

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Escola de Engenharia de São Carlos

**Uma contribuição ao estudo da
interação rio-aquífero em áreas
tropicais, utilizando a temperatura
como traçador**

Alan Reis

Orientador: Prof. Tit. Edson Cezar Wendland

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO – USP
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS – EESC
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
HIDRÁULICA E SANEAMENTO – PPGSHS

ALAN REIS

**Uma contribuição ao estudo da interação rio-aquífero
em áreas tropicais, utilizando a temperatura como
traçador**

São Carlos – SP

2023

ALAN REIS

**Uma contribuição ao estudo da interação rio-aquífero em áreas
tropicais, utilizando a temperatura como traçador**

Versão corrigida

Tese apresentada à Escola de Engenharia de
São Carlos da Universidade de São Paulo para
obtenção do título de Doutor em Ciências:
Engenharia Hidráulica e Saneamento

Orientador: Prof. Dr. Edson Cezar Wendland

São Carlos – SP

2023

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da
EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

RR375u	Reis, Alan Uma contribuição ao estudo da interação rio-aquífero, utilizando a temperatura como traçador / Alan Reis; orientador Edson Cezar Wendland. São Carlos, 2023. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento e Área de Concentração em Hidráulica e Saneamento -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2023. 1. interação rio-aquífero. 2. medição distribuída de temperatura. 3. fibra ótica. 4. Sistema Aquífero Guarani. 5. sazonalidade. I. Título.
--------	---

Eduardo Graziosi Silva - CRB - 8/8907

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **ALAN REIS**.

Título da tese: "Uma contribuição ao estudo da interação rio-aquífero em áreas tropicais, utilizando a temperatura como traçador".

Data da defesa: 29/09/2023.

Comissão Julgadora

Prof. Titular Edson Cezar Wendland
(Orientador)

(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC-USP)

Dra. Stela Dalva Santos Cota

(Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear/CDTN)

Profa. Dra. Suzana Maria Gico Lima Montenegro

(Universidade Federal de Pernambuco/UFPE)

Prof. Dr. Pedro Luiz Borges Chaffe

(Universidade Federal de Santa Catarina/UFSC)

Profa. Associada Cristina de Hollanda Cavalcanti Tsuha

(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC-USP)

Resultado

Aprovado

Aprovado

Aprovado

Aprovado

Aprovado

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento:
Prof. Assoc. **Juliano Jose Corbi**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Titular **Carlos De Marqui Junior**

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, aquele que me deu o dom da vida e a capacidade de adquirir e transmitir conhecimento.

Agradeço aos meus pais, José Silvestre e Edinamar, pelo amor constante e pelo total incentivo ao longo de toda a minha formação educacional.

Agradeço ao orientador deste trabalho, Prof. Dr. Edson Cezar Wendland, pela receptividade e amizade constantes, pelo estímulo em fazer ciência de boa qualidade e por todo o suporte e atenção no desenvolvimento desta tese.

Agradeço também aos demais professores do Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos (SHS/EESC/USP), por todos os ensinamentos partilhados e pelos constantes auxílios prestados.

Agradeço a todos os amigos do Laboratório de Hidráulica Computacional (LHC), pelos momentos compartilhados, pelo apoio constante nas atividades de campo relativas a esta pesquisa e pela partilha de conhecimento ao longo de toda essa caminhada. Não consigo listar o nome de todos aqui, sob o risco de esquecer alguém. Sou muito grato a todos com quem pude compartilhar este tempo no laboratório.

Agradeço ao corpo técnico-administrativo da Universidade de São Paulo (USP) / Campus de São Carlos, em suas várias esferas. Destaco especialmente o técnico Roberto Bergamo, grande parceiro de atividades de campo e de apoio fundamental no desenvolvimento e na implementação desta pesquisa; à secretária do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento (PPGSHS/EESC/USP), Maria Auxiliadora de Campos Altieri Pin (nossa querida Sá), por todo apoio nas questões burocráticas do curso de pós-graduação; e também aos amigos do Centro de Tecnologia da Informação de São Carlos (CETISC-USP), nas pessoas de Marcelo Sirbone e Luiz Alberto Botega, pelo auxílio na montagem das conexões da fibra ótica.

Agradeço aos órgãos de fomento à pesquisa brasileiros: ao CNPq / MCTI (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico / Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações), pelo apoio financeiro, na forma de bolsa de doutorado (processo nº 165004/2018-5); e ao apoio do processo nº 2015/03806-1 da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP); ao Programa de Excelência Acadêmica da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (PROEX/CAPES).

Por fim, agradeço a todos, que direta ou indiretamente, contribuíram para a conclusão desta tese. A finalização desta etapa é uma vitória coletiva, e não só individual.

“Hoje me sinto mais forte

Mais feliz, quem sabe

Só levo a certeza

De que muito pouco sei

Ou nada sei”

(Almir Sater – Tocando em Frente)

RESUMO

REIS, A. **Uma contribuição ao estudo da interação rio-aquífero em áreas tropicais, utilizando a temperatura como traçador**. 2023. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2023.

A temperatura como um traçador natural para estudos da interação rio-aquífero vem sendo bastante utilizada nos últimos anos, considerando o desenvolvimento da tecnologia de medição distribuída de temperatura (*Distributed Temperature Sensing* - DTS). A partir do uso de cabos de fibra ótica como sensores instalados ao longo de uma determinada extensão, busca-se verificar mudanças no padrão de temperatura da água superficial, resultantes da sua interação com as águas subterrâneas. Entender tais mudanças em ambientes tropicais e se estas representam descargas de águas subterrâneas rasas (fluxos na zona hiporreica) ou descargas de águas subterrâneas profundas, ainda são desafios científicos. Neste contexto, este trabalho buscou avaliar o potencial do uso da temperatura como ferramenta de identificação e caracterização da interação rio aquífero, em uma bacia hidrográfica tropical, inserida em região de afloramento do Sistema Aquífero Guarani (SAG). Adicionalmente, com o uso de diferentes técnicas de visualização, análise estatística e de agrupamento de dados, buscou-se classificar a ocorrência dos fluxos decorrentes desta interação, em termos de profundidade de origem, estabelecendo-se métricas iniciais para esta classificação, a partir de dados de temperatura. Os resultados obtidos permitiram concluir que o monitoramento da temperatura da água com a fibra ótica é efetivo para a determinação dos locais de ocorrência de interação rio-aquífero, mesmo com os efeitos da variação sazonal da temperatura. Notou-se que, em bacias tropicais, as zonas de interação se apresentam preponderantemente como zonas quentes, se diferenciando do comportamento comumente observado em bacias de áreas temperadas. As metodologias propostas para separação dos fluxos de águas rasas e dos fluxos de águas profundas apresentaram resultados convergentes e consistentes, o que realçam a eficácia da temperatura como traçador para os estudos da interação rio-aquífero em áreas tropicais.

Palavras-chave: interação rio-aquífero; medição distribuída de temperatura; fibra ótica; Sistema Aquífero Guarani; sazonalidade.

ABSTRACT

REIS, A. **A contribution to the study of groundwater – surface water interaction in tropical areas, using temperature as a tracer.** 2023. PhD Thesis (PhD in Hydraulics and Sanitation) – São Carlos School of Engineering. University of São Paulo, São Carlos, 2023.

Temperature as a natural tracer for groundwater-surface water interaction studies has been widely used in recent years, considering the development of distributed temperature measurement technology (Distributed Temperature Sensing - DTS). Using fiber optic cables as sensors installed along a certain length the aim is to verify changes in the temperature pattern of surface water as a result of its interaction with groundwater. Understanding such changes in tropical environments and whether they represent shallow groundwater discharges (flows in the hyporheic zone) or deep groundwater discharges are scientific challenges. In this context, this work sought to evaluate the potential of using temperature as a tool for identifying and characterizing groundwater-surface water interaction in a tropical river basin located in the outcrop region of the Guarani Aquifer System (SAG). Additionally, using different visualization techniques, statistical analysis, and data grouping, we sought to classify the occurrence of flows resulting from this interaction in terms of depth of origin, establishing initial metrics for this classification based on temperature data. The results allowed us to conclude that monitoring water temperature with optical fiber is efficient for determining the locations where interactions occur, even with the effects of seasonal temperature variation. The interaction zones are predominantly hot, differing from the behavior commonly observed in basins in temperate areas. The proposed methodologies for separating shallow and deep water flows presented convergent and consistent results, featuring the effectiveness of temperature as a tracer for groundwater-surface water interaction studies in tropical areas.

