA 4 – VALORES DE TEMPERATURA MÁXIMA E MÍNIMA E DE VARIÂNCIAS DE AMBAS PARA CADA DIA ESCOLHIDO	38
TABELA 5 – VALOR DO EQM, RESPECTIVAS EQUAÇÕES E COEFICIENTES DE DETERMINAÇÃO DA REGRESSÃO LINEAR UTILIZANDO MÉDIAS DIÁRIAS E MÉDIAS MÓVEIS SEMANAIS.....	46
TABELA 6 – VALORES DOS COEFICIENTES OBTIDOS A PARTIR DA REGRESSÃO NÃO-LINEAR APLICADA PARA MÉDIAS DIÁRIAS E MÉDIAS MÓVEIS SEMANAIS	48
TABELA 7 – VALOR DO EQM, RESPECTIVAS EQUAÇÕES E COEFICIENTES DE DETERMINAÇÃO DA REGRESSÃO NÃO-LINEAR UTILIZANDO MÉDIAS DIÁRIAS E MÉDIAS MÓVEIS SEMANAIS.....	48
TABELA 8 – VALOR DO EQM, RESPECTIVAS EQUAÇÕES E COEFICIENTES DE DETERMINAÇÃO DA REGRESSÃO LINEAR UTILIZANDO MÉDIAS DIÁRIAS E MÉDIAS MÓVEIS SEMANAIS DO MODELO DE TEMPERATURA DE EQUILÍRIO.	51

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 OBJETIVO GERAL	14
2.1 OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	14
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
3.1 TEMPERATURA	15
3.2 TEMPERATURA DE EQUILÍBRIO.....	16
3.3 PROCESSOS FÍSICOS DE TROCA DE CALOR.....	16
3.3.1 Convecção	17
3.3.2 Condução	18
3.3.3 Radiação	18
3.3.3.1 Radiação emitida por um corpo.....	18
3.3.3.2 Radiação recebida por um corpo	19
3.3.4 Evaporação.....	19
3.3.5 Efeitos do sombreamento e cobertura vegetal.....	19
3.4 RELAÇÃO ENTRE TEMPERATURA DA ÁGUA E TEMPERATURA DO AR	20
3.5 MODELOS QUE CORRELACIONAM A TEMPERATURA DA ÁGUA COMO FUNÇÃO DA TEMPERATURA DO AR	21
3.5.1 Modelos Determinísticos	22
3.5.2 Modelos Estatísticos.....	22
3.5.2.1 Modelos Estatísticos Paramétricos	23
3.5.2.1.1 Modelos Regressivos	23
3.5.2.1.2 Modelos Auto-Regressivos.....	24
3.5.2.1.3 Modelos Auto-Regressivos Periódicos	25
3.5.2.1.4 Modelos Estatísticos Não-Paramétricos.....	25
3.6 MODELOS EM DESTAQUE.....	26
4 MATERIAIS E MÉTODOS	29
4.1 MEDIÇÕES E LOCAL DE ESTUDO	29
4.2 MODELO DE TEMPERATURA DE EQUILÍBRIO	32
4.3 REGRESSÃO LINEAR E NÃO-LINEAR.....	36
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
5.1 DADOS METEOROLÓGICOS.....	38
5.2 TEMPERATURA DA ÁGUA.....	41

5.3 TEMPERATURA DO AR E TEMPERATURA DA ÁGUA.....	42
5.3.1 Regressão linear.....	44
5.3.2 Regressão não-linear.....	46
5.3.3 Temperatura de Equilíbrio.....	49
5.4 COMPARAÇÃO DOS AJUSTES FORNECIDOS PELAS EQUAÇÕES.....	51
6 CONCLUSÃO.....	54
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	57
APÊNDICE A.....	61

1 INTRODUÇÃO

A temperatura é uma variável física que influencia na qualidade da água de um corpo hídrico, nos processos químicos, biológicos e na biodiversidade do ecossistema. O aquecimento das águas pode estar relacionado a fatores naturais ou antropogênicos.

O interesse em determinar a temperatura decorre da necessidade de fornecer informações sobre as perdas por evaporação, os padrões de fluxo de ar, estratificação térmica, as operações de pesca, entre outros. A necessidade de previsão da temperatura da água está sendo cada vez maior também na área de gestão de qualidade da água, na qual a temperatura destaca-se como um dos parâmetros mais importantes e amplamente medidos. Muitas propriedades físicas da água são funções de temperatura (KOTHANDARAMAN e EVANS, 1972).

Para os seres vivos presentes no corpo d'água a temperatura está diretamente associada ao crescimento, sobrevivência e migração por isso, compreender como é o perfil térmico de um determinado ambiente aquático auxilia na gestão dos recursos hídricos daquela região, como também na própria atividade de pesca, em locais onde a mesma é permitida (LARNIER *et. al.*, 2010).

Valores paramétricos de um modelo matemático para prever a temperatura da água a partir de registros de temperatura do ar são fixos de ano para ano. A relação ar-água tende a ser linear estacionária, dessa forma é possível fazer uma previsão das temperaturas da água, a partir dos registros das temperaturas do ar em um determinado local (KOTHANDARAMAN e EVANS, 1972).

Os modelos de temperatura da água são classificados em dois grupos: modelos determinísticos e estatísticos. A abordagem estatística prevê a temperatura da água relacionando-a com parâmetros meteorológicos relevantes enquanto os modelos determinísticos consideram os efeitos dos processos físicos de transferência de calor cujas forçantes são variáveis meteorológicas. Se todos os fluxos de calor são considerados, os modelos determinísticos podem se tornar mais complexos e, tal abordagem requer muitos dados meteorológicos e hidrológicos que nem sempre são facilmente obtidos. Uma alternativa à estatística e aos modelos determinísticos é o modelo de temperatura de

equilíbrio, cuja abordagem primeiramente foi desenvolvida para simplificar a expressão do fluxo de calor total. Esse fluxo para a superfície é assumido como proporcional à diferença entre a temperatura da água e uma temperatura de equilíbrio (HERBERT *et. al.*, 2015).

Medir a temperatura de um rio não é uma atividade fácil ou até muito comum, exige aparelhagem específica, há risco de oxidação, enquanto que medir a temperatura do ar, por sua vez, é mais simples e prático. Desse modo, juntamente com a compreensão do perfil de temperatura no corpo hídrico, uma modelagem matemática relacionando as temperaturas do ar e da água pode ser crucial e necessária para prever futuras temperaturas, tornando assim possível a tomada de medidas preventivas para manter ou restaurar as condições do habitat natural ideal para as espécies ali presentes, garantindo a biodiversidade local (LARNIER *et. al.*, 2010).

2 OBJETIVO GERAL

Determinar relações entre a temperatura da água e variáveis meteorológicas para o Rio São João.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar a consistência dos dados coletados pela estação meteorológica: temperatura, radiação e umidade relativa.
- Determinar a relação entre a temperatura da água do rio e a temperatura do ar.
- Determinar a relação entre a temperatura da água do rio e a temperatura de equilíbrio obtida por meio das variáveis meteorológicas locais.
- Ajustar equações empíricas aos dados correlacionados e determinar métricas de ajuste.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 TEMPERATURA

A temperatura é uma grandeza física que está relacionada com a energia cinética das moléculas presentes em qualquer sistema. Quanto maior for a agitação das moléculas dos gases, maior será a temperatura do ar. A temperatura é um dos padrões, ou características organolépticas, de qualidade das águas, atrelada à sensibilidade dos organismos vivos, que tornam uma água atraente ou não para o consumo, assim como a transparência, sabor, odor e aparência (RAMALHO, 1997). Na análise das águas, a temperatura é um dos fatores físicos a ser determinado e, quando ocorre uma variação significativa da mesma no corpo hídrico pode-se ter poluição térmica.

Na água, a alteração térmica pode ter origem antropogênica como descarga de efluentes, desmatamentos e represamentos. Contudo, alterações na variação da temperatura podem ter sua origem natural, como é o caso de aumento de temperatura causado por variações sazonais, redução da vazão do corpo hídrico, cobertura de nuvens, vegetação e a própria radiação solar (PERCEBON *et. al.*, 2005).

A temperatura na água varia de formas diferentes em se tratando do perfil vertical de rios e reservatórios. Em rios a mesma tende a ser mais uniforme, enquanto que em reservatórios o perfil da temperatura tende a ser estratificado, determinando características da biodiversidade local. Processos biológicos e solubilidade de gases, como por exemplo a concentração de oxigênio dissolvido, bem como a taxa de decomposição da matéria orgânica sofrem influência direta da temperatura que, conseqüentemente, interfere na condição do habitat dos seres vivos ali presentes (EATON e SCHELLER, 1996).

O crescimento e reprodução de plantas e animais é afetado pela temperatura do ar bem como a temperatura da água, juntamente com a taxa de evaporação, umidade relativa, velocidade e direção do vento e padrões de precipitação. (Greenteg, 2015).

3.2 TEMPERATURA DE EQUILÍBRIO

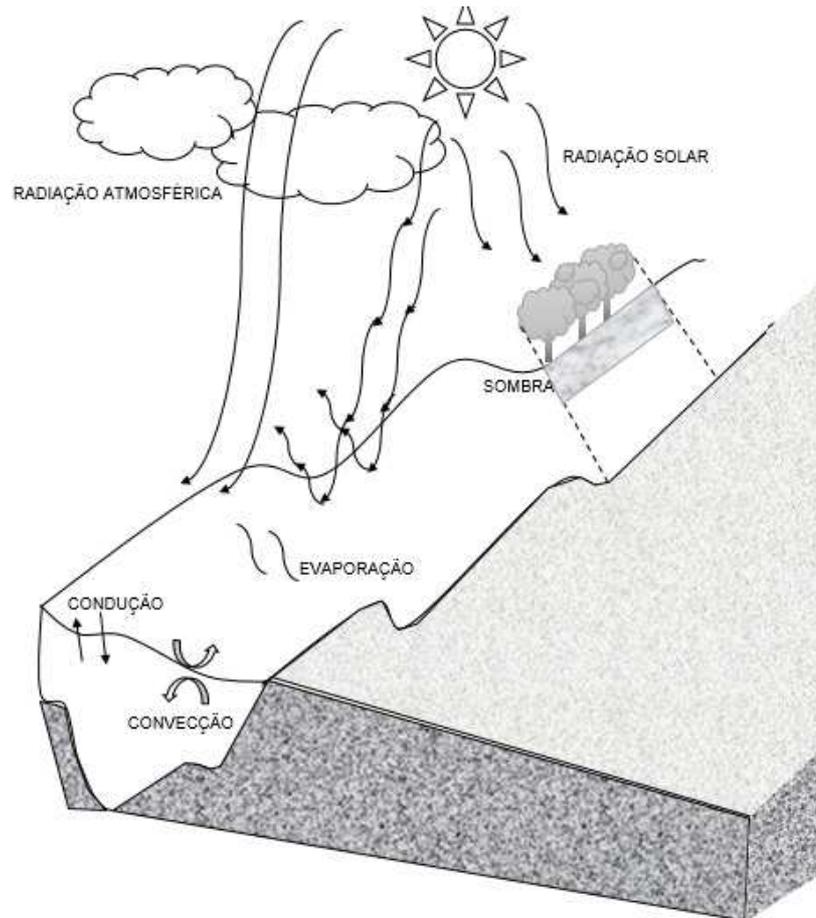
A temperatura de equilíbrio é a temperatura da água na qual a soma de todos os fluxos de calor através da superfície da água é a igual a zero, devido a um possível equilíbrio e, pode ser calculada a partir de dados meteorológicos (BOGAN *et. al.*, 2013).

A temperatura de equilíbrio é função de fluxos de energia na superfície da água, do tempo, do sombreamento e da velocidade do vento (BOGAN *et. al.*, 2013). Para estabelecer uma relação entre o fluxo de calor e a temperatura de equilíbrio, a temperatura de equilíbrio deve ser primeiro quantificada. Sinokrot e Stefan (1993) mostraram que o fluxo de calor entre a interface água – sedimento é insignificante para períodos de tempo mais longos do que um dia, de forma que pode ser desconsiderada nos cálculos.

3.3 PROCESSOS FÍSICOS DE TROCA DE CALOR

Distintos processos de transferência de calor (Figura 1) influenciam na temperatura da água como: convecção, condução, evaporação, radiação refletida da água, e da topográfica e radiação solar (onda curta). Dentre esses, a evaporação, a radiação refletida da água, a radiação atmosférica e a radiação solar representam mais de 90% do fluxo de calor em um rio. Nas subseções subsequentes são apresentados os processos de transferência de energia.

FIGURA 1 – REPRESENTAÇÃO DOS FLUXOS DE CALOR.



FONTE: ADAPTADO DE GREENTEG (2015).

3.3.1 Convecção

Convecção térmica é um mecanismo de transferência de energia que ocorre através de um fluido em movimento e é a forma predominante de transferência em líquidos e gases.

Convecção pode ser natural ou forçada. Quando um corpo quente é inserido em um ambiente frio, o processo natural ocorre de tal forma que há uma transferência de calor do corpo mais quente para o mais frio, até que o sistema entre em equilíbrio térmico. Próximo da superfície do corpo mais quente, o ar circundante vai expandir devido à temperatura mais elevada e assim, vai se mover para cima uma vez que é mais leve que o ar frio. Estas diferenças na densidade criam um fluxo que transporta o calor da superfície quente para o ambiente frio. Este processo é chamado de convecção natural. Quando o

movimento do fluido é aumentado chama-se convecção forçada (Marohasy, 2009).

3.3.2 Condução

É o método de calor que ocorre quando há um gradiente de temperatura através de um corpo. Assim, a energia é transferida a partir da região de maior temperatura para a região de menor temperatura, devido ao movimento molecular aleatório (difusão) (Greenteg, 2015).

3.3.3 Radiação

É o método menos eficiente de transferência de calor. Materiais irradiam energia térmica em quantidades determinadas pela temperatura, na qual a energia é transportada por fótons de luz nas faixas visível e infravermelho do espectro. Ou seja, o calor é transferido sem assistência de uma substância física.

A frequência de radiação é inversamente proporcional ao seu comprimento de onda (quanto mais curto o comprimento de onda, maior a energia), que é, por sua vez, inversamente proporcional à sua temperatura (em Kelvin) (Greenteg, 2015).

3.3.3.1 Radiação emitida por um corpo

Corpos com temperatura acima de 0 Kelvin, possuem movimento molecular e atômico e, conseqüentemente, emitem radiação eletromagnética.

Em se tratando de fator qualitativo, a emissão pode ter natureza ondulatória (dando-se por meio de ondas eletromagnéticas) ou de natureza corpuscular (dando-se por meio de partículas, os fótons).

3.3.3.2 Radiação recebida por um corpo

A energia radiante incidente em um corpo é em parte absorvida, refletida e transmitida. A energia incidente se divide nessas tres parcelas de acordo com algumas condições, se o corpo é opaco ou transparente à radiação, de condições de superfície, de massa e de transmissividade. A energia radiante absorvida por um corpo se transforma em calor, contribuindo para aumentar sua temperatura, no entanto as parcelas transmitidas e refletidas não sofrem mudança em seus comprimentos de onda. Chamam-se coeficientes de absorção, de reflexão e de transmissão os percentuais da energia total incidente que são, respectivamente, absorvidos, refletidos e transmitidos por um corpo (Greenteg, 2015).

3.3.4 Evaporação

A evaporação é um fenômeno que envolve a passagem de determinado material do estado líquido para o gasoso. Tal processo ocorre lentamente na superfície dos líquidos com a ascensão das massas d'água sob a forma de vapor.

O aumento da temperatura resulta em um aumento da energia cinética das moléculas, que por sua vez, passam a se movimentar mais rapidamente e é dessa forma que o processo de evaporação inicia (CORREA e GALVANI, 2012).

Por fim a temperatura do ar é altamente correlacionada com os componentes do fluxo de calor, incluindo a radiação solar e, conseqüentemente, a temperatura da água.

3.3.5 Efeitos do sombreamento e cobertura vegetal

Sombreamento (*shading*) e cobertura vegetal (*sheltering*), têm um forte efeito na temperatura da água e conseqüentemente, na temperatura de equilíbrio. Para estudos e aplicações, ambos são representados pelos seus respectivos coeficientes o de fator de cobertura, que variam de 0 a 1 (SINOKROT e STEFAN, 1993).

Quando um corpo d'água está completamente ou parcialmente sombreado, uma quantidade menor de radiação atinge a sua superfície. O sombreamento reduz diretamente a transferência de calor devido à radiação na água e, indiretamente, reduz a temperatura do ar que se encontra em cima do corpo d'água. Quanto maior o sombreamento na água, menor é a temperatura de equilíbrio (BOGAN *et. al.*, 2003).

A cobertura vegetal, por sua vez, também tem influência na temperatura do rio tendo em vista que a mesma reduz a velocidade do vento que chega ao corpo hídrico, dessa forma o fluxo de transferência de calor tanto por evaporação quanto o fluxo convectivo também reduzem. Quanto maior for o fator de cobertura, ou seja, quanto maior for a cobertura vegetal presente, menor será a velocidade do vento e, conseqüentemente, maior será a temperatura de equilíbrio (SINOKROT e STEFAN, 1993).

Estudos mostraram que a água é mais vulnerável a alterações de sombreamento do que alterações de cobertura vegetal (BOGAN *et. al.*, 2003).

3.4 RELAÇÃO ENTRE TEMPERATURA DA ÁGUA E TEMPERATURA DO AR

Caracteriza-se como importante prever a temperatura da água como fator contribuinte nos estudos relacionados ao meio ambiente em geral. Temperaturas mais altas podem ter relação com problemas de espécies aquáticas por isso, prever temperaturas no verão ou em até outra estação pode ser muito útil para desencadear planos ou ferramentas técnicas que restaurem no corpo d'água as condições aquáticas favoráveis (LARNIER *et. al.*, 2010).

Se houver um aumento na temperatura da água, a biota sofrerá conseqüências de crescimento, metabolismo, disponibilidade de alimentos, migração e reprodução.

Estudos anteriores analisam a tendência da temperatura da água. Por exemplo, Webb and Nobilis (1994, 1995, 1997) estudaram muitos fatores que podem afetar a temperatura das águas. Stefan *et. al.* (2001) projetou que a mortalidade de peixes durante o verão pode aumentar em até 30% devido ao aumento na concentração de dióxido de carbono (CO₂). Cooter and Cooter (1990) concluíram que mudanças no regime de vegetações, alteram o saldo de

radiação, aumentando a temperatura da água em até sete vezes, no sudeste dos Estados Unidos da América, sendo suficiente para causar uma queda significativa no oxigênio dissolvido no corpo d'água (MORRIL *et. al.*, 2005).

Relações empíricas entre o fluxo de ar e a temperatura da corrente são usadas para estimar o efeito que o aumento da temperatura do ar teria sobre a temperatura da água. Muitos outros fatores podem causar alterações, como já citados anteriormente (sombreamento, uso industrial humano, precipitação, escoamento superficial, água subterrânea), bem como o aquecimento por troca de calor na interface água/ar (MORRIL *et. al.*, 2005).

Para estimar a correlação entre a temperatura da água e a temperatura do ar, muitos modelos têm sido desenvolvidos e utilizados. Estes modelos são frequentemente categorizados em dois grupos: modelos determinísticos e modelos estatísticos (LARNIER *et. al.*, 2010). Os modelos determinísticos requerem maior número de dados de entrada (profundidade, quantidade de sombreamento, velocidade do vento), logo são mais adequados para analisar diferentes impactos devido aos efeitos antropogênicos como a presença de reservatórios, poluição térmica e desmatamento. Em contrapartida, a principal vantagem dos modelos estatísticos é a baixa exigência de dados (BENYAHYA *et. al.*, 2007). Modelos de regressão linear e não-linear são amplamente utilizados para escalas de tempo mais curtas como semanas ou meses, contando com a forte relação entre o ar e a temperatura da água nessas pequenas escalas de tempo (LARNIER *et. al.*, 2010).

3.5 MODELOS QUE CORRELACIONAM A TEMPERATURA DA ÁGUA COMO FUNÇÃO DA TEMPERATURA DO AR

Diferentes modelos têm sido desenvolvidos com o propósito de prever a temperatura da água do rio. Classificados em duas categorias principais, estatísticos e determinísticos, cada qual tem vantagens e desvantagens em aplicações específicas.

3.5.1 Modelos Determinísticos

Os modelos determinísticos são baseados em uma representação matemática de troca de calor entre o rio e o ambiente. Tais modelos necessitam de uma entrada de diversos dados incluindo a geometria do córrego, características do fluxo, profundidade da água, quantidade de sombreamento e o vento (BENYAHYA *et. al.*, 2007).

São ferramentas eficientes quando há interesse em simular componentes do balanço de calor. Sendo assim, são eficazes na análise e comparação de efeitos causados por ação antropogênica (presença de reservatórios, poluição térmica, desmatamento). Por exemplo, esses modelos têm sido utilizados para entender e prever impactos florestais das temperaturas devido ao desmatamento ou a remoção de vegetação ciliar (BROWN, 1970). Modelos determinísticos também são bem adaptados para estudar os impactos de redução de fluxo e/ou alteração de fluxo no regime térmico do rio (MOHSENI e STEFAN, 1999).

3.5.2 Modelos Estatísticos

Uma abordagem alternativa para determinação da temperatura da água são os modelos estatísticos. Sua principal vantagem é que a exigência de dados de entrada é mínima. Modelos estatísticos podem ser classificados em duas categorias: modelos paramétricos e não paramétricos. E ainda, dentro dos modelos paramétricos existem os modelos de regressão e modelos estocásticos (BENYAHYA *et. al.*, 2007).

Os modelos de regressão são aplicados para prever ou simular a temperatura da água em um espaço de tempo semanal, mensal ou anual, tendo uma alta relação entre a temperatura do ar e da água para essas escalas de tempo. Essa relação é significativa uma vez que ambas as temperaturas dependem da radiação solar.

Quando os modelos são utilizados para escalas menores de tempo, a regressão linear ou não-linear é mais difícil de ser aplicada devido à auto correlação da temperatura da água para essas escalas de tempo. Então, para

escalas temporais menores, como as escalas diárias, os modelos estocásticos são mais utilizados (LARNIER *et. al.*, 2010).

Apesar de os modelos estocásticos oferecerem uma simulação ou previsão simples da temperatura da água, outros modelos estatísticos, como os paramétricos e não-paramétricos, são muito fiéis e representam adequadamente a temperatura da água. Modelos não-paramétricos não tem a sua estrutura especificada a priori, a mesma é determinada a partir de dados (BENYAHYA *et. al.*, 2007).

3.5.2.1 Modelos Estatísticos Paramétricos

3.5.2.1.1 Modelos Regressivos

Modelos de regressão simples têm sido utilizados para modelar a temperatura da água como função de uma ou mais variáveis independentes (geralmente do ar).

A estrutura desses modelos são da seguinte forma:

$$T_w(t) = a_0 + a_1 T_a(t) + \xi(t) \quad (1)$$

onde, $T_w(t)$ é a temperatura da água em um determinado período, $T_a(t)$ é a temperatura do ar para o mesmo período, a_0 e a_1 são coeficientes da regressão e $\xi(t)$ é o termo do erro (BENYAHYA *et. al.*, 2008).

Esse modelo de regressão linear foi utilizado e aplicado por muitos autores. Stefan e Preud'homme (1993) demonstrou que a relação da temperatura do ar com a da água torna-se menos dispersa com o aumento de no intervalo dos dados.

A maioria desses estudos reconhece a existência do termo do erro, mas poucos discutem a sua importância e características. A alta sazonalidade existente na temperatura da água pode ser a razão da existencia do erro, especialmente quando a regressão linear é utilizada para modelar temperaturas em pequenos intervalos de tempo. A importância desse efeito de sazonalidade foi enfatizado por Lagan *et al.* (2001), que mostrou que a relação linear entre a temperatura da água e do ar é melhor durante períodos de verão. A relação linear

entre as temperaturas ainda é questionada e já foram encontradas relações não-lineares para períodos semanais (LARRIER *et. al.*, 2010).

Dentro da categoria de modelos de regressão, existem dois que são mais utilizados. A equação de regressão não linear (exponencial) (Equação 2), que tem como vantagem conseguir representar melhor a tendência de temperatura do corpo d'água (MORRILL *et. al.*, 2005).

$$T_s = \mu + \frac{\alpha - \mu}{1 + e^{\gamma(\beta - T_a)}} \quad (2)$$

Onde T_s é a temperatura da água estimada e T_a é a medida da temperatura do ar durante o período desejado. Há quatro parâmetros, μ que é a temperatura mínima da água, α que é a temperatura máxima da água, γ é função do ponto de inclinação mais acentuada da função T_s (quando plotada com T_a) e β a temperatura do ar nesse mesmo ponto (MORRILL *et. al.*, 2005).

Outro modelo é o de regressão linear, considerado um dos mais simples por Neumann *et. al.*, (2003) e tem a seguinte forma:

$$T = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n \quad (3)$$

Onde T é a temperatura da corrente de água, a_0, a_1, \dots, a_n são coeficientes da regressão linear e x_1, x_2, \dots, x_n os termos independentes.

3.5.2.1.2 Modelos Auto-Regressivos (AR)

Alguns modelos auto-regressivos são intitulados estocásticos. Nessa abordagem, as séries de tempo da temperatura da água são divididos em duas componentes, componente de “longa duração” anual (variação sazonal) e as variações de curto prazo (residual). Os modelos dessas séries temporais são ajustados para as variações residuais, uma vez que as de longa duração são removidas (LARNIER *et. al.*, 2010).

A variação sazonal pode ser modelada a partir de uma análise de uma uma série de Fourier ou até por uma função senoidal. Um exemplo de equação utilizando a função senoidal é:

$$T_{w_{sazonal}}(t) = a + b \sin \left[\frac{2\pi(t+t_0)}{365} \right] + \xi(t) \quad (4)$$

onde $T_{w_{sazonal}}(t)$ é o termo sazonal da temperatura; a , b e t_0 são coeficientes que podem ser estimados usando uma regressão não-linear; e $\xi(t)$ é o termo de erro (BENYAHYA *et. al.*, 2008).

Modelos estocásticos requerem poucos parâmetros e, portanto, sua aplicação é mais simples. Porém, a função senoidal necessita ser determinada para a série temporal, assim, podendo resultar em um termo residual de ano para ano (BENYAHYA *et. al.*, 2008).

3.5.2.1.3 Modelos Auto-Regressivos Periódicos

São utilizados para prever séries temporais econômicas bem como no domínio da hidrologia. São utilizadas para séries temporais de intervalos mensais ou de até 12 intervalos de tempo (BENYAHYA *et. al.*, 2008).

Também podem ser adaptados para dados semanais tendo um bom desempenho. No entanto, requerem estimativa de um grande número de parâmetros.

3.5.2.1.4 Modelos Estatísticos Não-Paramétricos

Os modelos não-paramétricos são a segunda categoria principal dos modelos estatísticos. Esses modelos são altamente dependentes de dados disponíveis e seu uso é limitado a valores encontrados no passado. No entanto, com o avanço computacional foi possível implementar esses modelos com facilidade. Dois modelos têm sido adaptados para modelar da temperatura da água: Artificial Neural Networks (ANN)/ Redes Neurais Artificiais e k-Nearest Neighbours (k-NN)/ Método Algorítmico do Vizinho Mais Próximo (BENYAHYA *et. al.*, 2008).

O modelo ANN consiste em uma estrutura matemática capaz de descrever relações não-lineares complexas entre dados de entrada e dados de saída. Na hidrologia, é usado para inúmeros propósitos, em particular, são

aplicados para modelos de qualidade da água. Conrads e Roehl (1999) utilizou esse modelo para simular a salinidade, temperatura e oxigênio dissolvido.

O modelo k-NN consiste em achar, para um valor determinado em um certo tempo, valores vizinhos que se aproximem e assim, fazer previsões baseadas nesses valores vizinhos. É um método que tem sido utilizado em hidrologia para modelar processos relacionando chuva e vazão (BENYAHYA *et. al.*, 2008).

A Tabela 1 apresenta um resumo dos modelos estatísticos juntamente com as respectivas vantagens e desvantagens na sua utilização de acordo com as escalas temporais e dados utilizados.

TABELA 1 – RESUMO DOS MODELOS ESTATÍSTICOS

MODELO	VANTAGENS	DESVANTAGENS
Regressão Linear	Simple aplicação	Não é apropriada quando uma relação linear não é encontrada
Função Logística	Quando uma relação não linear é observada	Não recomendada para estudos com séries temporais diárias
Modelo Estocástico	Para séries temporais diárias e é adequado para modelar termos residuais	Utilizado apenas para resíduos estacionários; sem variações temporais
Modelo Auto-Regressivo Periódico	Encontra uma autocorrelação periódica em séries temporais periódicas	Necessidade de muitos parâmetros
ANN	Não há necessidade de relações estatísticas	Modelo mais demorado para rodar
k-NN	Capaz fazer relações não lineares entre variáveis complexas de entrada e de saída	Não fornece uma função matemática convencional nem uma interpretação física

FONTE: adaptado de BENYAHYA *et. al.* (2007, p. 188).

3.6 MODELOS EM DESTAQUE

A Tabela 2 mostra alguns modelos de relação entre a temperatura do ar e da água juntamente com seus respectivos autores e locais de estudo. A partir da análise da mesma é possível perceber uma tendência para a regressão linear, uma vez que, quando é observada uma relação linear entre os dados, essa metodologia é, além de simples, eficiente. Quanto à escala temporal da

regressão linear, observa-se uma preferência por escalas diárias e semanais, pois, quando esse modelo é utilizado para escalas temporais menores, como as horárias, há uma auto correlação da temperatura da água, dificultando a sua aplicação.