Keywords: groundwater – surface water interaction; distributed temperature sensing; fiber optics; Guarani Aquifer System; seasonality.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Esquema representativo da zona hiporreica como região de ocorrência da interação entre águas superficiais e subterrâneas	27
Figura 2 - Condições de ocorrência da interação rio-aquífero: (a) condição efluente; (b) condição influente, em rio hidráulicamente conectado; (c) condição influente, em rio hidráulicamente desconectado; (d) condição influente temporária, em eventos chuvosos	28
Figura 3 - Esquema ilustrativo de funcionamento de um dispositivo de medição de temperatura distribuída.....	31
Figura 4 – Diferença entre intervalo de amostragem e resolução espacial de um dispositivo DTS	31
Figura 5 - Comportamento da variação temporal de temperatura no leito do rio e em subsuperfície (gráficos em vermelho), em locais de interação rio aquífero: (a) na condição efluente e (b) na condição influente	36
Figura 6 - Fluxos de águas rasas, na zona hiporreica, visto em planta e em corte	38
Figura 7 - Mapa de localização da Bacia do Ribeirão da Onça (BRO), área de estudo deste trabalho	41
Figura 8 - Estações meteorológicas automáticas da BRO: (a) Estação Monte Alegre (E1); (b) Estação Santo Ignácio (E3); (c) Estação Zona Ripária (E4).....	43
Figura 9 - Local de instalação da fibra ótica para medição distribuída de temperatura, com destaque aos pontos inicial (CP 1 - Seção Q1) e final (CP 2 - Seção Q2) do trecho, assim como o ponto de instalação do equipamento central (Container)	44
Figura 10 - Variação da temperatura da água medida superficialmente (em azul, seção Q3) e em um dos poços de monitoramento (em vermelho, poço 19), na BRO, entre 2016 e 2019. Destaque para as faixas indicativas para os períodos do ano em que estimava-se identificar a interação rio-aquífero por pontos quentes (faixas em vermelho) e por pontos frios (faixas em azul).	46
Figura 11 - Instalação da fibra ótica no leito do Ribeirão da Onça	47
Figura 12 - Campanhas de medição de temperatura realizadas, com os períodos de dados coletados. Os círculos à esquerda indicam os trechos que tiveram dados coletados naquela campanha.	48
Figura 13 - Dispositivo DTS utilizado, em ambiente de laboratório e aplicado na área de estudo.....	49
Figura 14 - Configurações de conexão entre fibra ótica e central DTS utilizadas neste trabalho	50
Figura 15 - Comparação de dados crus e dados com calibração secundária, para a campanha de verão e trecho de montante.	53
Figura 16 - Visão geral das metodologias utilizadas para diferenciação da origem dos fluxos na zona hiporreica.....	55
Figura 17 - Dados de temperatura do ar, monitorados pela Estação Monte Alegre, para os períodos das campanhas de Outono (1) e Outono (2)	58

Figura 18 - Dados de temperatura do ar, monitorados pela Estação Monte Alegre, para os períodos das campanhas de Inverno (1) e Inverno (2).....	59
Figura 19 - Dados de temperatura do ar, monitorados pela Estação Monte Alegre, para os períodos das campanhas de Primavera e Verão.....	60
Figura 20 - Heatmaps de todas as campanhas, para o trecho de jusante. Versões ampliadas destas imagens podem ser vistas no Apêndice A	67
Figura 21 - Heatmaps de todas as campanhas, para o trecho de montante. Versões ampliadas destas imagens podem ser vistas no Apêndice A	68
Figura 22 - Comparação de dados de diferentes estações, para o trecho de jusante. Cada gráfico representa um determinado horário, enquanto cada linha representa uma estação do ano	74
Figura 23 - Comparação de dados de diferentes estações, para o trecho de montante. Cada gráfico representa um determinado horário, enquanto cada linha representa uma estação do ano	75
Figura 24 - Gráficos de linha comparando dados monitorados, em diferentes horários, durante a campanha de Inverno (1) e Inverno (2). Primeira linha exibe dados para o trecho de montante enquanto a segunda linha apresenta para o trecho de jusante.	80
Figura 25 - Gráficos de linha comparando dados monitorados, em diferentes horários, durante a campanha de Primavera. Primeira linha exibe dados para o trecho de montante enquanto a segunda linha apresenta para o trecho de jusante.	82
Figura 26 - Gráficos de linha comparando dados monitorados, em diferentes horários, durante a campanha de Verão.. Primeira linha exibe dados para o trecho de montante enquanto a segunda linha apresenta para o trecho de jusante.	84
Figura 27 – Resumo da aplicação do primeiro teste Z aos dados de temperatura, separando as possíveis zonas de interação das demais zonas	91
Figura 28 - Critérios de exclusão aplicados aos resultados do primeiro teste.....	91
Figura 29 - Resumo da aplicação do segundo teste Z aos dados de temperatura, separando os fluxos de água profunda e os fluxos de água rasa.....	92
Figura 30 - Resultados do teste Z, para o trecho de jusante, para dados monitorados na campanha de (a) Inverno (1) e (b) Inverno (2)	95
Figura 31 - Resultados do teste Z, para o trecho de jusante, para dados monitorados na campanha de (a) Primavera e (b) Verão	96
Figura 32 - Resultados do teste Z, com limiar de rejeição modificado para (a) 55% para os dados de Primavera e (b) 100% para os dados de Inverno (2).....	100
Figura 33 - Processo de clusterização ilustrado	103
Figura 34 - Grupos esperados, com a aplicação dos algoritmos de clusterização aos dados de temperatura	106
Figura 35 - Clusterização resultante da aplicação do algoritmo k-means, a um conjunto de dados bi-dimensional. Os ícones em X representam os centróides definidos, enquanto as faixas coloridas indicam as áreas de cada cluster	107
Figura 36 - Exemplo de aplicação do algoritmo <i>agglomerative clustering</i> a um conjunto de sete elementos. A imagem ilustra o andamento das iterações: a primeira linha da	

imagem indica a interação inicial, com a união dos dois elementos mais próximos, formando o primeiro grupo. A segunda linha da imagem já demonstra iterações intermediárias, onde vários elementos já foram unidos em grupos maiores. Os dendrogramas (lado direito) exibem a hierarquia entre os grupos.	108
Figura 37 - Critérios de acoplamento entre os grupos formados pelo algoritmos de clusterização hierárquica: (a) Single-Linkage: distância entre os pontos mais próximos dos grupos; (b) Complete-Linkage: distância entre os pontos mais distantes dos grupos; (c) Average-Linkage: distância média entre todos os pontos pertencentes ao grupo; (d) Centroid-Linkage: distância entre os centroides do grupo.	109
Figura 38 - Verificação do número de clusters, para os dados de Inverno (1), usando ambos os algoritmos	112
Figura 39 - Verificação do número de clusters, para os dados de Inverno (2), usando ambos os algoritmos	113
Figura 40 - Verificação do número de clusters, para os dados de Outono (2), usando ambos os algoritmos	114
Figura 41 - Verificação do número de clusters, para os dados de Verão, usando ambos os algoritmos	116
Figura 42 - Verificação do número de clusters, para os dados de Outono (1), usando ambos os algoritmos	118
Figura 43 - Verificação do número de clusters, para os dados de Primavera, usando ambos os algoritmos	120
Figura 44 - Comparação da formação de clusters pelos algoritmos (a) K-means e (b) Agglomerative clustering, para os dados da campanha de Inverno (1), monitorados em diferentes horários do dia 06-07-2021, no trecho de jusante.....	123
Figura 45 - Comparação da formação de clusters pelos algoritmos (a) K-means e (b) Agglomerative clustering, para os dados da campanha de Inverno (2), monitorados em diferentes horários do dia 29-07-2021, no trecho de jusante.....	124
Figura 46 - Comparação da formação de clusters pelos algoritmos (a) K-means e (b) Agglomerative clustering, para os dados da campanha de Primavera, monitorados em diferentes horários do dia 08-12-2021, no trecho de jusante.....	126
Figura 47 - Comparação da formação de clusters pelos algoritmos (a) K-means e (b) Agglomerative clustering, para os dados da campanha de Verão, monitorados em diferentes horários do dia 25-01-2022, no trecho de jusante.....	128
Figura 48 - Comparação da formação de clusters pelos algoritmos (a) K-means e (b) Agglomerative clustering, para os dados da campanha de Outono (2), monitorados em diferentes horários do dia 05-05-2022, no trecho de jusante.....	130
Figura 49 - Resumo das análises realizadas e dos resultados esperados, a partir das observações dos valores estatísticos da temperatura da água e do ar	135
Figura 50 - Média e desvio padrão das temperaturas monitoradas na campanha de Outono (2), para o trecho de jusante (à esquerda) e montante (à direita).....	136
Figura 51- Amplitudes térmicas da água, em escala diária e em escala de campanha, para o monitoramento de Outono (2), para o trecho de jusante (à esquerda) e montante (à direita).....	140

Figura 52 - Resumo das análises realizadas e dos resultados esperados para a utilização da correlação cruzada, em dados de temperatura da água e do ar	150
Figura 53 - Correlação cruzada para a campanha de (a) Inverno (1) e (b) Verão, para o trecho de jusante	152
Figura 54 - Grandezas de interesse na análise conjunta dos sinais de temperatura do ar e da água e conclusões esperadas a partir de seus resultados.....	159
Figura 55 - Relação entre a condição de interação rio-aquífero, sinais de temperatura e parâmetros Ar e $\Delta\phi$	159
Figura 56 – Razão entre as amplitudes dos sinais de temperatura da água e do ar, para o trecho de jusante, para dados da campanha de (a) Inverno (1) e (b) Verão	165
Figura 57 - Hora de ocorrência das temperaturas máximas e tempo de retardamento (<i>lag-time</i>) entre os sinais de temperatura da água e do ar, para o trecho de jusante, com dados da campanha de (a) Inverno (1) e (b) Verão.....	168
Figura 58 - Comparação do comportamento dos sinais de temperatura da água e do ar, em diferentes zonas de interação rio-aquífero, para os dados para a campanha de Inverno (1), levantados entre 05 e 06 de julho de 2021 para o trecho de jusante.....	173
Figura 59 - Resumo da aplicação do teste de causalidade Granger e das conclusões esperadas.....	179
Figura 60 - Resultados do teste de causalidade de Granger, para o trecho de jusante, para dados monitorados na campanha de (a) Verão e (b) Outono (2).....	181
Figura 61 - Resultados do teste de causalidade de Granger, para o trecho de jusante, para dados monitorados na campanha de (a) Inverno (1) e (b) Inverno (2)	183