Nota-se uma redução na quantidade de estudos utilizando a regressão não-linear tendo em vista que, essa utiliza uma quantidade maior de parâmetros, tornando-se mais complexa apesar de conseguir representar melhor a tendência da temperatura do corpo d'água. Segundo os estudos consultados e a própria Tabela 1, essa regressão não traz resultados vantajosos quando utilizada em escalas de tempo diárias, ou até menores como as horárias, por isso há uma tendência para escalas temporais semanais.

O método que envolve a temperatura de equilíbrio é o que demanda maior nível de complexidade uma vez que envolve uma grande quantidade de variáveis que precisam ser medidas e controladas, sendo essa uma das razões de ter poucas referências de sua utilização na literatura.

Por fim, em termos gerais, escalas temporais semanais foram mais aplicadas e utilizadas em modelos tendo em vista que, escalas horárias e diárias, podem não ter variações tão significativas pois fornecem dados muito próximos entre si quando utilizados em modelos de temperatura do ar e da água. Por outro lado, escalas mensais trazem médias que podem estar desconsiderando alterações importantes em escalas intermediárias.

TABELA 2 – SÍNTESE DE MODELOS PESQUISADOS COM SEUS RESPECTIVOS AUTORES, LOCAIS DE ESTUDO E ESCALA TEMPORAL.

MODELO	AUTORES	LOCAL DE ESTUDO	ESCALA TEMPORAL			
			Horário	Diário	Semanal	Mensal
Regressão Linear	Crisp and Howson (1982)	Reino Unido		X	X	
	Stefan and Preud'homme (1993)	Mississippi - EUA	X	X	X	
	Morril <i>et al.</i> (2005)	Delitzsch - Alemanha			X	
	Webb and Walling (1993)	Reino Unido				X
	Webb and Nobilis (1994)	Austria				X
	Erickson and Stefan (1996)	Oklahoma - EUA		X	X	X
	Pilgrim <i>et al.</i> (1998)	Minnesota - EUA		X	X	X
	Kashiwagi M. and Prochaska T.(2007)	Maryland - EUA			X	
	Morril <i>et al.</i> (2005)	Massachusetts - EUA			X	
	Ozaki <i>et al.</i> (2003)	Japão		X	X	
	O'Driscoll and DeWalle (2006)	Pensilvânia - EUA			X	
	Duchame (2008)	França				X
Regressão Não-Linear (Exponencial)	Mohseni <i>et al.</i> (1998)	EUA			X	
	Morril <i>et al.</i> (2005)	Delitzsch - Alemanha			X	
	Mantua <i>et al.</i> (2010)	Noroeste Pacífico - EUA			X	
	Kelleher <i>et al.</i> (2012)	Pensilvânia - EUA		X	X	
Temperatura de Equilíbrio	Hérbert C. <i>et al.</i> (2015)	Nova Brunswick - Canadá	X			
	Toffolon M. and Piccolroaz S. (2015)	Sion - Suíça		X		
	Bogan <i>et al.</i> (2013)	EUA			X	

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 MEDIÇÕES E LOCAL DE ESTUDO

As medições foram realizadas no Rio São João, rio este pertencente a bacia litorânea do Paraná que tem suas nascentes na Serra do Mar no município de Tijucas do Sul (Paraná) e desemboca no Oceano Atlântico, na cidade de Guaratuba.

O monitoramento da temperatura da água foi realizado pelos sensores de temperatura LM 35. Tais sensores são de baixo custo e foram calibrados em laboratório utilizando um termômetro de mercúrio de resolução de 0,01°C e estavam localizados à margem do Rio São João.

A estação meteorológica está instalada na Associação dos Professores da Universidade Federal do Paraná (APUFPR), localizada no município de Tijucas do Sul, no estado do Paraná (Figura 2). Os sensores da estação mediram as variáveis do modelo (Tabela 3).

FIGURA 2– ESTAÇÃO METEOROLÓGICA NO RESERVATÓRIO VOSSOROCA.

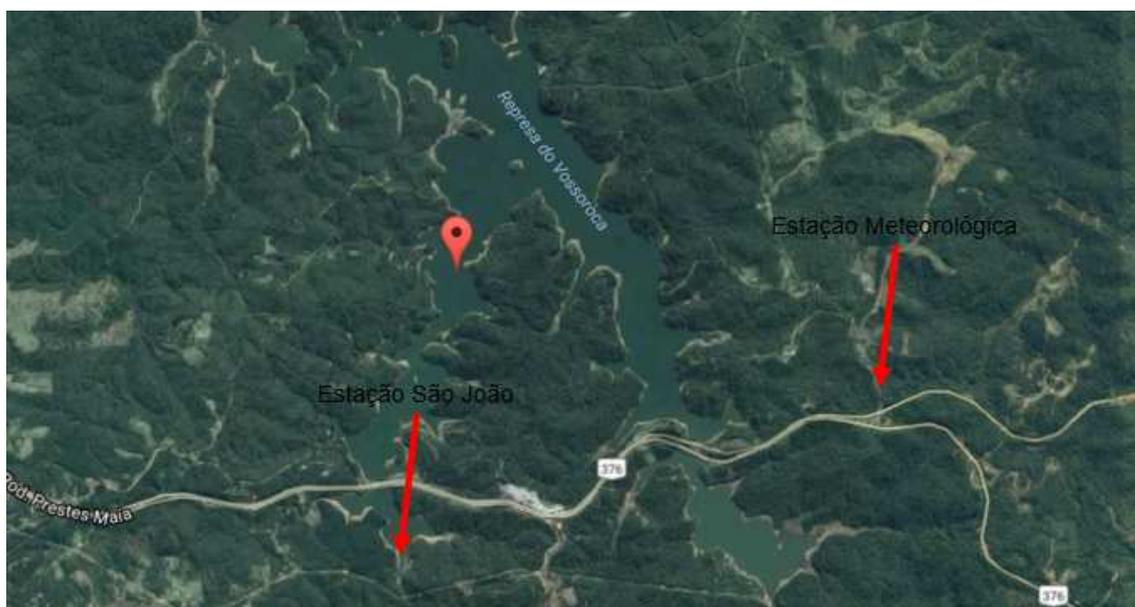


TABELA 3 – DESCRIÇÃO DOS SENSORES DA ESTAÇÃO METEOROLÓGICA.

VARIÁVEL	EQUIPAMENTO	MARCA	PRECISÃO-RESOLUÇÃO	COMUNICAÇÃO
Temperatura	Thermistor Temperature Probe - H 377	Water Log	$\pm 0,2^{\circ}\text{C} - 0,1^{\circ}\text{C}$	Analógico (0 - 5 V)
Radiação	CMP3-L Pyranometer	Campbell Scientific	$\pm 5\% - 1\text{W}/\text{m}^2$	Analógico (0 - 15 mV)
Umidade Relativa	HygroClip S3	Rotronic	$\pm 1\%\text{RH} - 0,02\%\text{RH}$ $\pm 0,2^{\circ}\text{C} - 0,06^{\circ}\text{C}$	Analógico (0 - 5 V)

FONTE: MANNICH (2013).

FIGURA 3 – IMAGEM DE SATÉLITE DA AREA DE ESTUDO.

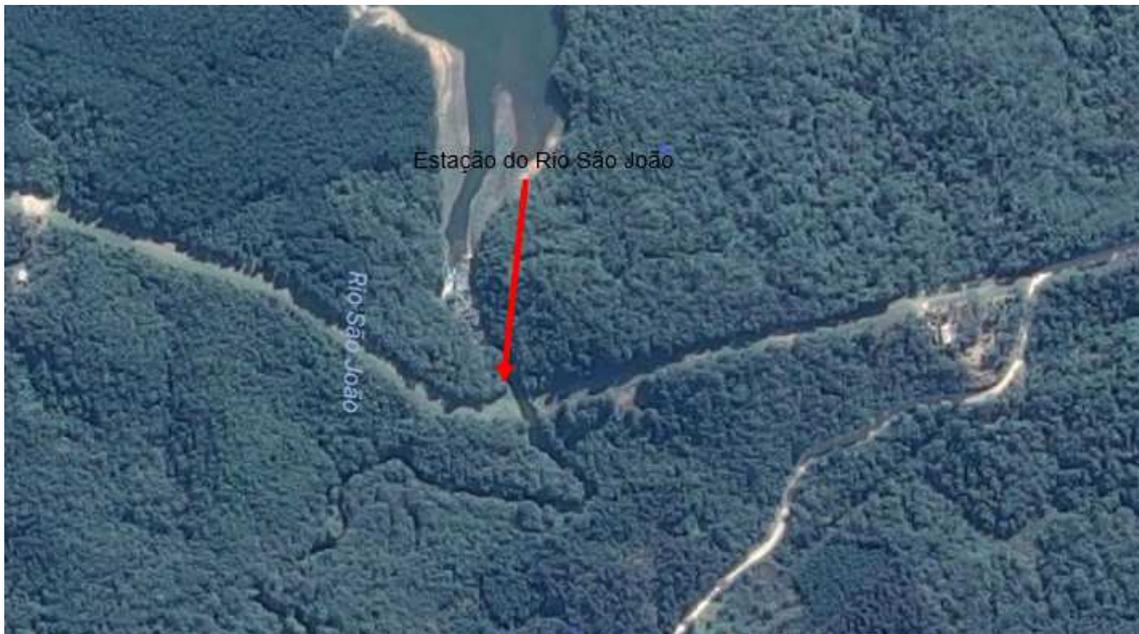


FONTE: GOOGLE EARTH (2016).

A partir da Figura 3, nota-se que a Estação São João e a Estação Meteorológica não estão localizadas a uma distância pequena entre si, porém, o resultado da Estação Meteorológica pode ser considerado o mesmo nas proximidades da estação do rio em questão, uma vez que a temperatura do ar não sofre grandes variações quando comparado com a estação do SIMEPAR na

cidade de Curitiba (Apêndice A), que está localizada a uma distância maior do que o rio em relação à estação meteorológica.

FIGURA 4 – IMAGEM DE SATÉLITE DA ÁREA DE ESTUDO.



FONTE: GOOGLE EARTH (2016).

FIGURA 5 – IMAGEM DO LOCAL DE ESTUDO ONDE ESTÁ INSTALADA A ESTAÇÃO DE MEDIÇÃO DE TEMPERATURA DO RIO SÃO JOÃO



4.2 MODELO DE TEMPERATURA DE EQUILÍBRIO

Para estabelecer uma relação entre a temperatura da água e a temperatura de equilíbrio, primeiro deve-se calcular a temperatura de equilíbrio. Pela definição, a temperatura de equilíbrio é alcançada quando não há mais variação da quantidade líquida de calor na superfície da água (BOGAN *et. al.*, 2003). A temperatura da água também sofre influência do fluxo de calor por condução devido ao sedimento no fundo do corpo d'água. Contudo, Sinokrot e Stefan (1993) mostraram que esse fluxo de calor devido ao sedimento é considerado insignificante para escalas de tempo maiores que as diárias (BOGAN *et. al.*, 2003). Para calcular a temperatura de equilíbrio, a soma de todos os fluxos de calor ($\text{KJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$) através da superfície da água é igual a zero.

$$H_{ns} + H_{la} - H_{lw} - H_e + H_c + H_p = 0 \quad (5)$$

Da esquerda para a direita os termos da Equação (5) são respectivamente, radiação solar líquida, H_{ns} , radiação atmosférica de onda longa, H_{la} , radiação de onda longa emitida pela superfície da água, H_{lw} , fluxo de calor por evaporação, H_e , fluxo de calor convectivo H_c , e fluxo de calor devido à precipitação H_p (BOGAN *et. al.*, 2003). Neste cálculo, temperatura do ar, precipitação, radiação solar e velocidade do vento foram retirados dos dados da mesma estação meteorológica e foram dados de entrada para o cálculo da temperatura de equilíbrio.

O primeiro termo da Equação (5), a radiação solar líquida, é função da radiação solar incidente S ($\text{KJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$), fator de sombreamento da região M_{sh} , (o qual varia de 0 a 1), e o coeficiente albedo da superfície, α . Albedo varia ao longo do dia, com as estações do ano, latitude e cobertura das nuvens. Em média o mesmo varia de 0,06–0,12 para águas abertas. Neste estudo foi considerado o valor de 0,07 (BOGAN *et. al.*, 2003). Para o cálculo da temperatura de equilíbrio considera-se que a radiação solar, S , medida na estação meteorológica, é de um

alcance representativo, com exceção do efeito de sombreamento (BOGAN *et. al.*, 2003).

$$H_{ns} = S(1 - M_{sh})(1 - \alpha) \quad (6)$$

O segundo termo da Equação (5), a radiação atmosférica de onda longa é função da emissividade atmosférica ε_a , e da temperatura do ar, T_a (°C). O parâmetro σ é a constante de Stefan-Boltzmann ($4,899 \times 10^{-6} \text{ KJ m}^{-2} \text{ d}^{-1} \text{ K}^{-4}$) (BOGAN *et. al.*, 2003).

$$H_{la} = \varepsilon_a \sigma (T_a + 273)^4 \quad (7)$$

O termo ε_a é a emissividade da atmosfera que, dentre muitas parametrizações, uma delas a considera como dependente da cobertura de nuvens, também chamado de coeficiente de nebulosidade (C), e a pressão de vapor d'água e_a (KPa) (HENDERSON-SELLERS, 1986).

$$\varepsilon_a = 0,84 - (0,175 - 29,92 \cdot 10^{-6} e_a)(1 - C) + 2,693 \cdot 10^{-5} e_a \quad (8)$$

Para o presente estudo, o valor do coeficiente de nebulosidade utilizado foi 0,72 conforme o estudo realizado por Duarte (2004), que a partir da sua pesquisa e cálculos obteve esse valor como média anual para a cidade de Curitiba e, considerando a proximidade geográfica e similaridade climática (Apêndice A) entre Curitiba e o município de Tijucas do Sul, esse valor foi utilizado no presente estudo e foi constante para toda a série analisada.

A radiação de onda longa emitida pela superfície da água, o terceiro termo da equação 5, é função da emissividade da superfície da água, ε_w , considerada 0,97 (BRUTSAERT, 1991), e da temperatura da água, T_s (°C) (BOGAN *et. al.*, 2003).

$$H_{lw} = \varepsilon_w \sigma (T_s + 273)^4 \quad (9)$$

O fluxo de calor por evaporação, o quarto termo da equação 5, pode ser expresso pela seguinte equação:

$$H_e = D_e U (e_s - e_d) (1 - N_{sh}) \quad (10)$$

Na Equação (10), D_e ($\text{KJ m}^{-3} \text{kPa}^{-1}$) é um coeficiente da transferência de calor por evaporação, U (m d^{-1}) é a velocidade do vento medida ajustada para uma altura de 2 metros da superfície, e_s e e_d (kPa) são respectivamente a pressão de saturação de vapor em função da temperatura da água, T_s ($^{\circ}\text{C}$) e da temperatura de ponto de orvalho, T_d ($^{\circ}\text{C}$). N_{sh} , é o coeficiente de cobertura, similar ao coeficiente de sombreamento M_{sh} (BOGAN *et. al.*, 2003). Os coeficientes e_s e e_d foram calculados pelas seguintes equações:

$$e_s = 0,611 e^{\frac{17,3T_s}{(T_s-273)}} \quad (11)$$

$$e_d = 0,611 e^{\frac{17,3T_d}{(T_d-273)}} \quad (12)$$

O próximo termo da Equação (5), o fluxo convectivo de calor, pode ser estimado pela seguinte equação:

$$H_c = D_c U (T_a - T_s) (1 - N_{sh}) \quad (13)$$

Na Equação (13), D_c ($\text{KJ m}^{-3} \text{d}^{-1}$) é o coeficiente da transferência de calor por convecção. O coeficiente de difusão para a transferência de calor por evaporação e o coeficiente em massa de convecção, D_e e D_c , respectivamente, podem ser calculados utilizando a distribuição da camada limite da velocidade na superfície da água (BRUTSAERT, 1991). O processo natural de convecção

não está sendo considerado nesta fórmula, apenas a convecção forçada (BOGAN *et. al.*, 2003). Instabilidade atmosférica deve ser desconsiderada em uma escala diária. Sendo assim, médias diárias dos parâmetros podem ser utilizadas (BRUTSAERT,1991).

$$D_e = 0,622 \frac{l_v \rho_a k^2}{P (\ln \frac{z}{z_0})^2} \quad (14)$$

$$l_v = 2.501 - 2,361T_a \quad (15)$$

$$D_c = \left(\frac{100}{P}\right)^{0,285} \frac{\rho_a c_{pa} k^2}{(\ln \frac{z}{z_0})^2} \quad (16)$$

Nas Equações (14) e (16) P é a pressão barométrica (KPa), ρ_a é a densidade do ar (kg m^{-3}), k é a constante de Von Karman ($k=0,40$), c_{pa} ($\text{KJ kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$) é o calor específico do ar, z (m) é a elevação na qual a velocidade do vento, a temperatura do ar e a temperatura de ponto de orvalho foram medidas, e z_0 (m) é a superfície rugosa da água (BOGAN *et. al.*, 2003). Um valor típico de z_0 para a água é 0,04 cm (BRUTSAERT, 1991). O calor latente de vaporização, l_v (KJ kg^{-1}), pode ser aproximado como uma função da temperatura do ar, T_a ($^\circ\text{C}$), como mostra a Equação (15).

O último termo da Equação (5), o fluxo de transferência de calor devido à precipitação, é função da densidade da água ρ_w (kg m^{-3}), a capacidade calorífica da água, c_w ($\text{KJ kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$), a intensidade de precipitação I (m d^{-1}), a temperatura de ponto de orvalho, T_d ($^\circ\text{C}$), e a temperatura da água T_s ($^\circ\text{C}$) (BOGAN *et. al.*, 2003).

$$H_p = \rho_w c_w I (T_d - T_s) \quad (17)$$

Nas condições da temperatura de equilíbrio, a temperatura da água é igual à temperatura de equilíbrio; sendo assim, as radiações de onda longa emitidas pela superfície da água, o fluxo de transferência de calor por evaporação, o fluxo de calor por convecção e o fluxo de calor devido à precipitação na equação 5 são funções da temperatura de equilíbrio. Fazendo as devidas substituições na equação 5, obtemos uma equação não linear para a temperatura de equilíbrio., T_e .

$$S(1 - \alpha)(1 - M_{sh}) + \varepsilon_a \sigma (T_a + 273)^4 - \varepsilon_w \sigma (T_e + 273)^4 - D_e U (e_s - e_d)(1 - N_{sh}) + D_c U (T_a - T_e)(1 - N_{sh}) + \rho_w c_w I (T_d - T_e) = 0 \quad (18)$$

A Equação (18) foi resolvida de maneira iterativa até a convergência. Os valores dos coeficientes de sombreamento e de cobertura utilizados foram 0,82 e 0,07, respectivamente, para o cálculo utilizando médias diárias e 0,72 e 0,06, respectivamente, ao utilizar as médias móveis semanais (BOGAN *et. al.*, 2003). Parâmetros calculados e calibrados para valores de temperatura de equilíbrio superiores a 0 °C (BOGAN *et. al.*, 2003).

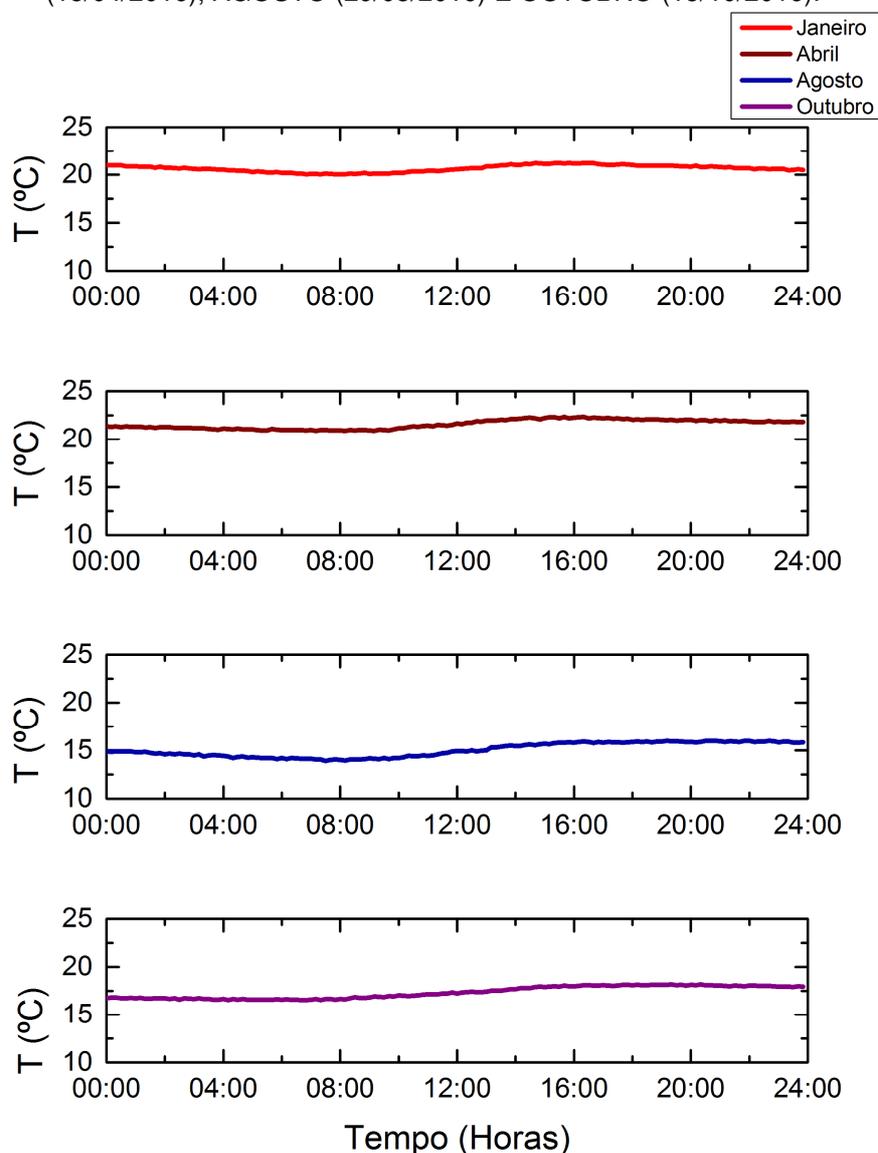
4.3 REGRESSÃO LINEAR E NÃO-LINEAR

Além do modelo de temperatura de equilíbrio, a regressão linear (Equação 3) e a regressão não-linear (Equação 2) foram utilizadas para relacionar as temperaturas do ar e da água. Os ajustes paramétricos foram realizados para cada regressão.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a realização do presente estudo, os dados brutos de temperatura da Estação do Rio São João e da Estação Meteorológica foram coletados, porém para o aprofundamento e utilização nas regressões e no modelo apresentados, as médias diárias foram utilizadas. A temperatura da água não sofre grande variação de amplitude ao longo de um dia, como mostra a Figura 6, portanto, a análise e o estudo da relação do comportamento da temperatura da água e da temperatura do ar foi feita utilizando médias diárias ao invés dos dados brutos.

FIGURA 6 – GRÁFICOS DO COMPORTAMENTO DA TEMPERATURA DO RIO SÃO JOÃO AO LONGO DE QUATRO DIAS DISTINTOS; UM NO MÊS DE JANEIRO (15/01/2016), ABRIL (15/04/2016), AGOSTO (29/08/2016) E OUTUBRO (15/10/2016).



A Figura 6 mostra a temperatura da água em quatro dias distintos, os quais estão inseridos cada um em diferentes estações do ano. O corpo d'água recebe radiação ao longo do dia e tende a ir aumentando a sua temperatura gradualmente, de tal forma que, ao anoitecer, o mesmo está mais aquecido. Ao longo da madrugada, a água vai perdendo calor para o ambiente, uma vez que não há mais fonte de radiação solar, fazendo com que ao amanhecer esteja mais fria. No período da manhã e da tarde o corpo d'água recebe radiação solar e começa a ocorrer novamente transferência de calor do ambiente para a água, que, por sua vez passa a ter um aumento na temperatura. Esse comportamento se repete ao longo dos dias e é presenciado em todas as estações do ano. No entanto, essa variação na amplitude da temperatura do corpo d'água não excede 2 °C (Tabela 4) ao longo do dia, por isso, a utilização de médias diárias foi mais efetiva para obter resultados significativos na relação entre as temperaturas do ar e da água.

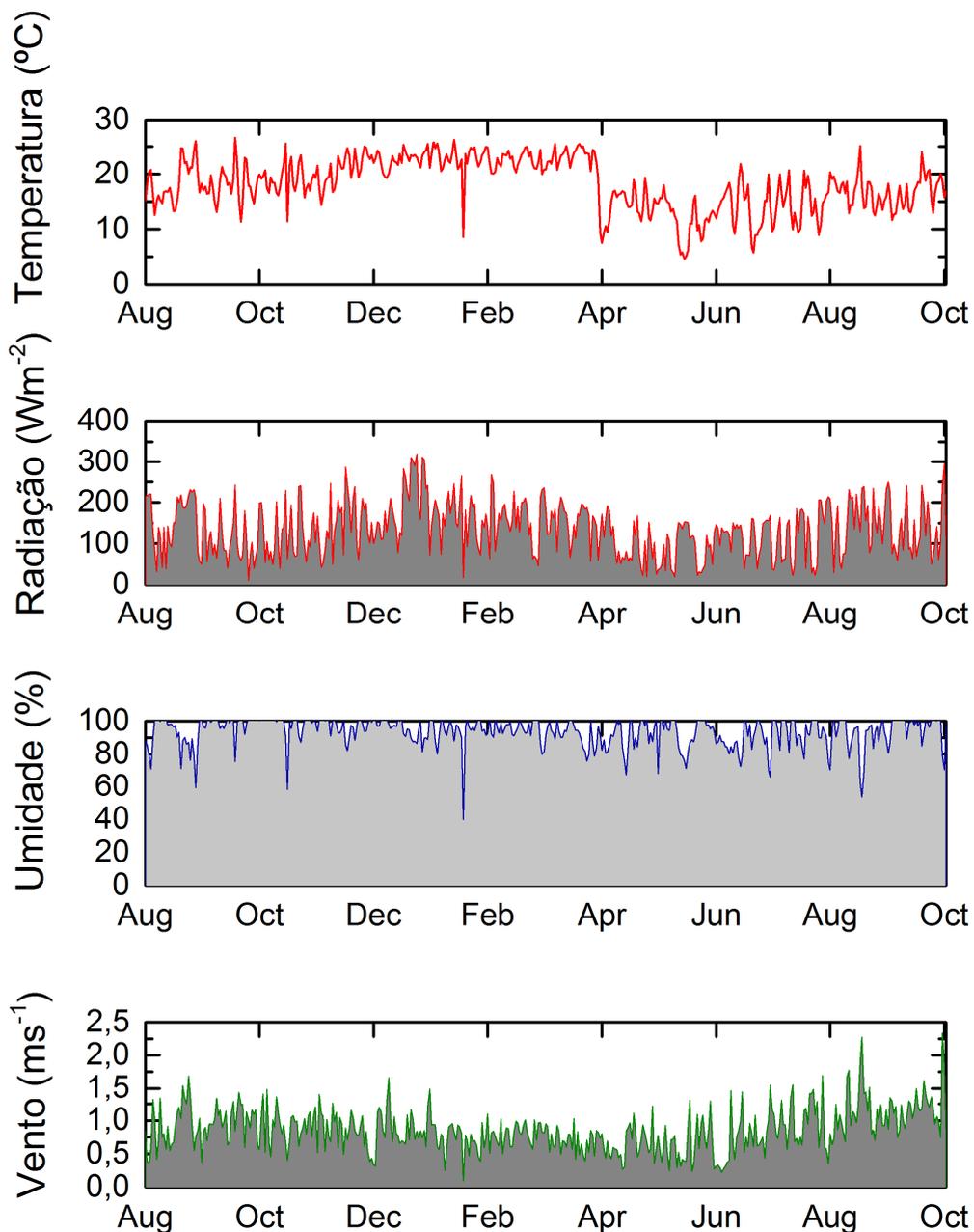
TABELA 4 – VALORES DE TEMPERATURA MÁXIMA E MÍNIMA E DE VARIÂNCIA ENTRE AMBAS PARA CADA DIA ESCOLHIDO.

Dia	15/01/2016	15/04/2016	29/08/2016	15/10/2016
Temperatura Máxima (°C)	21,24	22,34	15,89	18,18
Temperatura Mínima (°C)	20,04	20,91	13,91	16,58
Amplitude (°C)	1,20	1,43	1,98	1,60

5.1 DADOS METEOROLÓGICOS

Os dados meteorológicos foram obtidos a cada 2 minutos, no período de agosto de 2015 até setembro de 2016. As médias diárias durante este período são representadas na Figura 7.

FIGURA 7 – MÉDIAS DIÁRIAS DOS DADOS REFERENTES À TEMPERATURA, VENTO, RADIÇÃO E UMIDADE AO LONGO DO PERÍODO ESTUDADO.



Analisando a temperatura como um todo, nota-se uma tendência de aumento ao ponto que nos aproximamos do verão, estação em que as temperaturas tendem a ser mais altas. Altos e baixos também são notados ao longo dos dias e isso é devido às variações sazonais.