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Posição das faixas de anomalia de temperatura, para o trecho de jusante	70
Tabela 2 - Posição das anomalias de temperatura, para o trecho de jusante	71
Tabela 3 - Faixas de valores de desvio padrão e de amplitude térmica que separam as zonas de interação, a partir dos dados monitorados no trecho de jusante	143
Tabela 4 - Faixas de valores de desvio padrão e de amplitude térmica que separam as zonas de interação, a partir dos dados monitorados no trecho de jusante	144
Tabela 5 - Faixas de valores observados para o coeficiente de correlação relativa máxima e o respectivo deslocamento relativo das séries, em cada uma das zonas de interação, em cada uma das campanhas de monitoramento realizadas.....	154
Tabela 6 - Períodos representativos utilizados para a análise dos sinais de temperatura	161
Tabela 7 - Faixas de valores observados para a razão entre as amplitudes e o tempo de retardamento dos sinais de temperatura, em cada uma das zonas de interação, em cada uma das campanhas de monitoramento realizadas	171
Tabela 8 - Períodos avaliados com o Teste de Granger em cada uma das campanhas de monitoramento.....	178

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BFI – *Base Flow Index* (índice de escoamento de base, em tradução livre)

CAE - zonas de cabo exposto ao ar

CLARANS - *Clustering Large Applications based on RANdomized Search*

DBSCAN - *Density Based Spatial Clustering of Applications with Noise*

DTS – *Distributed Temperature Sensing* (medição distribuída de temperatura, em tradução livre)

OPTICS - *Ordering Points to Identify the Clustering Structure*

ZAP - zonas de água profunda (ou GIZ: *groundwater inflow zones*),

ZAR - zonas de água rasa (ou HIZ: *hyporreic inflow zones*)

LISTA DE SÍMBOLOS

A_r : razão entre as amplitudes dos sinais de temperatura da água e do ar (*amplitude ratio*);

A_w : amplitude do sinal de temperatura da água;

A_{air} : amplitude do sinal de temperatura do ar.

$\Delta\phi$: tempo de retardamento entre os sinais de temperatura da água e do ar (*lag-time* ou *phase-lag*).

ϕ_w : ângulo de fase, para a função trigonométrica obtida a partir dos dados de temperatura da água, monitorados em determinado ponto.

ϕ_{air} : ângulo de fase, para a função trigonométrica obtida a partir dos dados de temperatura do ar.

$^{\circ}\text{C}$: graus Celsius;

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	20
1.1 Aspectos iniciais	20
1.2 Hipóteses	22
1.3 Objetivos	23
1.4 Estrutura do trabalho.....	24
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	26
2.1 Interação rio-aquífero	26
2.2 Dispositivos de medição distribuída de temperatura	30
2.3 Aplicações do DTS em estudos de interação rio-aquífero.....	32
2.4 A temperatura como traçador da interação rio-aquífero	35
3 METODOLOGIA.....	40
3.1 Área de estudo	40
3.2 Dados de temperatura do ar	42
3.3 Implementação da medição distribuída de temperatura em campo.....	43
3.4 Campanhas de medição de temperatura realizadas.....	47
3.5 Análise de dados.....	51
4 DADOS DE TEMPERATURA DO AR	56
5 IDENTIFICAÇÃO VISUAL: USO DE HEATMAPS E GRÁFICOS DE LINHA PARA CARACTERIZAÇÃO DA INTERAÇÃO RIO-AQUÍFERO, A PARTIR DE DADOS DE TEMPERATURA.....	61
5.1 Introdução	61
5.2 Metodologia implementada.....	62
5.3 Resultados.....	64
5.3.1 Mapas de calor (Heatmaps).....	64
5.3.2 Gráficos de linha.....	73
5.4 Conclusões	85
6 VARIAÇÕES ESPACIAIS: APLICAÇÃO DE TESTES ESTATÍSTICOS E ALGORITMOS DE CLUSTERIZAÇÃO PARA DIFERENCIAÇÃO DOS FLUXOS.....	88
6.1 O teste z como ferramenta de diferenciação dos fluxos	88
6.1.1 Metodologia utilizada	90
6.1.2 Resultados.....	94

6.1.3 Conclusões	102
6.2 Algoritmos de clusterização	103
6.2.1 Introdução	103
6.2.2 Metodologia utilizada	106
6.2.3 Resultados	111
6.2.4 Conclusões	131
7 RELAÇÕES ENTRE TEMPERATURA DA ÁGUA E TEMPERATURA DO AR COMO ESTRATÉGIA DE CLASSIFICAÇÃO DE FLUXOS.....	132
7.1 Introdução	132
7.2 Observação das amplitudes, médias e desvios padrões	134
7.2.1 Metodologia	134
7.2.2 Resultados	135
7.2.3 Conclusões	145
7.3 Correlação cruzada.....	147
7.3.1 Contextualização e metodologia	147
7.3.2 Resultados	151
7.3.3 Conclusões	157
7.4 Razão entre as amplitudes e tempo de retardamento (<i>lag-time</i>) entre os sinais de temperatura	158
7.4.1 Contextualização e metodologia	158
7.4.2 Resultados	164
7.4.3 Conclusões	174
7.5 Teste de causalidade de Granger.....	176
7.5.1 Contextualização e metodologia	176
7.5.2 Resultados	179
7.5.3 Conclusões	185
8 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	186
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	192
APÊNDICE A – HEATMAPS PRODUZIDOS A PARTIR DOS DADOS DE TEMPERATURA MONITORADOS.....	206
APÊNDICE B – GRÁFICOS DE LINHA AMPLIADOS	218
APÊNDICE C – RESULTADOS GRÁFICOS DO TESTE Z COMO FERRAMENTA DE DIFERENCIAÇÃO DOS FLUXOS	229
APÊNDICE D – RESULTADOS GRÁFICOS DA APLICAÇÃO DOS ALGORITMOS DE CLUSTERIZAÇÃO.....	236
APÊNDICE E – RESULTADOS GRÁFICOS DA OBSERVAÇÃO DE AMPLITUDES, MÉDIAS E DESVIOS PADRÃO DE TEMPERATURA	252

APÊNDICE F – RESULTADOS GRÁFICOS DA CORRELAÇÃO CRUZADA	266
APÊNDICE G – RESULTADOS GRÁFICOS DA RAZÃO ENTRE AS AMPLITUDES E O TEMPO DE RETARDAMENTO ENTRE OS SINAIS DE TEMPERATURA	272
APÊNDICE H – RESULTADOS GRÁFICOS DO TESTE DE GRANGER	289

1 INTRODUÇÃO

1.1 Aspectos iniciais

As águas superficiais e as águas subterrâneas não podem ser consideradas como componentes isoladas do ciclo hidrológico, uma vez que se encontram em constante interação (WINTER et al., 1999; SOPHOCLEOUS, 2002). Destaca-se especialmente a troca de água de diferentes origens que ocorre na zona hiporreica (GOOSEFF, 2010; WARD, 2016; LEWANDOWSKI et al., 2019), que permite a manutenção dos cursos superficiais perenes e a recarga de aquíferos menos profundos, influenciando diretamente na disponibilidade de água subterrânea. Compreender e quantificar os fluxos que ocorrem na interação rio-aquífero ainda é um desafio para a hidrologia, apesar da existência de diferentes métodos para esta determinação na literatura (SOPHOCLEOUS, 2002; KALBUS et al., 2006; BLÖSCHL et al., 2019).

A movimentação de água subterrâneas induz ao transporte de calor por advecção, afetando a distribuição de temperatura subsuperficial, que em situações comuns, seria dominado pelo transporte por condução (KURYLYK et al., 2018). Neste mesmo sentido, nos últimos anos, as diferenças de temperatura em águas de origens distintas têm chamado a atenção dos pesquisadores, especialmente para uso como traçador natural no estudo de fenômenos ligados à hidrologia (CONSTANTZ et al., 2003; ANDERSON, 2005; CONSTANTZ, 2008). Destacam-se especificamente trabalhos relativos à avaliação da interação rio-aquífero (LOWRY et al., 2007; YAO et al., 2015), da evapotranspiração (EUSER et al., 2014), da umidade do solo (SAYDE et al., 2010; STEELE-DUNNE et al., 2010; STRIEGL e LOHEIDE, 2012; CAO et al., 2016), e da percolação em meios porosos saturados (YAN et al., 2015).

O avanço da tecnologia de medição distribuída de temperatura, comumente indicada pela sigla em inglês DTS (*Distributed Temperature Sensing*), também contribuiu para o estabelecimento de diversas pesquisas, envolvendo a água e as variações de temperatura. Este tipo de medição de temperatura utiliza cabos de fibra ótica como sensores distribuídos ao longo de uma determinada extensão na qual deseja-se averiguar a variação de temperatura. Desta forma, é possível a verificação contínua das flutuações desta propriedade, em termos espaciais e temporais, evitando as limitações da medição por sensores pontuais (SELKER et al., 2006a; SELKER et al., 2006b; TYLER et al., 2009; SAAR, 2011; SCHENATO, 2017).

No contexto da interação rio-aquífero, quando avaliada em cursos superficiais, os cabos de fibra ótica são instalados sobre o fundo do canal, de forma a detectar as variações de temperatura, na interface entre a superfície e o meio subterrâneo. Anomalias pontuais de temperatura, que podem ser caracterizadas por regiões mais quentes ou mais frias, a depender da estação do ano, podem ser indicativas da ocorrência da interação rio-aquífero (LOWRY et al., 2007; MATHESWARAN et al., 2013; YAO et al., 2015).

Apesar do poder de identificação da interação rio-aquífero pelos dispositivos DTS, quando implementados no fundo do canal, comumente são aplicadas metodologias complementares para a quantificação das taxas de troca entre as duas origens. A medição da temperatura em subsuperfície, utilizando sensores pontuais ou a medição distribuída, é uma das de maior destaque neste contexto. Medições únicas (BREDEHOEFT e PAPADOPOULOS, 1965; ARRIAGA e LEAP, 2006; ANIBAS et al., 2009; KURYLYK et al., 2018) ou a análise de séries temporais de temperatura em diferentes profundidades (LAPHAM, 1989; HATCH et al., 2006; KEERY et al., 2007; MCCALLUM et al., 2012; LUCE et al., 2013), conciliadas com soluções analíticas da equação de transporte de calor em meios saturados (SUZUKI, 1960; STALLMAN, 1965), permitem a obtenção de resultados confiáveis para estas taxas de troca.

Adicionalmente, no contexto da interação rio-aquífero, a temperatura aparece como ferramenta de classificação de fluxos na zona hiporreica. Esta classificação visa diferenciar a origem da água subterrânea, em termos de profundidade e a respectiva contribuição líquida para a vazão do curso d'água superficial (KURYLYK et al., 2015, YAO et al., 2015, HARE et al., 2021). Águas de origem mais profunda (superiores a 6 metros, MAXWELL e KOLLET, 2008) tendem a efluir com temperaturas mais estáveis, pouco influenciadas pela temperatura do ar e gerando contribuição efetiva ao meio superficial. As águas mais rasas podem se misturar a zona hiporreica e efluírem novamente ao meio superficial alguns metros a jusante do rio. Suas temperaturas podem gerar anomalias (regiões quentes ou frias), mas tendem a apresentar uma maior proximidade com as temperaturas ambientes. Assim, a análise conjunta da temperatura da água e da temperatura do ar podem fornecer subsídios para a classificação dos fluxos, contribuindo para a melhor compreensão dos regimes termais de rios e cursos superficiais. Em consequência, a indicação de regiões de interação de águas de diferentes origens e características, permite avaliar as diferentes respostas à contaminantes, às mudanças climáticas e às mudanças de solo (COZZARELLI et al., 2020; THOMPSON et al., 2020).

No contexto do Sistema Aquífero Guarani (SAG), a interação rio-aquífero foi quantificada indiretamente, considerando diferentes metodologias, tais como o balanço hídrico, a análise da flutuação de nível de água nos poços e modelagem numérica (CONTIN NETO, 1987; POMPEO, 1990; MILANI, 1992; BARRETO, 2006; WENDLAND, BARRETO e GOMES, 2007; GOMES, 2008; HOMOBOÑO, 2009; MALDONADO, 2009; GUANABARA, 2011; LUCAS, 2012; MELO, CABRERA e WENDLAND, 2017; COUTINHO, 2019; CALIXTO, 2020). De forma direta, as taxas de troca foram avaliadas a partir do uso de infiltrômetros (ARANTES, 2003; ARANTES et al., 2006) e por meio da análise de séries históricas de vazão de base e respectiva relação com as áreas de possível interação (ROSA, 2018). Porém, é necessário o aprimoramento constante da análise destes resultados, por meio de metodologias adicionais, mais recentes e robustas, que aumentem a confiabilidade dos diferentes métodos.

De forma geral, nota-se que o uso da temperatura como traçador em áreas tropicais ainda é escasso, mesmo considerando o avanço das tecnologias de medição distribuída. Wendland et al. (2022) realizaram, em 2017, uma campanha utilizando um dispositivo DTS, de forma a detectar os locais de interação rio-aquífero em uma bacia inserida em área de afloramento do SAG. Anomalias de temperatura permitiram a identificação da interação rio-aquífero de forma efetiva em uma área tropical. Porém, tal levantamento de dados foi pontual e não permitiu uma verificação da sazonalidade da interação entre as águas de diferentes origens, assim como a classificação dos fluxos.

Assim, o uso da temperatura como traçador natural surge como uma ferramenta oportuna e interessante para o monitoramento da ocorrência e quantificação da interação rio-aquífero em áreas tropicais, inseridas em regiões de afloramento de um aquífero de importância transnacional.

1.2 Hipóteses

Considerando este contexto, as hipóteses formuladas para justificar o desenvolvimento desta tese são:

- (i) A temperatura e o transporte de calor, incentivados pelo desenvolvimento da tecnologia relacionada à medição distribuída de temperatura, podem ser utilizados como traçadores naturais para a avaliação da sazonalidade da interação rio-aquífero, em áreas tropicais;

- (ii) Os pontos de interação rio-aquífero, ao longo de um curso superficial podem ou não apresentar comportamento estacionário, em termos espaciais e temporais; e a medição de temperatura distribuída aplicada em diferentes épocas do ano pode ser uma ferramenta interessante para esta verificação;
- (iii) Os pontos de descarga de águas subterrânea nos cursos superficiais tropicais, identificados com o uso de medição distribuída de temperatura, podem ser caracterizados localmente pela presença de regiões quentes, nos períodos mais frios do ano; e pela presença de regiões frias, nos períodos mais quentes do ano; considerando a mudança da temperatura do ar ao longo do ano.
- (iv) A combinação de diferentes técnicas de visualização e agrupamento de dados, em conjunto com análises estatísticas, em séries temporais de temperatura da água de rios, permite a classificar os fluxos existentes na zona hiporreica e da ocorrência da interação rio-aquífero.
- (v) É possível estabelecer métricas, a partir das análises realizadas, que indiquem a origem da água subterrânea que participa da interação rio-aquífero, em termos de profundidade (águas rasas x águas profundas).

1.3 Objetivos

O objetivo geral desta tese é avaliar o potencial do uso da temperatura como ferramenta de identificação e caracterização da interação rio aquífero, em uma bacia hidrográfica tropical, inserida em região de afloramento do Sistema Aquífero Guarani (SAG).

São objetivos específicos:

- (i) Identificar e caracterizar os pontos de interação entre águas superficiais e águas subterrâneas, a partir das variações temporais e espaciais nos padrões de temperatura da água, medidas a partir de um dispositivo do tipo DTS;
- (ii) Combinar o uso de diferentes técnicas de visualização, análise estatística e de agrupamento de dados, para classificação dos fluxos na zona hiporreica;

- (iii) Verificar como a sazonalidade da temperatura ambiente, trazida pelas estações do ano, modifica a identificação e a classificação da interação rio-aquífero;
- (iv) Estabelecer métricas de referência iniciais para a classificação dos fluxos na zona hiporreica, em áreas tropicais e para o Sistema Aquífero Guarani (SAG), baseados em dados de temperatura.

1.4 Estrutura do trabalho

O texto desta tese de doutorado está dividido em 8 capítulos, a saber:

Capítulo 1 – Introdução: apresenta uma breve introdução ao tema, destacando sua relevância na literatura e a importância deste estudo para áreas tropicais. Em seguida, são apresentadas as hipóteses e os objetivos propostos para a tese.

Capítulo 2 – Revisão bibliográfica: apresenta aspectos importantes para contextualização e compressão do tema abordado na tese, especialmente ao que se refere à interação rio-aquífero, à tecnologia de medição distribuída de temperatura, com o uso de cabos de fibra ótica; além do seu uso em estudos de interação rio-aquífero e de como a temperatura pode ser ferramenta para a caracterização deste fenômeno e a diferenciação da origem dos fluxos.

Capítulo 3 – Metodologia: apresenta uma visão geral dos materiais e métodos utilizados durante este trabalho, detalhando a área de estudo onde a temperatura foi monitorada, a forma e a distribuição da coleta de dados, os equipamentos utilizados e a calibração secundária dos dados. Adicionalmente, explana-se rapidamente as análises de dados propostas para a diferenciação de fluxos, com base na temperatura.

Capítulo 4 – Dados de temperatura do ar: apresenta o recorte dos dados de temperatura do ar monitorados na área de estudo, que são importantes para a análise e compreensão dos resultados observados nos capítulos subsequentes.

Os capítulos 5, 6 e 7 reúnem aspectos metodológicos, resultados, discussões e conclusões das diferentes análises de dados propostas para os dados de temperatura monitorados, sendo divididos em:

Capítulo 5 – Uso da identificação visual de fluxos, a partir de dados de temperatura da água, para caracterização da interação rio-aquífero. A partir do uso de heatmaps e gráficos de linha, são definidos quais locais apresentam anomalias de temperatura e que indicam a troca de água na zona hiporreica. São visualizados a variação de

comportamento destas regiões, em termos espaciais e temporais, indicando como a temperatura como traçador pode se comportar em áreas tropicais.

Capítulo 6 – Variações espaciais de temperatura da água: uso de testes estatísticos e algoritmos de clusterização para diferenciação dos fluxos. Utiliza-se o teste z e dois algoritmos não-supervisionados (*K-means* e *Agglomerative clustering*) para agrupamento dos dados e classificação dos dados de temperatura da água, buscando diferenciar quais locais com contraste de temperatura representam fluxos de áreas profundas e quais representam fluxos de águas rasas.