A água, devido ao seu calor específico, conserva por mais tempo as temperaturas, dessa forma há uma menor variação das mesmas, ou seja, a amplitude térmica é menor quanto maior for a umidade do ar. No caso da

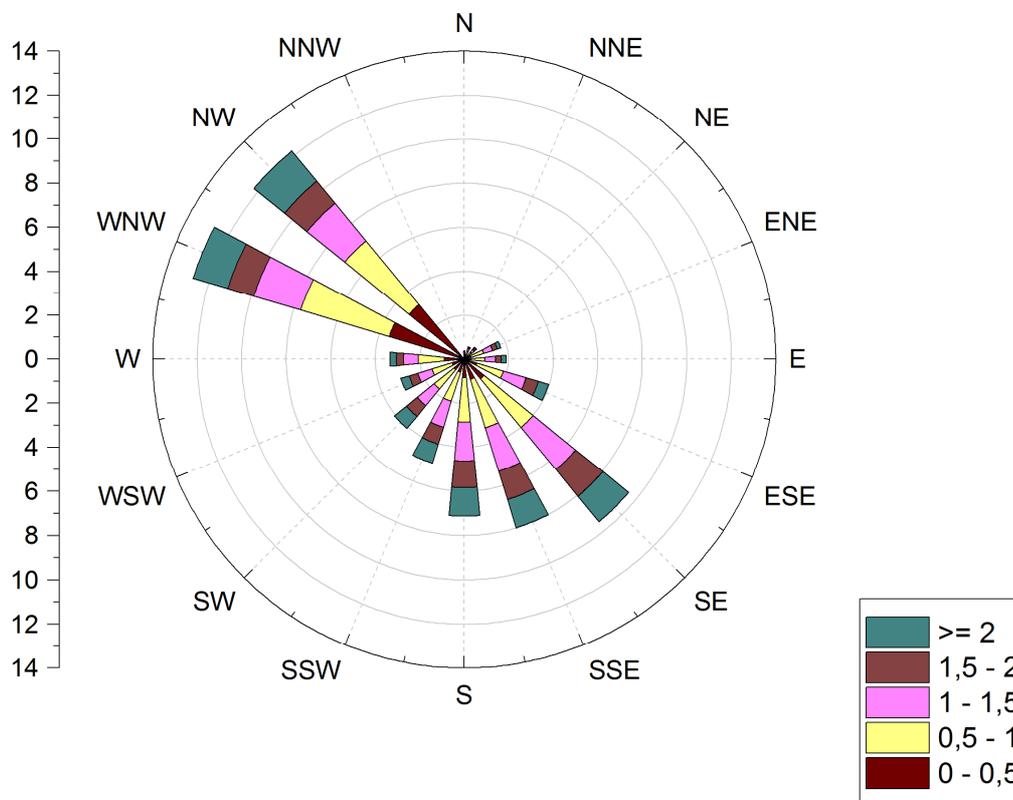
radiação, como falado anteriormente, parte da mesma é absorvida e parte é refletida. Quanto maior for o índice de radiação incidente, maior tende a ser a temperatura. O vento, por sua vez, está mais relacionado com a sensação térmica sentida ao longo do dia.

A Figura 7 mostra o comportamento da temperatura, da radiação, da umidade e do vento ao longo do período estudado. A radiação tende a ser maior ao ponto que o verão chega, isso ocorre porque luz solar incide com maior intensidade sobre o hemisfério Sul (caracterizando o solstício), conseqüentemente o índice de radiação aumenta e a temperatura do ar sofre essa influência. No caso da umidade, nota-se que a variação entre o inverno e o verão não foi tão significativa, tendo em vista que geralmente o verão é mais úmido e o inverno mais seco. Porém, isso se deve ao fato da região estar localizada em área montanhosa e também, em virtude do fenômeno chamado de *El Niño* e seus efeitos nas águas do Oceano Pacífico (GRIMM e ACEITUNO, 2015).

A temperatura média é de 18,2 °C, umidade média 93,78%, radiação média de 136 Wm⁻² e a velocidade média do vento é de 0,86 ms⁻¹.

A Figura 8 representa a Rosa dos Ventos da região de estudo. A partir da mesma, nota-se que o vento predominante foi no eixo SE-NW e que as velocidades do vento são baixas, com valores máximos próximos de 2 ms⁻¹.

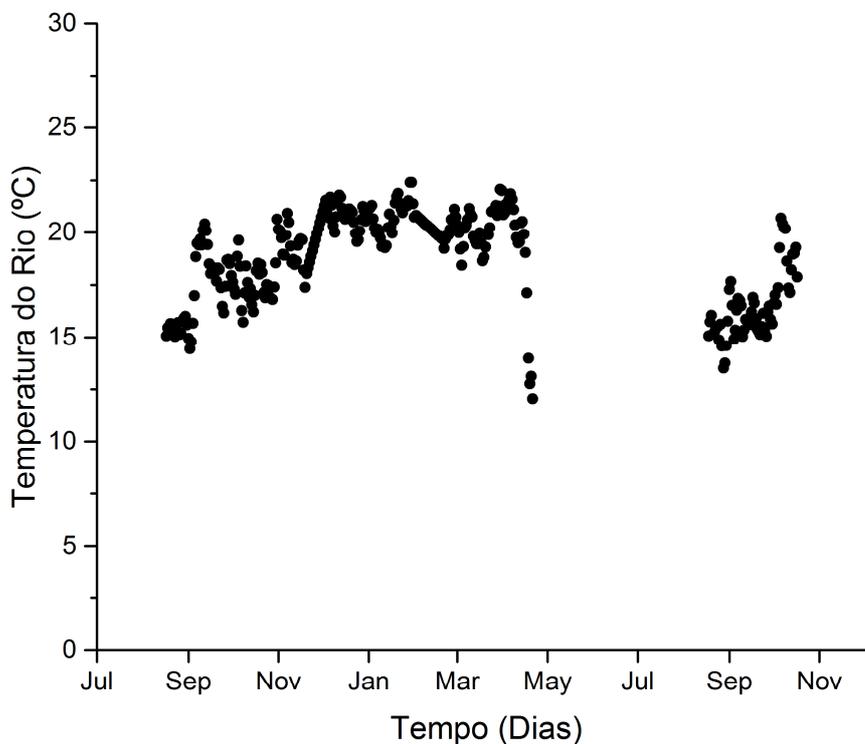
FIGURA 8 – ROSA DOS VENTOS REPRESENTANDO O COMPORTAMENTO DO VENTO NA REGIÃO DE ESTUDO



5.2 TEMPERATURA DA ÁGUA

A temperatura da água foi medida na estação São João gerando dados a cada 10 minutos durante o mesmo período de agosto de 2015 até outubro de 2016. Do dia 3 de maio de 2016 até o dia 28 de agosto de 2016, os dados de temperatura não foram registrados devido a uma possível falha, ainda desconhecida, no sistema. A Figura 9 mostra o comportamento da temperatura a partir das médias diárias ao longo do período estudado.

FIGURA 9 – TEMPERATURA DO RIO SÃO JOÃO AO LONGO DO PERÍODO DE AGOSTO DE 2015 ATÉ OUTUBRO DE 2016

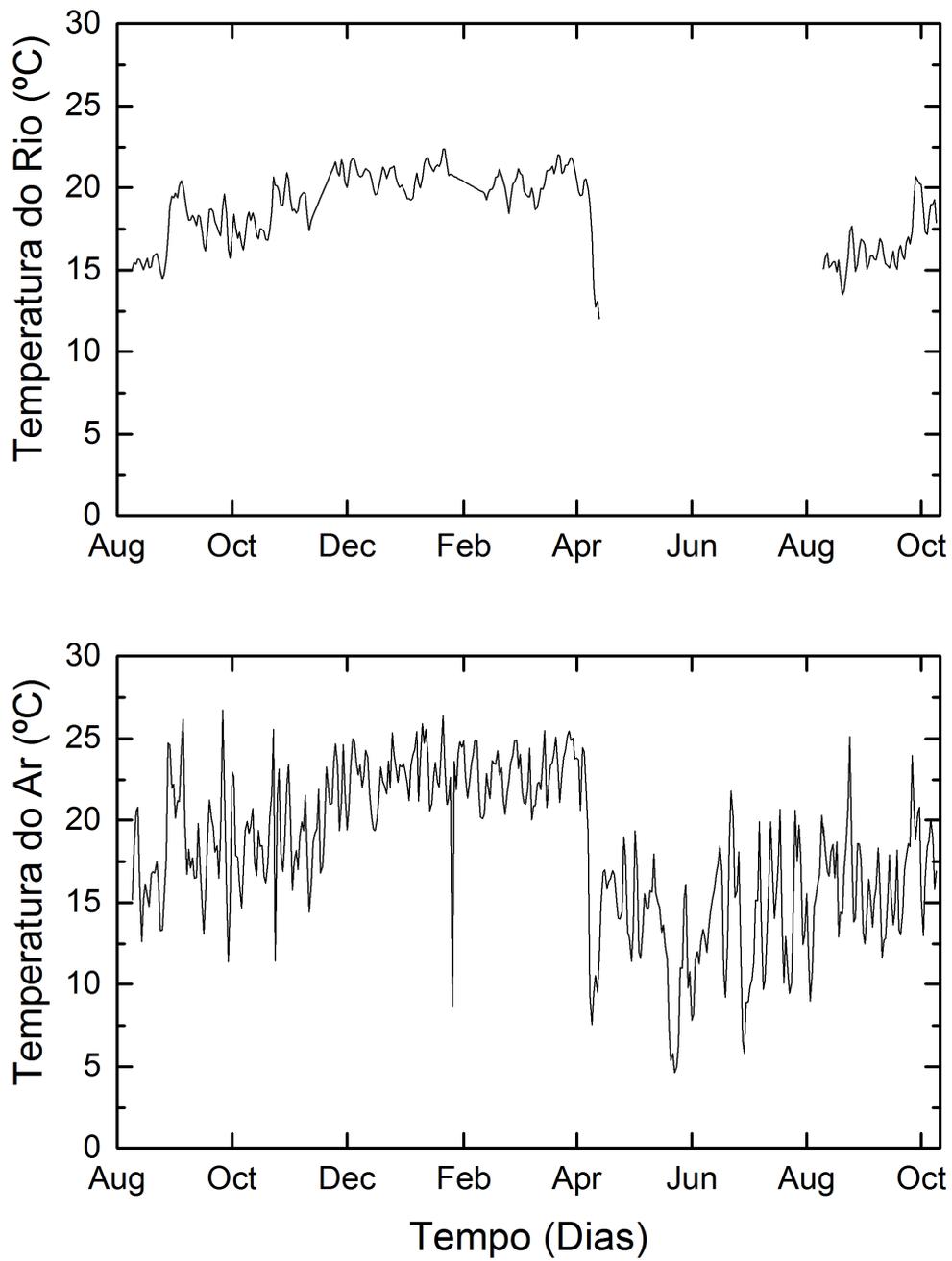


A temperatura média máxima da água registrada foi próxima de 22 °C e a mínima de 12 °C.

5.3 TEMPERATURA DO AR E TEMPERATURA DA ÁGUA

Na Figura 10 podemos visualizar o gráfico das médias diárias da temperatura da água e do ar. Observa-se que apesar da temperatura do ar sofrer maiores variações que a da água, ambas seguem o mesmo padrão de picos e vales, sendo assim, é de se esperar que exista uma relação entre elas.

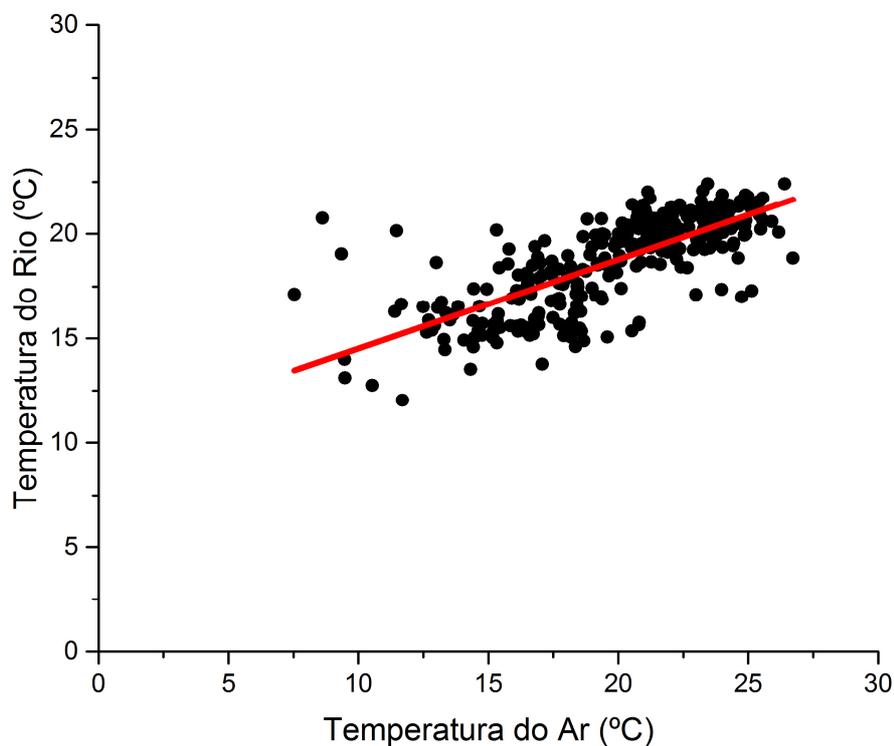
FIGURA 10 – MÉDIAS DIÁRIAS DA TEMPERATURA DO RIO SÃO JOÃO E DA ESTAÇÃO METEOROLÓGICA AO LONGO DO PERÍODO ESTUDADO



5.3.1 Regressão Linear

Ao aplicar o método de regressão linear buscando encontrar uma equação da reta que satisfaça a relação entre as temperaturas, obtemos como resultado a Figura 11.

FIGURA 11 – GRÁFICO DO MÉTODO DE REGRESSÃO LINEAR ENTRE A TEMPERATURA DO RIO SÃO JOÃO – ESTAÇÃO SÃO JOÃO – E DO AR – ESTAÇÃO METEOROLÓGICA.