Capítulo 7 – Relações entre temperatura da água e a temperatura do ar, em que se apresenta a análise conjunta dos dados de temperatura com os dados de temperatura do ar, visando compreender como sua conexão pode ser útil para a classificação dos fluxos na zona hiporreica. São utilizadas métricas baseadas em dados estatísticos de ambas as séries temporais; baseadas na correlação cruzada; no levantamento da amplitude e do tempo de retardamento dos sinais; além da aplicação do Teste de causalidade de Granger.

Capítulo 8 – Conclusões e recomendações futuras: apresenta um desfecho geral do trabalho, retomando e relacionando as conclusões obtidas com as diferentes metodologias e indicando algumas recomendações para trabalhos futuros.

Ao final, a seção Referências Bibliográficas apresenta a lista de todos os trabalhos citados no desenvolvimento deste texto.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Interação rio-aquífero

O termo interação rio-aquífero pode ser usado, de forma simplificada, para identificar a troca de água entre diferentes origens, que comumente ocorre nos cursos d'água superficiais. Tal interação ocorre uma vez que águas superficiais e águas subterrâneas não são parcelas isoladas no ciclo hidrológico e estão em constante contato, que comumente se evidencia nos pontos mais baixos de uma bacia hidrográfica. (WINTER et al., 1999; WOESSNER, 2000; SOPHOCLEOUS, 2002)

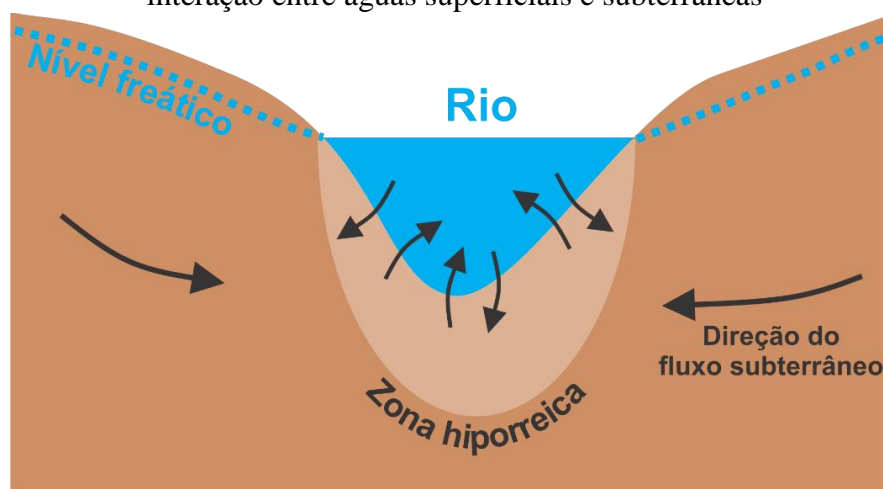
As origens das águas que participam desta interação se referem: (i) à água oriunda do escoamento superficial (também indicada como escoamento direto), resultante de eventos de chuva e/ou derretimento de neve, e que prontamente ingressaram no curso superficial, ao longo de toda a área de drenagem da bacia hidrográfica; (ii) à água subterrânea, que infiltrou após a ocorrência de eventos chuvosos, percolou pela zona não-saturada e foi armazenada na zona saturada das formações ao redor do curso superficial. Lentamente, esta água ingressa no curso superficial e mantém o seu fluxo permanente, durante os períodos sem eventos de entrada de água, formando o chamado escoamento de base. (WINTER et al., 1999; SOPHOCLEOUS, 2002)

A interação rio-aquífero ocorre comumente na zona hiporreica (Figura 1), região localizada em subsuperfície, abaixo da parte visível de água do curso superficial (GOOSEFF, 2010; WARD, 2016; LEWANDOWSKI et al., 2019). Esta zona tem importância não só somente no aspecto quantitativo, uma vez que seu monitoramento é que permite a determinação das trocas de água existentes; mas também no aspecto qualitativo e eco-hidrológico, uma vez uma intensa atividade biogeoquímica ocorre nesta região, regulada pela ocorrência de interação entre as águas. Em virtude disso, variações nos níveis de oxigênio dissolvido, pH e nutrientes disponíveis são verificadas, influenciando na presença de diferentes espécies aquáticas, tais como algas, micro e macro invertebrados, insetos e peixes (MCCLAIN et al., 2003; HUNT et al., 2006; BOANO et al., 2014; CARDENAS, 2015).

A interação rio-aquífero pode apresentar duas condições, em função da direção do escoamento: (i) a condição efluente e (ii) a condição influente. A condição efluente ocorre quando a água subterrânea contribui ao curso d'água superficial (Figura 2a), enquanto a condição influente consiste na contribuição da água superficial ao escoamento subsuperficial. Esta última condição pode ocorrer com a existência de conexão hidráulica

entre rio e aquífero (Figura 2b) ou mesmo com o rio desconectado hidraulicamente do aquífero, havendo assim uma zona insaturada entre eles (Figura 2c). Temporariamente, a condição influente pode ocorrer, a partir do aumento do nível de água superficial, que supera o nível de água subterrâneo e inverte o sentido do escoamento (Figura 2d). Desta forma, ocorre um armazenamento temporário de água nas margens, até infiltrar na subsuperfície, recarregando o aquífero, até a redução do rio ao seu nível normal. (WINTER et al., 1999; SOPHOCLEOUS, 2002)

Figura 1 - Esquema representativo da zona hiporreica como região de ocorrência da interação entre águas superficiais e subterrâneas



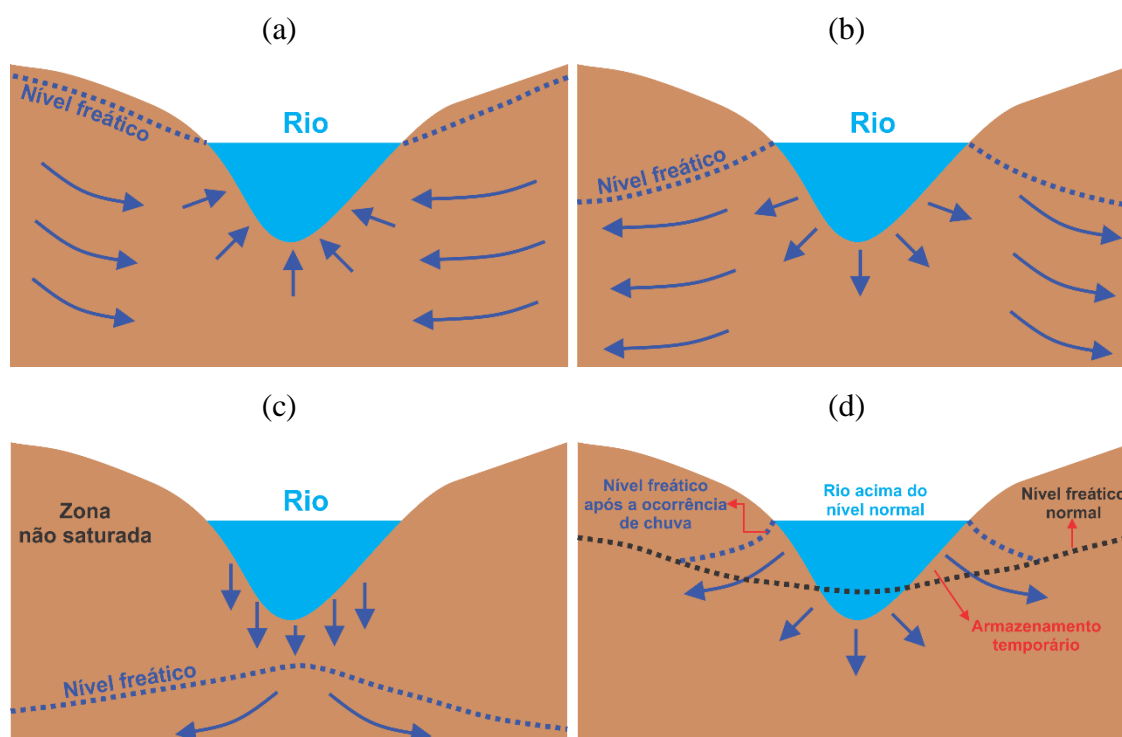
Fonte: Adaptado de Willians (1993)

Um rio pode assumir a condição efluente, a condição influente ou mesmo as duas condições, em diferentes trechos ou épocas do ano. As variações dos níveis freáticos, que tendem a aumentar em períodos chuvosos e diminuir em períodos secos, podem induzir mudanças no sentido de escoamento da interação, alterando a condição ocorrida (SOPHOCLEOUS, 2002). Os processos de erosão e deposição de sedimentos, estimulados por alterações no regime de escoamento superficial, podem alterar a condutividade hidráulica nos pontos de interação, alterando a intensidade do fluxo entre os dois meios (WINTER et al., 1999). O crescimento de biofilmes no fundo de canais também é um fator modificador da condutividade hidráulica da interface rio-aquífero (BATTIN e SENGSCHEMITT, 1999; ULRICH et al., 2015).

A natureza da interação rio-aquífero também se relaciona diretamente com a classificação dada aos rios, em função da ocorrência de escoamento superficial ao longo do tempo. Nesta classificação, definem-se três categorias: (i) rios perenes; (ii) rios intermitentes (ou temporários); (iii) rios efêmeros. Os rios perenes são aqueles que

apresentam escoamento de base contínuo ao longo de todo o ano, garantido a partir de uma condição predominantemente efluente ao longo de seu curso. Já os rios intermitentes são aqueles que apresentam escoamento de base apenas em algumas épocas do ano, variando entre uma condição efluente e influente, a depender da estação. Já os rios efêmeros são aqueles que aparecem apenas durante a ocorrência de chuvas, alimentados exclusivamente pelo escoamento superficial gerado a partir de sua área de drenagem. Neste caso, estes rios apresentam condição exclusivamente influente, quando apresentam escoamento (SOPHOCLEOUS, 2002)

Figura 2 - Condições de ocorrência da interação rio-aquífero: (a) condição efluente; (b) condição influente, em rio hidráulicamente conectado; (c) condição influente, em rio hidráulicamente desconectado; (d) condição influente temporária, em eventos chuvosos



Fonte: Adaptado de Winter et al. (1999)

A interação rio-aquífero também pode ser alterada por intervenções humanas, especialmente a partir do bombeamento de águas subterrâneas de aquíferos pouco profundos. Este tipo de intervenção altera o equilíbrio dinâmico existente no fluxo subterrâneo, que naturalmente abasteceria o curso d'água mais próximo. A depender da vazão bombeada, da quantidade de poços instalados e o do nível de rebaixamento causado por esta interferência antrópica, o fluxo pode se inverter, com as águas superficiais recarregando o aquífero, forçados pela retirada de água em um poço. Tal fato pode

resultar em uma redução na vazão superficial do rio e afetar o abastecimento de localidades a jusante do local de instalação destes poços. A qualidade da água subterrânea também pode ser afetada, uma vez que contaminantes presentes na água superficial podem se mover para o interior do aquífero. (BRUNKE e GOSNER, 1997; WINTER et al., 1999; SOPHOCLEOUS, 2002)

No que se refere ao monitoramento e a medição das taxas de interação rio-aquífero, diversos métodos estão presentes na literatura. Todos eles apresentam limitações e incertezas, sendo que em geral se recomenda o uso conjunto de vários métodos em um mesmo estudo de forma a reduzir possíveis erros (ROSENBERRY e LABAUGH, 2008; COOK, 2013). As técnicas de medição direta da interação rio-aquífero podem ser classificadas nas seguintes categorias (KALBUS et al., 2006):

- (i) medição direta de fluxo, que inclui o uso de infiltrômetros e suas diversas variações;
- (ii) métodos baseados na Equação de Darcy, que necessitam da determinação/conhecimento de diferentes variáveis, como o gradiente hidráulico, a condutividade hidráulica, a porosidade e a velocidade da água subterrânea;
- (iii) métodos baseados no balanço de massa, que incluem medições de vazão em seções sucessivas do rio, a análise da série histórica de vazões e a separação da vazão de base por diferentes técnicas, além do uso de traçadores ambientais (isótopos e traçadores geoquímicos), corantes e solutos;
- (iv) métodos baseados na temperatura como traçador, a partir da análise pontual das variações térmicas que ocorrem, em subsuperfície, e mais recentemente, com o uso de dispositivos de medição distribuída de temperatura.

Adicionalmente a tais métodos, também são observados estudos utilizando modelagem numérica (PANICONI e PUCCI, 2015) como ferramenta para avaliação da troca de entre águas superficiais e subterrâneas. Porém, tais modelos ainda não incorporam totalmente a complexidade envolvida na interação rio-aquífero, uma vez que este fenômeno é muitas vezes simplificado e analisado de forma secundária (PARTIGNON et al., 2017). O uso de técnicas de sensoriamento remoto neste contexto também é emergente (MARCUS e FONSTAD, 2008; CARBONNEAU e PIÉGAY, 2012;

HARPOLD et al., 2015). Porém, ainda há a necessidade de melhor resolução e frequência dos satélites para o melhor mapeamento das áreas de interação (COOK, 2017).

Revisões amplas de todos estes métodos são apresentadas por Kalbus et al. (2006), Brodie (2007), Rosenberry e LaBaugh (2008) e Brunner et al. (2017), aos quais o leitor é referenciado para mais detalhes. Considerando que, neste trabalho, a temperatura será utilizada como ferramenta para avaliação da interação rio-aquífero, um maior destaque será dado a esta metodologia nos próximos tópicos. Inicialmente, apresenta-se os aspectos básicos relativos a medição distribuída de temperatura e as respectivas aplicações em estudos de interação rio-aquífero. Em seguida, aborda-se a relação entre a temperatura como ferramenta de identificação e caracterização do fenômeno de interação rio-aquífero.

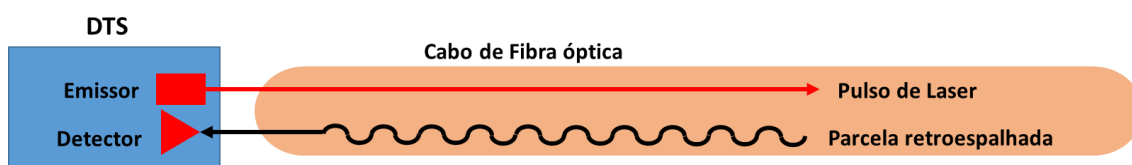
2.2 Dispositivos de medição distribuída de temperatura

A medição de temperatura distribuída (indicada comumente pela sigla em inglês DTS – Distributed Temperature Sensing) consiste em uma tecnologia desenvolvida na década de 1980 e aplicada em estudos hidrológicos ao longo dos últimos 16 anos, que permite a obtenção de dados de temperatura em uma resolução espacial e temporal melhor do que as dos dispositivos de medição pontual (LOWRY et al., 2007). Os dispositivos DTS utilizam cabos de fibra ótica como sensores de temperatura, sendo instalados ao longo de uma determinada extensão (SELKER et al., 2006a). Tais cabos são percorridos, em todo o seu comprimento, por pulsos de laser, emitidos a partir de um equipamento central (Figura 3). Parte destes pulsos retornam a origem, com diferentes comprimentos de onda e intensidades, em virtude do fenômeno de retroespalhamento ou retrodifusão. Duas parcelas retroespalhadas são detectadas pelo equipamento central e permitem a determinação da temperatura ao longo da fibra ótica: a parcela de maior comprimento de onda (Stokes) e a parcela de menor comprimento de onda (anti-Stokes). Enquanto a primeira é pouco influenciada pela temperatura, a segunda sofre maiores variações conforme a temperatura externa do cabo é alterada. A relação entre estas parcelas, em conjunto com alguns coeficientes de calibração, permite a determinação da temperatura em um trecho do cabo de fibra ótica. A posição deste dado, em relação ao comprimento do cabo, é dada a partir do tempo necessário para o retorno do sinal ao detector, desde a sua emissão.

No contexto de uso dos dispositivos DTS, duas definições são importantes de serem diferenciadas, mesmo sendo diretamente relacionadas: o intervalo de amostragem e a resolução espacial do equipamento. O intervalo de amostragem diz respeito ao

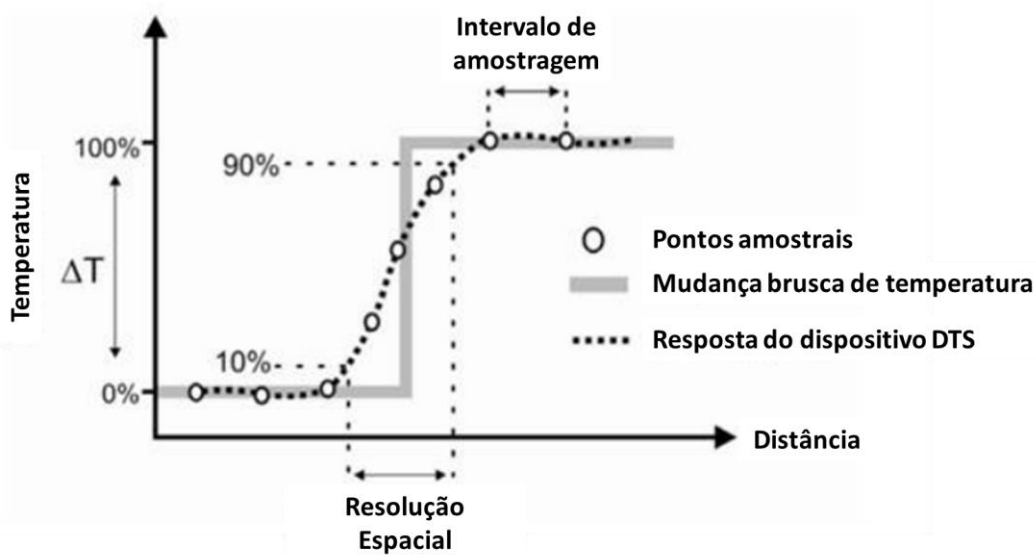
espaçamento entre os pontos no qual um dado de temperatura é integralizado e fornecido, em termos de pontos amostrais. Nos dispositivos atuais, este intervalo é baixo, chegando a dimensões de 12,5 (Silixa Ultima DTS) a 25 cm (Silixa XT-DTS) (SILIXA, 2023). Já a resolução espacial do equipamento consiste na distância entre as posições onde 10% e 90% de uma mudança brusca de temperatura, inserida no sistema, é identificada. Os mesmos dispositivos citados atingem resoluções espaciais de 35 (Silixa Ultima DTS) a 65 cm (Silixa XT-DTS) (SILIXA, 2019). Tipicamente, a resolução espacial é 2 a 5 vezes superior ao intervalo de amostragem do dispositivo (WANG et al., 2017). A Figura 4 ilustra tais conceitos para melhor entendimento.