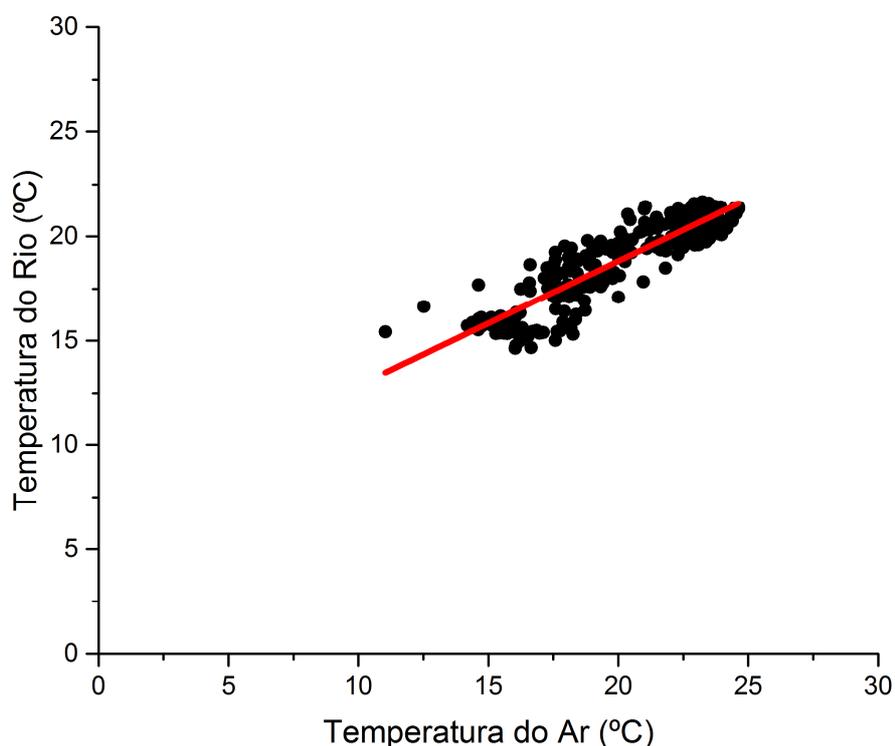


Nessa regressão, o coeficiente de determinação r^2 , que indica quanto o modelo consegue explicar os valores observados e como a quantidade de variabilidade dos dados está sendo explicada pelo modelo, foi igual a 0,56, o valor em que a reta corta o eixo y (coeficiente linear da equação da reta) é 10,25 e o coeficiente angular é 0,42 ($T_w = 0,42 T_a + 10,25$).

A Figura 12 mostra um gráfico similar ao da Figura 11, porém, ao invés de médias diárias, foram utilizadas médias móveis semanais, considerando o valor da média da temperatura dos 7 dias anteriores ao dia em questão. Com isso,

ocorre a suavização dos dados e, conseqüentemente, da variância, melhorando assim o resultado da regressão. Isso fica claro quando se compara o resultado do coeficiente de determinação que, para a Figura 7 foi igual a 0,80. Para esse caso, os coeficientes linear e angular foram 6,89 e 0,60 ($T_w = 0,6 T_a + 6,89$).

FIGURA 12 – GRÁFICO DO MÉTODO DE REGRESSÃO LINEAR ENTRE AS MÉDIAS DIÁRIAS DA TEMPERATURA DO RIO SÃO JOÃO E DA TEMPERATURA DO AR.



Para comparar a performance do modelo de regressão linear para os dois casos, a raiz do erro quadrático médio (REQM) foi utilizado. O resultado da REQM juntamente com as equações para cada um dos métodos está na Tabela 5. De acordo com a metodologia REQM, ao utilizar o modelo com médias móveis semanais obtemos um erro menor, proporcionando um resultado mais coerente à situação real.

TABELA 5 – VALOR DO REQM, RESPECTIVAS EQUAÇÕES E COEFICIENTES DE DETERMINAÇÃO DA REGRESSÃO LINEAR UTILIZANDO MÉDIAS DIÁRIAS E MÉDIAS MÓVEIS SEMANAIS.

	REGRESSÃO LINEAR UTILIZANDO MÉDIAS DIÁRIAS	REGRESSÃO LINEAR UTILIZANDO MÉDIAS MÓVEIS SEMANAIS
Equação da reta	$T_w = 0,42 T_a + 10,25$	$T_w = 0,60 T_a + 6,89$
r^2	0,56	0,8
Valor REQM (°C)	1,5	0,9

Outros estudos que utilizaram a metodologia da regressão linear obtiveram valores próximos de coeficiente angular como, 0,43 em Schwillach River – Alemanha (Morrill *et. al.*, 2005), 0,39 no Broken River - Austrália (Johnson, 1971) e 0,59 no Sillamae River – Estônia (Morril *et. al.*, 2005). Nota-se uma proximidade entre os valores, ou seja, da inclinação da reta proveniente da regressão linear, sendo assim, as relações entre a temperatura do ar e da água seguem o mesmo padrão.

5.3.2 Regressão não-linear

O método de regressão não-linear foi aplicado para os mesmos dados, tanto para médias diárias (Figura 13) quanto para médias móveis semanais (Figura 14) durante o mesmo período de tempo.

FIGURA 13 – GRÁFICO DO MÉTODO DE REGRESSÃO NÃO-LINEAR (EXPONENCIAL) ENTRE AS MÉDIAS DIÁRIAS DA TEMPERATURA DO RIO SÃO JOÃO E DA TEMPERATURA DO AR.

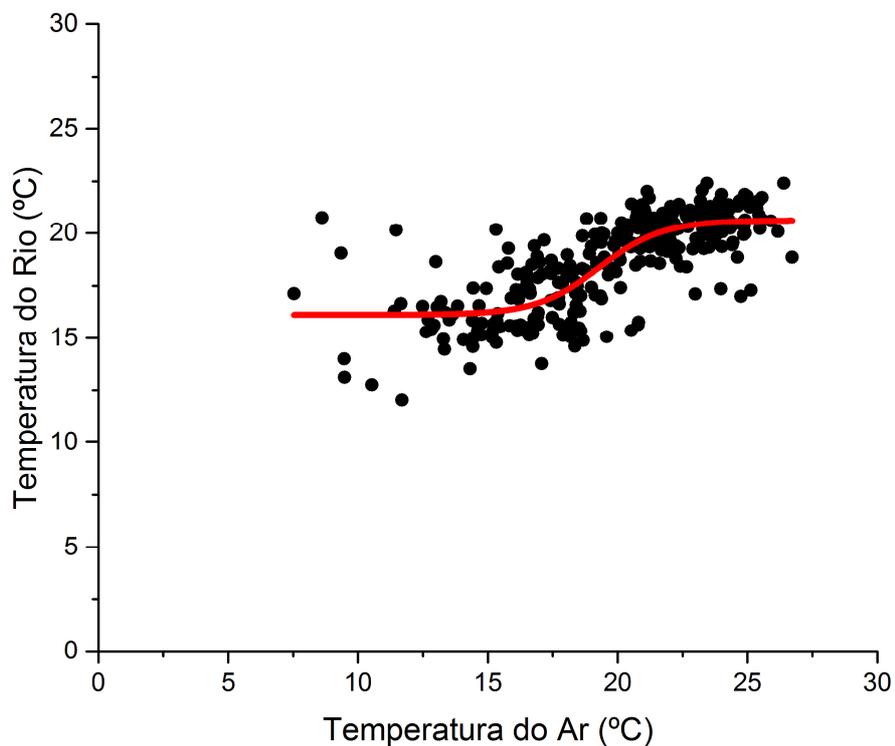
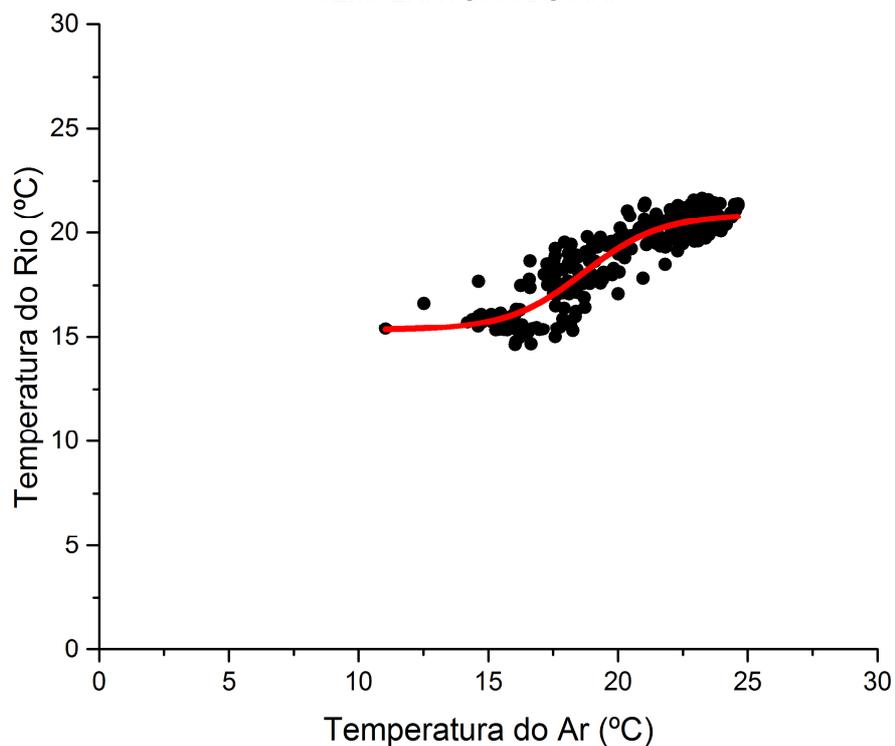


FIGURA 14 – GRÁFICO DO MÉTODO DE REGRESSÃO NÃO-LINEAR (EXPONENCIAL) ENTRE AS MÉDIAS MÓVEIS SEMANAIS DA TEMPERATURA DO RIO SÃO JOÃO E DA TEMPERATURA DO AR.



Ao utilizarmos o método para médias diárias obtivemos um valor do coeficiente de determinação a 0,61 enquanto que para as médias móveis semanais o valor do r^2 foi de 0,82, mostrando novamente que, utilizando as médias móveis o modelo consegue representar melhor a variância dos dados. Quando comparados os valores do r^2 do modelo de regressão linear com o modelo de regressão não-linear nota-se que o segundo consegue representar melhor a variância dos dados e isso se deve ao fato de que o ajuste exponencial engloba e abrange de forma mais completa os dados do que o ajuste através de uma reta.

A Equação (2) foi utilizada na metodologia e na Tabela 6 encontram-se os valores dos coeficientes obtidos para cada regressão não-linear:

TABELA 6 – VALORES DOS COEFICIENTES OBTIDOS A PARTIR DA REGRESSÃO NÃO LINEAR APLICADA PARA MÉDIAS DIÁRIAS E MÉDIAS MÓVEIS SEMANAIS.

EQUAÇÃO	COEFICIENTES	REGRESSÃO NÃO-LINEAR	
		MÉDIAS DIÁRIAS	MÉDIAS MÓVEIS SEMANAIS
$T_w = \mu + \frac{\alpha - \mu}{1 + e^{\gamma(\beta - T_a)}}$	α	20,61	20,87
	μ	16,11	15,33
	γ	0,82	0,67
	β	19,28	18,69

TABELA 7 – VALOR DO REQM, RESPECTIVAS EQUAÇÕES E COEFICIENTES DE DETERMINAÇÃO DA REGRESSÃO NÃO-LINEAR UTILIZANDO MÉDIAS DIÁRIAS E MÉDIAS MÓVEIS SEMANAIS.

	REGRESSÃO NÃO-LINEAR UTILIZANDO MÉDIAS DIÁRIAS	REGRESSÃO NÃO-LINEAR UTILIZANDO MÉDIAS MÓVEIS SEMANAIS
Equação exponencial	$T_w = 16,11 + \frac{20,61 - 16,11}{1 + e^{0,82(19,28 - T_a)}}$	$T_w = 15,33 + \frac{20,87 - 15,33}{1 + e^{0,67(18,69 - T_a)}}$
r^2	0,61	0,82
Valor REQM (°C)	1,3	0,8

Em uma aplicação dessa metodologia em Cuyahoga River em Ohio, os seguintes valores para os coeficientes foram encontrados $\alpha = 30,2$, $\beta=11,8$, $\gamma=0,19$ e $\mu=5,1$. Em Maine, o estudo aplicado ao Aroostook River originou os seguintes coeficientes $\alpha = 29,2$, $\beta=12,9$, $\gamma=0,21$ e $\mu=0,0$. Sendo o coeficiente α a temperatura máxima do corpo d'água, μ representa a temperatura mínima do corpo d'água, γ é função da inclinação no ponto de inclinação mais acentuada (inflexão) e β é a temperatura do ar no ponto de inflexão.

5.3.3 Temperatura de Equilíbrio

O último método utilizado foi o da Temperatura de Equilíbrio. Esse, utilizou um maior número de dados uma vez que levou em consideração outros fatores meteorológicos não considerados nos outros métodos, como a temperatura da água e do ar, a radiação, a umidade relativa, velocidade do vento, pressão de vapor, pressão, coeficiente de sombreamento e de cobertura, coeficiente de nebulosidade, temperatura de ponto de orvalho e chuva acumulada.

Os valores de radiação, temperatura e umidade relativa foram obtidos através da estação meteorológica presente na região e, os outros dados como os de pressão de vapor d'água, temperatura de orvalho, emissividade, entre outros, foram calculados a partir desses dados coletados. O cálculo realizado, juntamente com as formulações e simplificações, está descrito no item 4.2 do presente trabalho.

O método de regressão linear também foi utilizado nesse modelo. A Figura 15 e a Figura 16 mostram gráficos da regressão linear utilizando médias diárias e médias móveis semanais, respectivamente, de valores da temperatura da água e da temperatura de equilíbrio.