Figura 3 - Esquema ilustrativo de funcionamento de um dispositivo de medição de temperatura distribuída



Fonte: Adaptado de Yao et al. (2015)

Figura 4 – Diferença entre intervalo de amostragem e resolução espacial de um dispositivo DTS



Fonte: Adaptado de Wang et al. (2017)

O comprimento total do cabo de fibra óptica utilizado, o intervalo de tempo em que o dado é fornecido e a precisão da temperatura lida na instalação são variáveis que se relacionam diretamente, no momento do uso de dispositivos deste tipo. Geralmente, os

fabricantes fornecem gráficos, em que o usuário pode estimar a precisão de seus dados, de acordo com a extensão do cabo e o intervalo definido. Considerando um dos equipamentos da marca SensorNet (2023), é possível, com uma extensão de cabo de 10 km e dados de temperatura lidos a cada 5 minutos, obter uma precisão de $\pm 0,03^{\circ}\text{C}$.

Com estas características, os dispositivos DTS permitem a obtenção de dados contínuos de temperatura, em termos temporais e espaciais, o que seria inviável com sensores pontuais, em virtude da quantidade de dispositivos necessária. Neste sentido, a caracterização de processos hidrológicos, que tenham relação com flutuações de temperatura, foi facilitada e ficou em destaque nos últimos anos, com a realização de diversos trabalhos, em diferentes componentes hidrológicas.

Diversos trabalhos publicados apresentam mais detalhes técnicos sobre o uso e a instalação de dispositivos DTS. Destacam-se como estudos clássicos e de vanguarda os trabalhos de Selker et al. (2006a, 2006b) e Tyler et al. (2009), que apresentam a teoria básica de sinais em cabos de fibra ótica e a respectiva detecção de temperatura, além de aplicações gerais em problemas de hidrologia; assim como Hausner et al. (2011), que apresentam as principais formas de instalação e de calibração de dispositivos DTS.

2.3 Aplicações do DTS em estudos de interação rio-aquífero

Apesar de estudos relacionados ao uso da temperatura como traçador natural de fenômenos hidrológicos serem realizados desde a década de 1960 (STALLMAN, 1960; BREDEHOEFT e PAPADOPULOS, 1965), notou-se nos últimos anos um resgate do uso desta propriedade física na investigação de componentes do ciclo da água, especialmente pela redução de custos na medição pontual de temperatura e o desenvolvimento da medição de temperatura distribuída, com o uso de cabos de fibra ótica.

Dos estudos mais recentes, aquele que é considerado responsável por esta retomada é o de Anderson (2005), que apresenta uma revisão teórica ampla das aplicações do transporte de calor na avaliação da presença de água em meios subterrâneos, favorecendo a realização de estudos específicos. Seguindo esta mesma ideia, Selker et al. (2006b) foram pioneiros em difundir as possibilidades de utilização da fibra ótica como sensor de temperatura para monitoramento de sistemas hidrológicos, apresentando alguns aspectos teóricos da propagação de sinal neste tipo de cabos, principais vantagens e desvantagens deste uso, além de alguns exemplos de aplicação em casos reais. Tyler et al. (2009) também mostraram aspectos importantes no que tange a aplicação de sistemas

DTS em hidrologia, destacando especialmente os pontos de preocupação que o usuário deste tipo de tecnologia deve ter no momento de sua implementação.

No que tange aos estudos de interação rio-aquífero, Selker et al. (2006a) também foram precursores, ao utilizarem um sistema DTS para análise da dinâmica das águas superficiais e a sua relação com as águas subterrâneas, em uma bacia hidrográfica em Luxemburgo. O referido estudo foi bem-sucedido ao conseguir identificar zonas de interação rio-aquífero, com base nas flutuações de temperatura; e de apresentar uma metodologia para quantificação do volume de água subterrânea descarregada no trecho avaliado, a partir de medições pontuais de vazão e o uso de equações de balanço de massa em um volume de controle, definido no entorno dos pontos de interação. Desta forma, esta componente passou a ser explorada, em conjunto com a medição de temperatura distribuída.

Mamer e Lowry (2013) compararam resultados de um modelo físico (sandbox) e de modelagem numérica para a determinação das taxas de interação rio-aquífero, a partir da avaliação da amplitude de temperatura em subsuperfície. Os dados de temperatura foram medidos por duas fibras óticas, instaladas paralelamente em diferentes profundidades. Os resultados se mostraram precisos em locais em que a descarga de água subterrânea é uniforme, o que mantém o perfil de temperatura também uniforme ao longo do plano horizontal. Quando esta descarga não é uniforme, o perfil de temperatura apresenta variações laterais, que induzem a erros na determinação das taxas calculadas, uma vez que o modelo é unidimensional.

Yao et al. (2015) utilizaram a medição distribuída de temperatura para avaliar a interação rio-aquífero, na bacia do Rio Heihe, no noroeste da China, região árida e de clima seco, que gera uma maior complexidade na análise desta interação. Diferentemente dos estudos anteriores, estes autores trabalharam em um curso superficial largo, com mais de 30 metros de distância entre as margens. Tal fato gera incertezas nos resultados, tanto com relação às vazões medidas, geralmente utilizadas para fins de comparação e validação; quanto na eficiência da detecção das flutuações de temperatura, que serão notadas apenas nas proximidades do local de instalação do cabo. As vazões de descarga de água subterrânea foram estimadas a partir da metodologia proposta por Selker et al. (2006a).

Todos os estudos de interação rio-aquífero previamente citados foram realizados em zonas temperadas, com campanhas de medição de temperatura curtas, em termos temporais, sempre inferiores a uma semana de duração. Analogamente, foi possível

observar que nestas áreas, a identificação dos locais de interação foi realizada por anomalias de temperatura mais frias, em relação aos cursos superficiais. Como as campanhas de medição de temperatura foram curtas, a possibilidade de alternância nessa condição nem sempre foi verificada.

É importante salientar que a temperatura da água subterrânea localizada em pequenas profundidades se aproxima do valor médio da temperatura do ar da região (NGWA, 2019). Assim, a depender da estação do ano em que as medições de temperatura da água são realizadas, os locais de interação podem ser identificados como regiões quentes ou frias (MATHESWARAN et al., 2013). Neste sentido, estudos de sazonalidade, envolvendo medições de temperatura em diferentes épocas do ano são interessantes, para caracterizar a temperatura e o uso da medição distribuída como ferramentas eficazes para o estudo da interação rio-aquífero.

No contexto de áreas tropicais, Wendland et al. (2022) realizaram o primeiro estudo da interação rio-aquífero com o uso de um sistema DTS. Foi possível observar a ocorrência de pontos quentes em um pequeno trecho do Ribeirão da Onça (SP, Brasil), além da determinação de gradientes de temperatura em subsuperfície, indicativos da descarga de água subterrânea. Apesar do caráter precursor, este trabalho foi realizado pontualmente, em período de inverno, sendo necessário estendê-lo para melhor compreensão da sazonalidade de fenômeno.

Em todos estes trabalhos, os autores buscaram apresentar as vantagens e desvantagens do uso de dispositivos DTS no estudo da interação rio-aquífero. Em geral, destaca-se como principal vantagem a possibilidade de medição contínua das variações de temperatura, espacial e temporalmente, permitindo a identificação de padrões e a respectiva detecção de anomalias indicativas da mistura de águas de diferentes origens, o que possivelmente não seria adequadamente detectado por dispositivos de medição pontual. Os dispositivos DTS permitem medições em extensões superiores a 30 km, a depender do dispositivo utilizado, sem alterar níveis ou causar grandes perturbações no escoamento, uma vez que o volume ocupado pelos cabos de fibra ótica é mínimo.

Em termos de desvantagens, são destacados a logística necessária para instalação das fibras óticas ao longo do curso superficial, que pode demandar uma equipe especializada, além de equipamentos específicos, a depender da área de estudo; a fragilidade dos cabos de fibra ótica, que podem sofrer danos quando expostos às condições naturais (mudança de posição pelo escoamento; ruptura pela ação de animais); e a necessidade de utilização de metodologias adicionais para a quantificação das taxas

de interação, baseadas nas equações de conservação de massa e energia (KOBAYASHI, 1985; SELKER et al., 2006b; YAO et al., 2015), em soluções analíticas de equações diferenciais de fluxo de calor em meios saturados, em abordagens permanentes (BREDEHOEFT e PAPADOPULOS, 1965; ARRIAGA e LEAP, 2006; ANIBAS et al., 2011; KURYLYK et al., 2017) ou na análise de séries temporais de temperatura na interface água-leito do rio (HATCH et al., 2006; MCCALLUM et al., 2012; LUCE et al., 2013).

Apesar disso, o uso deste tipo dispositivo vem se mostrando extremamente vantajoso para uso em estudos de interação rio-aquífero, ao poupar o trabalho de procura e caracterização de locais de ocorrência de troca de água entre as duas origens. O avanço da tecnologia, a redução dos custos destes equipamentos e o aumento na resolução espacial são fatores que tendem a favorecer a sua utilização, especialmente em aplicações ligadas à hidrologia e à análise da interação rio-aquífero.