FIGURA 15 – GRÁFICO DO MÉTODO DE REGRESSÃO LINEAR ENTRE AS MÉDIAS DIÁRIAS DA TEMPERATURA DO RIO SÃO JOÃO E DA TEMPERATURA DE EQUILÍBRIO

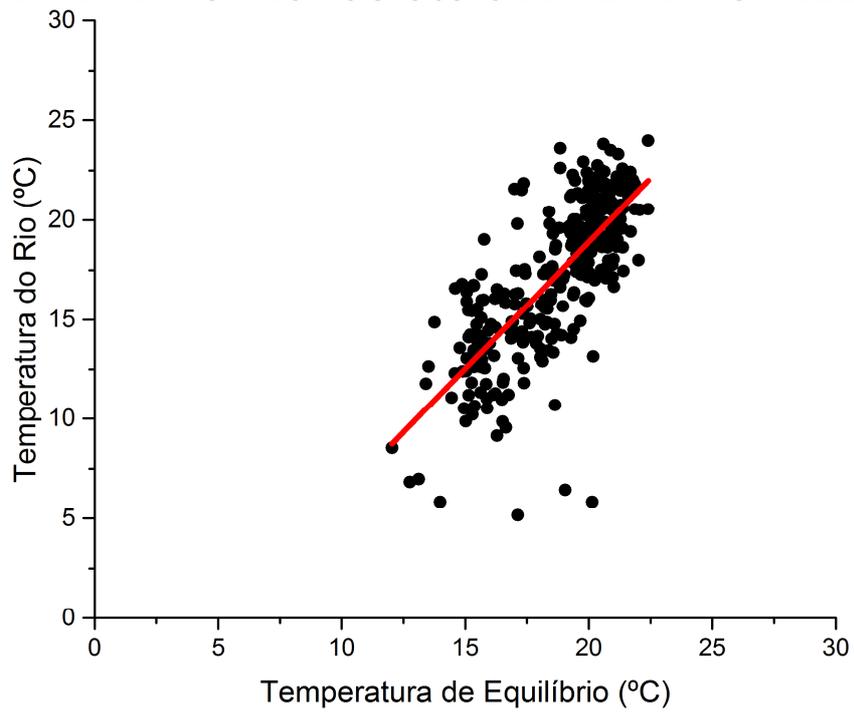
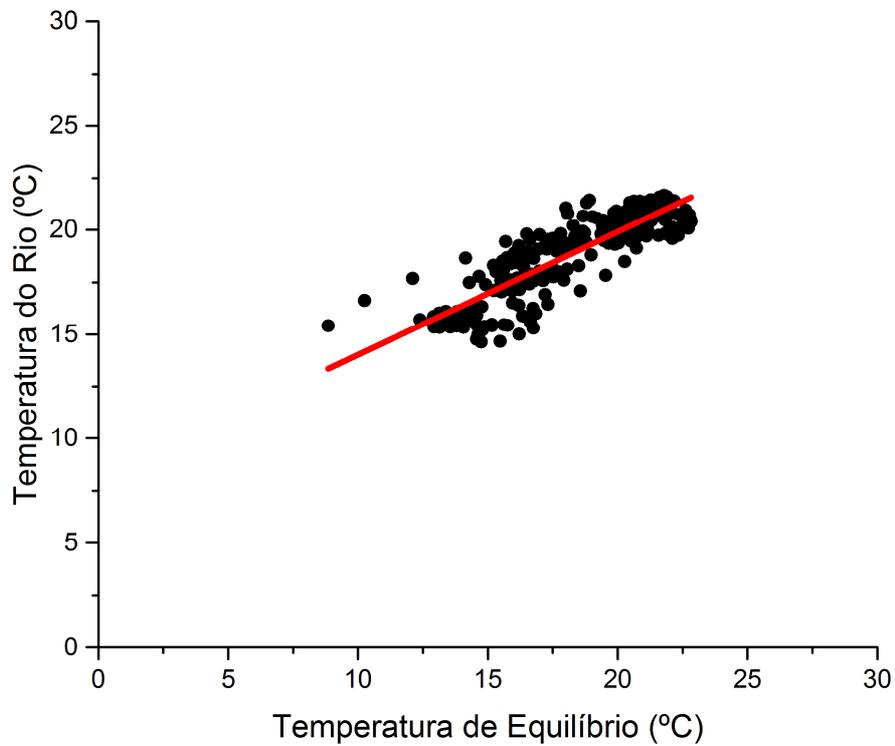


FIGURA 16 – GRÁFICO DO MÉTODO DE REGRESSÃO LINEAR ENTRE AS MÉDIAS MÓVEIS SEMANAIS DA TEMPERATURA DO RIO SÃO JOÃO E DA TEMPERATURA DE EQUILÍBRIO.



Os coeficientes das equações bem como o REQM e as respectivas equações da reta estão na Tabela 8. Novamente o melhor resultado foi alcançado utilizando as médias móveis semanais.

TABELA 8 – VALOR DO REQM, RESPECTIVAS EQUAÇÕES E COEFICIENTES DE DETERMINAÇÃO DA REGRESSÃO LINEAR UTILIZANDO MÉDIAS DIÁRIAS E MÉDIAS MÓVEIS SEMANAIS DO MODELO DE TEMPERATURA DE EQUILÍBRIO.

	TEMPERATURA DE EQUILÍBRIO UTILIZANDO MÉDIAS DIÁRIAS	TEMPERATURA DE EQUILÍBRIO UTILIZANDO MÉDIAS MÓVEIS SEMANAIS
Equação da reta	$T_w = 1,27 T_e - 6,64$	$T_w = 0,59 T_e + 8,14$
r^2	0,55	0,77
Valor REQM (°C)	4	0,9

5.4 COMPARAÇÃO DOS AJUSTES FORNECIDOS PELAS EQUAÇÕES

Existe uma diferença entre os valores observados (reais) e o valor fornecido pelas equações. Esta diferença é denominada erro e é uma variável aleatória que quantifica a falha do modelo em ajustar-se aos dados reais. As Figuras 17 e 18 apresentam um gráfico dos erros de cada regressão, linear e não-linear, e do modelo de temperatura de equilíbrio, para as duas escalas temporais (médias diárias e médias móveis semanais).

FIGURA 17 – GRÁFICO REPRESENTANDO O ERRO DOS AJUSTES PARA A REGRESSÃO LINEAR, A REGRESSÃO NÃO-LINEAR E A TEMPERATURA DE EQUILÍBRIO, COM BASE NOS VALORES DE MÉDIAS DIÁRIAS DE TEMPERATURA

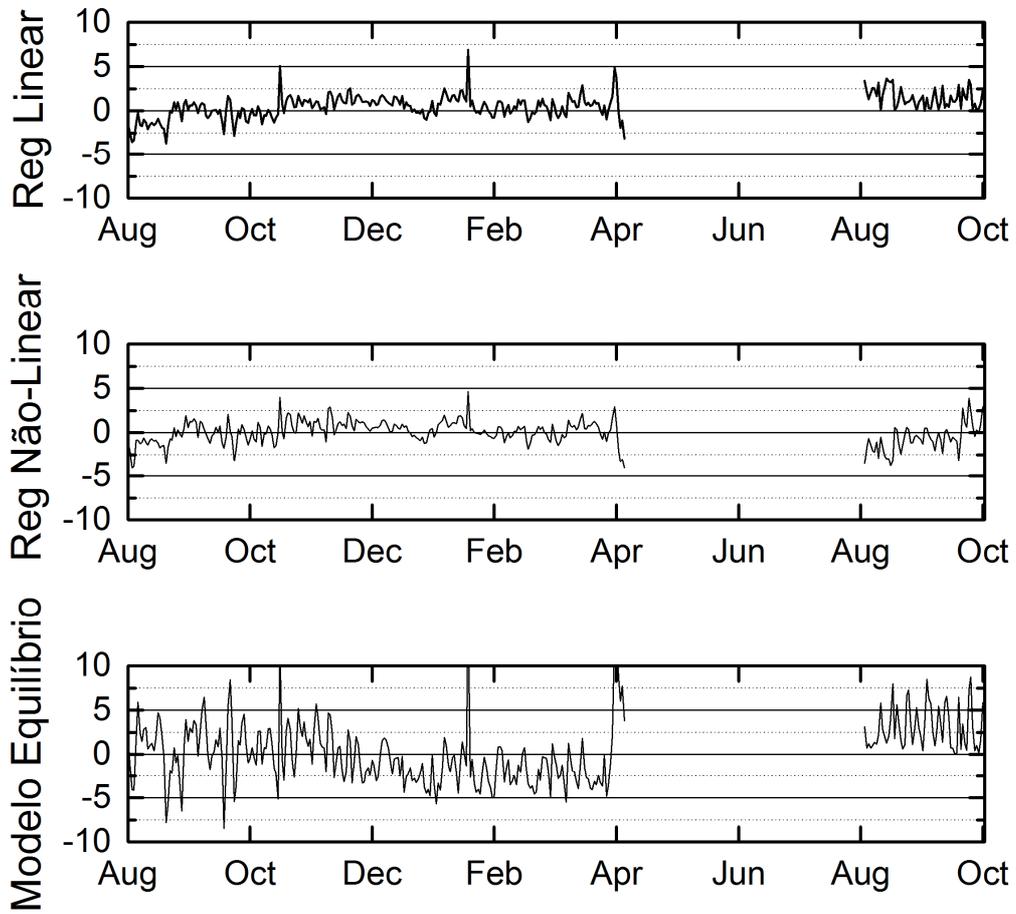
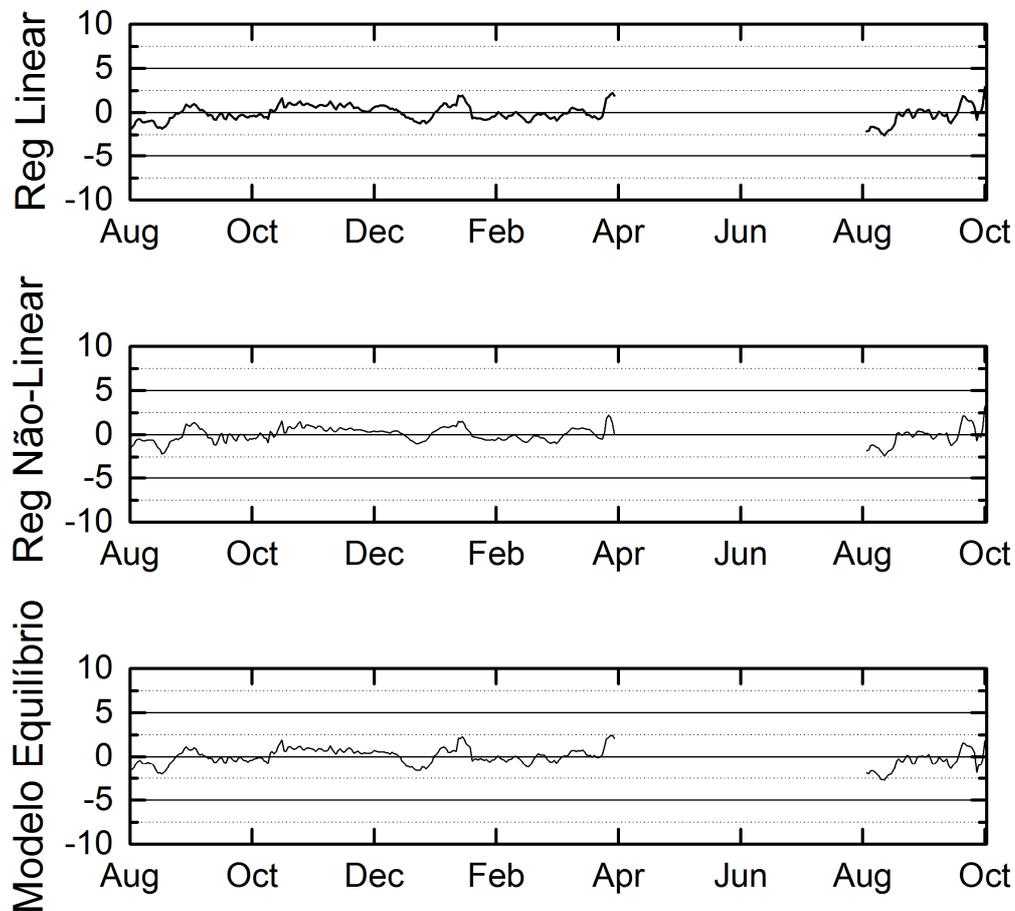


FIGURA 18 – GRÁFICO REPRESENTANDO O ERRO DOS AJUSTES PARA A REGRESSÃO LINEAR, A REGRESSÃO NÃO-LINEAR E A TEMPERATURA DE EQUILÍBRIO, COM BASE NOS VALORES DE MÉDIAS MÓVEIS SEMANAIS DE TEMPERATURA



A Figura 17 mostra os desvios dos valores quando a escala temporal de médias diárias dos valores de temperatura foram utilizados. Nota-se que as regressões linear e não-linear trouxeram resultados interessantes, mesmo que com alguns desvios consideráveis. Já a temperatura de equilíbrio, apresentou maior desvio, confirmando assim as análises e conclusões tiradas anteriormente.

A Figura 18 mostra os desvios dos valores baseados nas médias móveis semanais. Para tal, todos os três melhoraram significativamente tendo uma redução considerável no erro (desvio). Sendo assim, é perceptível que as relações água e ar são mais eficientes quando utilizadas escalas semanais ao invés de diárias.

6 CONCLUSÃO

O presente trabalho relata a experiência de medições de temperatura da água em um rio de pequeno porte na região da Serra do Mar no estado do Paraná. Diferentes métodos foram avaliados para estimar a temperatura da água do Rio São João com base na temperatura do ar que envolveu a aplicação de três diferentes tipos de metodologia, a regressão linear, a regressão não-linear e o modelo da temperatura de equilíbrio. Tais metodologias aplicadas na relação água e ar são interessantes quando há necessidade de utilizar ou analisar a temperatura da água do local, mas a mesma não é conhecida, podendo então, ser determinada a partir da temperatura do ar por meio dessas relações determinadas. Foi feita uma análise de consistência da temperatura medida na estação meteorológica do município de Tijucas do Sul (Apêndice A) para verificar a veracidade dos dados obtidos pela mesma (a partir da relação entre a temperatura de Curitiba e do município de Tijucas do Sul, no Paraná, foi obtido um coeficiente de determinação igual a 0,80).

O modelo de regressão linear, embora simples foi eficiente, porém não proporcionou o melhor resultado dentre os três métodos uma vez que, a relação entre as temperaturas, que não é completamente linear, é obtida através da equação de uma reta que tenta explicar a variação da variável dependente (água) pela variação dos níveis da variável independente (ar). Sendo assim, a amplitude entre a diferença dos valores das temperaturas reais e da regressão foi relativamente alta (a regressão resultou em um coeficiente de determinação de 0,56 e em um erro quadrático médio de 1,5°C), além de haver inúmeros outros fatores que influenciam na relação água e ar e que geram as oscilações diárias, mas que não são levados em consideração nesse método de regressão.

O método de regressão não-linear forneceu resultados melhores em termos das métricas de ajuste. O modelo não-linear utilizou quatro parâmetros em sua aplicação para determinar da temperatura da água. O mesmo gerou uma equação que é uma combinação não-linear de parâmetros do modelo dependendo de uma variável independente (ar). A função utilizada foi a curva exponencial que proporcionou resultados mais próximos à situação real

reduzindo assim, a variância entre os dados reais e os dados estimados (resultou em um coeficiente de determinação 0,61 e um erro quadrático médio de 1,3 °C).

O modelo da temperatura de equilíbrio considerou inúmeros dados meteorológicos, como por exemplo: radiação, velocidade do vento, coeficiente de nebulosidade, emissividade, coeficiente de cobertura e de sombreamento, entre outros, e consistiu em determinar a temperatura de equilíbrio da água a partir de desses dados. Então, com base nessa temperatura, uma relação com a própria temperatura da água foi estabelecida. O modelo foi considerado complexo e envolveu uma quantidade significativa de dados de entrada (esse modelo quando aplicado resultou em um coeficiente de determinação de 0,55 e um erro quadrático médio de 4 °C).

Por fim, era esperado que o modelo da temperatura de equilíbrio fornecesse o melhor resultado, tendo em vista que é o modelo que considera o maior número de dados meteorológicos, incluindo as transferências de calor entre a atmosfera e o corpo hídrico e também, pela temperatura de equilíbrio ser a temperatura de tendência de equilíbrio entre as trocas térmicas. Contudo, para a região de estudo, esse modelo não foi tão eficiente e isso se deve, possivelmente, ao fato do Rio São João ser relativamente pequeno quando comparado com os rios de outros estudos, se tornando mais sujeito à interferência do escoamento subterrâneo e também devido às aproximações dos coeficientes de sombreamento e cobertura bem como o coeficiente de nebulosidade. O aprofundamento na determinação dos mesmos para a região de estudo fica como recomendação para trabalhos futuros. O modelo de regressão não-linear, apesar de considerar apenas as temperaturas da água e do ar como variáveis, conseguiu representar melhor a realidade para essa área de estudo.

Quando os valores das médias móveis semanais foram utilizados nos cálculos, todos os modelos melhoraram significativamente, pois com isso, ocorreu uma suavização na amplitude entre os valores dos dados. De acordo com a Tabela 1, os modelos que relacionam as temperaturas da água e do ar proporcionam melhores resultados quando escalas temporais semanais são utilizadas. Para tal estudo, no intuito de aprimorar os resultados, a escala temporal semanal foi utilizada, porém com o uso de médias móveis, fazendo com

que um maior número de dados contribuísse com os métodos uma vez que, a média móvel semanal utilizou os sete dias anteriores ao dia em questão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Air temperature, 2010. Disponível em <<http://www.fondriest.com/news/airtemperature.htm>>. Acesso em : 18/12/2015.

BENYAHYA, L.; CAISSIE, D.; ST-HILAIRE, A.; OUARDA, T. B. M. J.; BOBÉE, B.; A Review of Statistical Water Temperature Models. **Canadian Water Resources Journal**, v. 32, Jul 2007.

BENYAHYA, L.; ST-HILAIRE, A.; OUARDA, T. B. M. J.; BOBÉE, B.; DUMAS, J.; Comparison of non-parametric and parametric water temperature models on the Nivelles River, France. **Hydrological Sciences Journal – des Sciences Hydrologiques**, Jun 2008.

BOGAN, T.; MOHSENI, O.; STEFAN, H. G.; Stream temperature–equilibrium temperature relationship. **WATER RESOURCES RESEARCH**, v. 39, n. 9, Set 2013.

BRUTSAERT, W.; Evaporation into the Atmosphere: Theory, History, and Applications. **Kluwer Academy**, 1991.

CASSIE, D.; SATISH, M. G.; EL-JABI, N.; Predicting water temperatures using a deterministic model: Application on Miramichi River catchments (New Brunswick, Canada). **Journal of Hydrology**, v. 336, p. 303–315, Abril 2007.

Convective heat flux. Disponível em <<http://www.greenteg.com/convective-heat-flux-explained/>>. Acesso em: 22/12/2015.

CORREA, M. G. G.; GALVANI, E.; Uma Abordagem Teórica das Interações no Sistema Superfície – Atmosfera (SSA) na Bacia do Rio Piriqui – PR. **REVISTA GEONORTE**, v. 1, n. 5, p. 1245–1255, 2012.

CRISP, D. T.; HOWSON, G.; Effect of Air–Temperature Upon Mean Water Temperature in Streams in the North Pennines and English Lake District. **Freshwater Biology**, v. 12, p. 359–367, 1982.

DUARTE, H. F.; Ajuste da Radiação Líquida em um Modelo de Transferência solo-vegetação-atmosfera, 2004.

EATON, E. J.; SCHELLER, R. M.; Effects of Climate Warming on Fish Thermal Habitat in Streams of the United States. **Limnology and Oceanography**, p 109–118, 1996.

ERICKSON, T. R.; STEFAN, H. G.; Correlations of Oklahoma Stream Temperatures with Air Temperatures. 1996.

GRIMM, A. M.; ACEITUNO, P.; *El Niño* Novamente. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v 30.

Heat transfer. Disponível em <http://www.g9toengineering.com/resources/heattransfer.htm> >. Acesso em: 22/12/2015.

HERBERT, C.; CAISSIE, D.; STATISH, M. G.; EL-JABI N.; Predicting Hourly Stream Temperatures Using the Equilibrium Temperature Model. **Journal of Water Resource and Protection**, p. 322–338, Mar 2015.

JOHNSON, F. A.; Stream Water Temperatures in an Alpine Area. **Journal of Hydrology**, v. 14, p. 322–336, Dec 1971.

KELLEHER, C.; WAGENER, T.; GOOSEFF, M.; MCGLYNN, B.; MCGUIRE, K.; MARSHALL, L.; Investigating Controls on the Thermal Sensitivity of Pennsylvania Streams. **Hydrological Processes**, v. 26, p. 771–785, 2012.

KOTHANDARAMAN V.; EVANS R. L.; Use of Air–Water Relationships for Predicting Water Temperature. **REPORT OF INVESTIGATION 69, Jul 2010.**

LARNIER, K.; ROUX, H.; DARTUS, D.; CROZE, O.; Water temperature modeling in the Garonne River (France). **Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems**, v. 4, p. 398–418, Jul 2010.

MANNICH, M.; Estimativa de Emissões de Gases de Efeito Estufa em Reservatórios e Lagos – Contribuições para o Monitoramento e Modelagem 1D – Vertical. Curitiba, Jun 2013.

MANTUA, N.; TOHVER, I.; HAMLET, A.; Climate Change Impacts on Streamflow Extremes and Summertime Stream Temperature and Their Possible Consequences for Fresh Water Salmon Habitat in Washington State. **Climatic Change**, v. 102, p. 187–223, 2010.

MOHSENI, O.; STEFAN, H.G. Stream Temperature/Air Temperature relationship: a physical interpretation. **Journal of Hydrology**, v. 218, p. 128–141, 1999.

MOHSENI, O.; STEFAN, H.G.; ERICKSON, T.R.; A nonlinear regression model for weekly stream temperatures. **Water Resources Research**, v. 34, p. 2685–2692, 1998.

MORRIL, J. C.; BALES, R. C.; CONKLIN, M. H.; Estimating Stream Temperature from Air Temperature: Implications for Future Water Quality. **JOURNAL OF ENVIRONMENTAL ENGINEERING**, v. 131, Jan 2005.

O'DRISCOLL, M. A.; DEWALLE, D. R.; Stream–Air Temperature Relations to Classify Stream–Ground Water Interactions. **Journal of Hydrology**, v. 329, p. 140–153, 2006.

OZAKI, N.; FUKUSHIMA, T.; HARASAWA, H.; KOJIRI, T.; KAWASHIMA, K.; ONO, M.; Statistical Analyses on the Effects of Air Temperature Fluctuations on River Water Qualities. **Hydrological Processes**, v. 17, p. 2837–2853, 2003.

PERCEBON, C. M.; BITTENCOURT, A. V. L.; FILHO, E. F.; Diagnóstico da temperatura das águas dos principais rios de Blumenau, SC. **Boletim Paranaense de Geociências**, n. 56, p. 7–19, 2005.

PILGRIM, J. M.; FANG, X.; STEFAN, H. G.; Stream Temperature Correlations with Air Temperatures in Minnesota: Implications for Climate Warming. **Journal of the American Water Resources Association**, v.34, p. 1109–1121, 1998.

RAMALHO, R.S.; Introduction to Wastewater Treatment Processes. **New York, Academic Press**, v. 9, p. 409, 1997.

SAILA, S.; CHEESEMAN, M.; POYER, D.; Maximum Stream Temperature Estimation from Air Temperature Data and its Relationship to Brook Trout

(*Salvelinus fontinalis*) Habitat Requirements in Rhode Island. **Wood–Pawcatuck Watershed Association**, 2013.

SEGURA, C.; CALDWELL, P.; SUN, G.; MCNULTY, S.; ZHANG, Y.; A Model to Predict Stream Water Temperature Across the Conterminous USA. **Hydrological Processes**, 2014.

SINOKROT, B. A.; STEFAN, G.; Stream Temperature Dynamics: Measurements and Modeling. **Water Resources Res.**, v. 29, p. 2299–2312, 1993.

STEFAN, H. G.; PREUDHOMME, E. B.; Stream Water Temperature Estimation from Air–Temperature. **Water Resources Bulletin**, v. 29, p. 27–45, 1993.

Transmissão de Calor em Edificações. Disponível em <http://wiki.sj.ifsc.edu.br/wiki/images/c/c6/Transmissao_de_Calor_em_Edificacoes.pdf>. Acesso em: 22/12/2015.

TOFFOLON, M.; PICCOLROAZ, S.; A Hybrid Model for River Water Temperatures as a Function of Air Temperature and Discharge. **Environmental Research**, v. 10, 2015.

WEBB, B. W.; NOBILIS, F.; Water Temperature Behavior in the River Danube during the 20th–century. **Hydrobiologia**, v. 291, p. 105–113, 1994.

WEBB, B. W.; WALLING, D. E.; Longer–term Water Temperature Behavior in a Upland Stream. **Hydrological Processes**, v. 7, p. 19–32, 1993.

APÊNDICE A – ANÁLISE DE CONSISTÊNCIA.

Para verificar a qualidade, tanto quanto confirmar a validade dos dados de temperatura da Estação Meteorológica de Tijucas do Sul (PR), os mesmos foram comparados com a estação meteorológica automática do SIMEPAR (Sistema Meteorológico do Paraná) localizada em Curitiba no Centro Politécnico da Universidade Federal do Paraná. A Figura 19 e a Figura 20 mostram o comportamento e relação da temperatura nas duas estações meteorológicas, respectivamente.

FIGURA 19 – GRÁFICO DOS VALORES DAS MÉDIAS DIÁRIAS DE TEMPERATURA DA ESTAÇÃO METEOROLÓGICA DO MUNICÍPIO DE TIJUCAS DO SUL E DA CIDADE DE CURITIBA DE OUTUBRO DE 2015 ATÉ FEVEREIRO DE 2016.

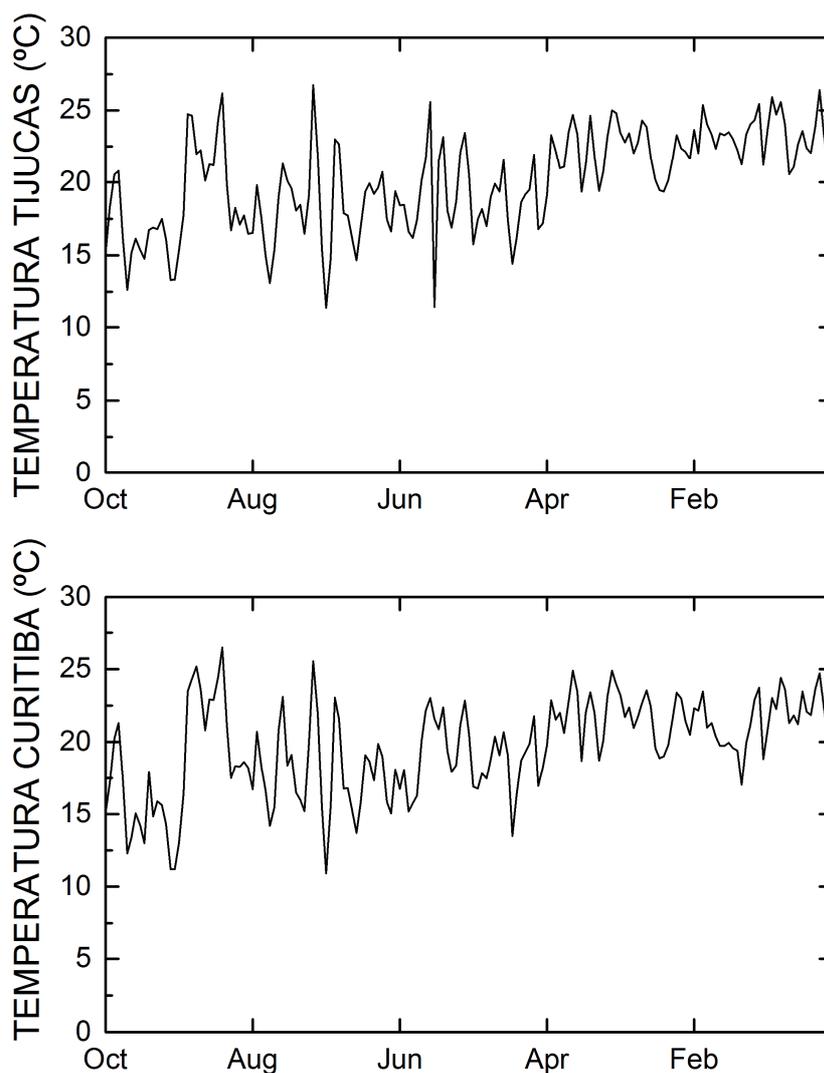
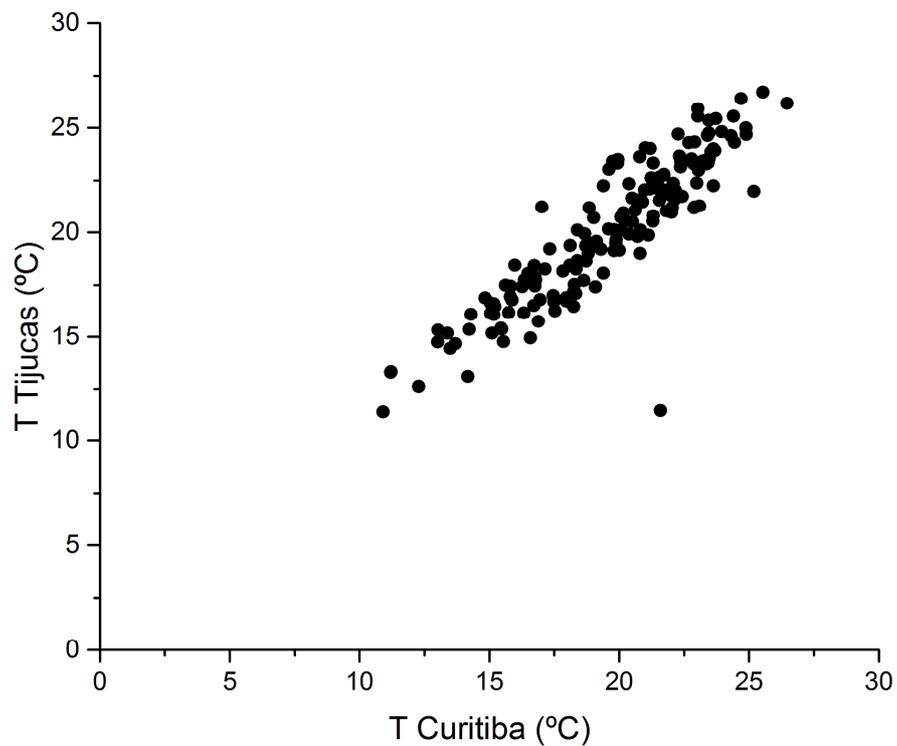


FIGURA 20 – GRÁFICO DOS VALORES DAS MÉDIAS DIÁRIAS DE TEMPERATURA DA ESTAÇÃO METEOROLÓGICA DO MUNICÍPIO DE TIJUCAS DO SUL E DA CIDADE DE CURITIBA DE OUTUBRO DE 2015 ATÉ FEVEREIRO DE 2016.



A partir da Figura 18 e da Figura 19 observa-se que o comportamento da temperatura em ambas as estações segue o mesmo padrão e o coeficiente de determinação obtido quando aplicada a regressão linear foi de 0,80, sendo assim, consideramos consistentes os valores obtidos da Estação Meteorológica do município de Tijucas do Sul (PR).