2.4 A temperatura como traçador da interação rio-aquífero

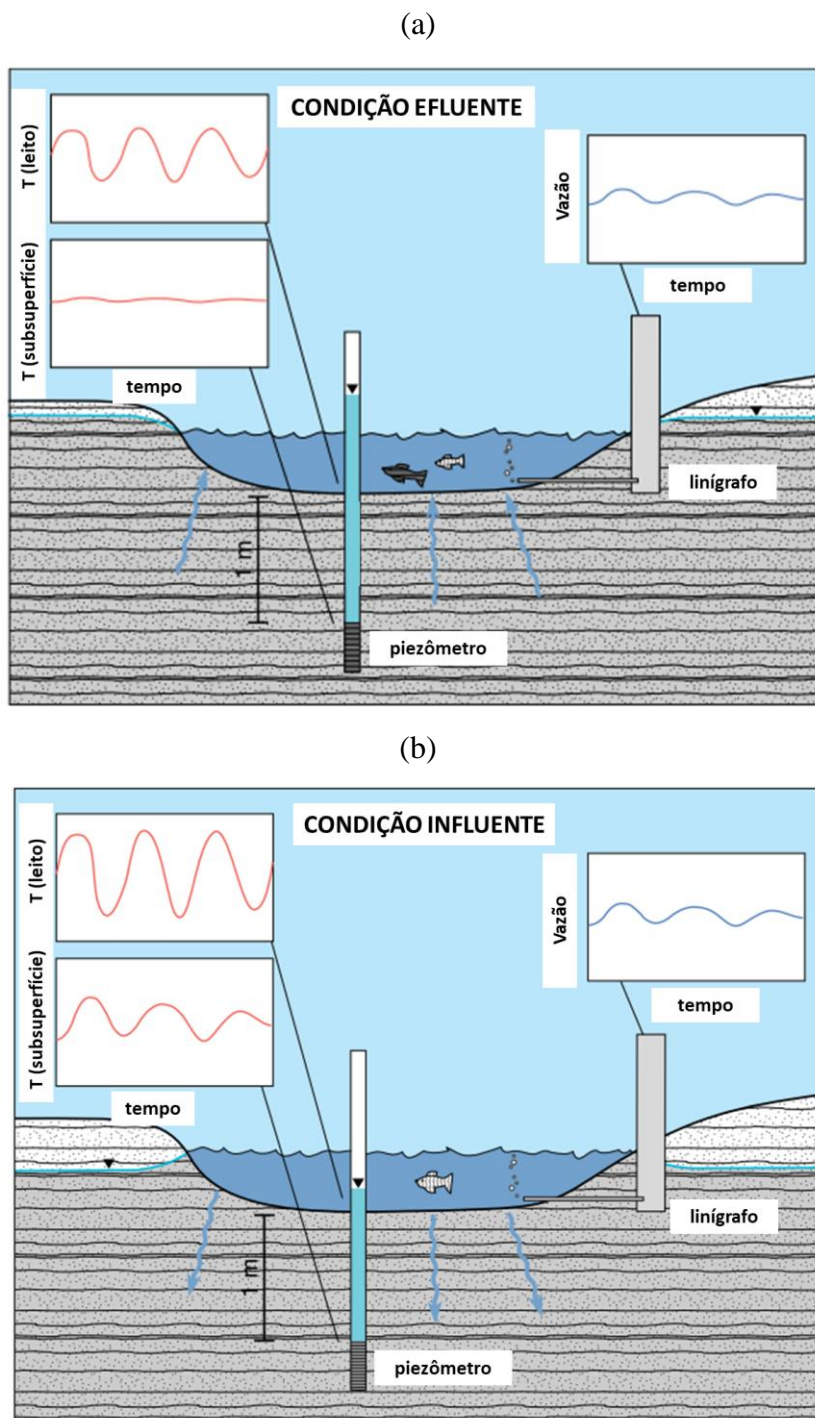
As variações de temperatura da água em superfície e subsuperfície podem ser indicativos da ocorrência da interação rio-aquífero e da respectiva condição em que esta ocorre. De forma geral, na ausência de interação entre água superficial e subterrânea, a variação de temperatura em subsuperfície é causada pelo transporte de calor por condução, a partir do meio externo e avançando em profundidade, pela ação da radiação solar (CAISSIE, 2006).

Considerando uma condição efluente (Figura 5a), nota-se que o transporte de calor por advecção, saindo para o meio externo em conjunto com o transporte de fluido, impede/reduz o avanço da frente de transporte de calor por condução que ocorreria em uma condição neutra. Desta forma, enquanto a temperatura do leito do rio apresenta uma elevada variação diária, a temperatura em subsuperfície apresenta variações diárias mínimas, a depender do fluxo de água subterrânea que contribui ao rio. (CONSTANTZ, 2008; BRIGGS et al., 2014; RAU et al., 2014; SCHENATO, 2017)

Já para uma condição influente (Figura 5b), tanto a frente advectiva (transporte pelo fluido) quanto a frente condutiva (transporte difusivo) atuam no mesmo sentido, penetrando no meio subterrâneo. Assim, as variações de temperatura que ocorrem em superfície são reproduzidas em subsuperfície, com certo grau de atenuação e retardamento. A atenuação ocorre em função da capacidade térmica volumétrica dos

sedimentos, enquanto o retardamento ocorre em função da condutividade térmica do material aluvial, do gradiente de temperatura e da velocidade de percolação da água no meio poroso. (CONSTANTZ, 2008; BRIGGS et al., 2014; RAU et al., 2014; SCHENATO, 2017)

Figura 5 - Comportamento da variação temporal de temperatura no leito do rio e em subsuperfície (gráficos em vermelho), em locais de interação rio aquífero: (a) na condição efluente e (b) na condição influente



Fonte: Adaptado de Constantz (2008)

As condições efluente e influente, também indicadas na literatura como zonas de descarga e recarga, respectivamente, considerando o sentido do fluxo de água subterrânea, podem ocorrer em diferentes trechos de um mesmo curso d'água superficial (LOWRY et al., 2007; WENDLAND et al., 2022). Desta forma, ao se avaliar a temperatura da água e as suas possíveis diferenças/anomalias ao longo do comprimento longitudinal do rio, é possível definir qual condição cada uma das regiões apresenta. O uso da medição distribuída de temperatura potencializa esta identificação, considerando o monitoramento contínuo, em termos espaciais e temporais.

Um dos questionamentos que aparecem na literatura é se as anomalias de temperatura da água em rios podem ser indicativas da origem da água, em termos de profundidade. Neste sentido, o traçador natural poderia ser utilizado para diferenciar os fluxos de águas rasas, ou fluxos de zona hiporreica (também indicado na literatura, em inglês, por HIZ – *hyporreic inflow zones*); dos fluxos de água profundas, ou fluxos de água subterrânea (ou em inglês, comumente indicados por GIZ – *groundwater inflow zones*) (FERNALD et al., 2001; MALARD et al., 2002, YAO et al., 2015)

Os fluxos de zona hiporreica comumente representam águas que, ao longo do comprimento longitudinal do rio, ingressam no meio subterrâneo em determinado trecho e retorna ao fluxo superficial alguns metros a jusante. Isso ocorre por conta da formação de meandros e pelo acúmulo de sedimentos, em conjunto com as variações de carga hidráulica disponíveis, que podem influenciar no trânsito da água entre dois pontos (Figura 6). Este tipo de fluxo não contribui efetivamente para a vazão líquida do curso superficial, uma vez que uma aparente perda de água superficial a montante retorna como um ganho de água subterrânea a jusante, nas mesmas proporções. (GOSSEF, 2010; BENCALA et al., 2011)

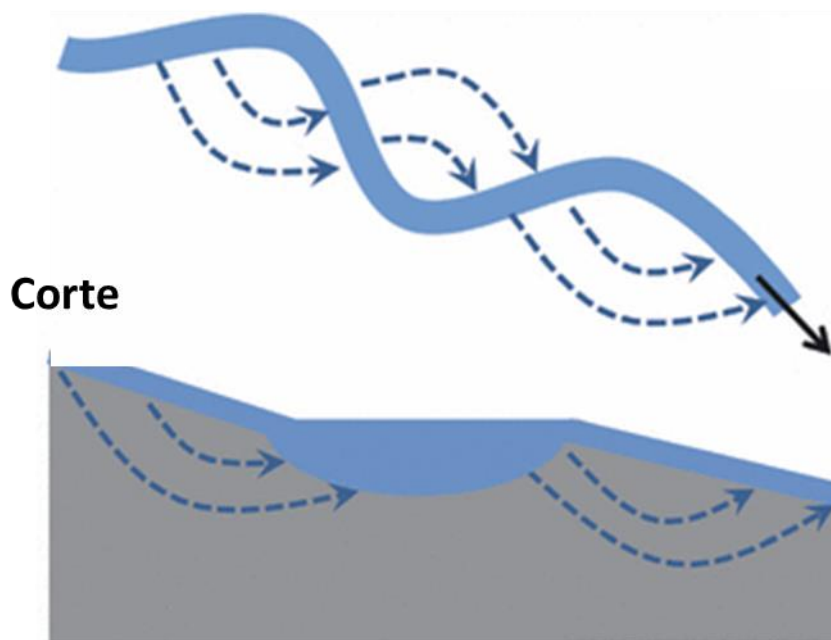
Ao ingressar no meio subterrâneo, o fluxo de zona hiporreica tem seu sinal de temperatura modificado, uma vez que se mistura aos sedimentos e à água em pequenas profundidades. O retorno da água ao meio superficial, alguns metros a jusante, pode então causar anomalias pontuais de temperatura, indicativas de uma condição influente. Tal processo natural é um dos mecanismos de controle das condições termais dos rios. A análise das variações deste sinal ao longo tempo e sua comparação com a temperatura ambiente podem diferenciar o seu comportamento em relação às regiões de fluxo de água profunda. (ARRIGONI et al., 2008; HANNAH et al., 2009)

No contexto da interação rio-aquífero, Yao et al. (2015) utilizaram dados de uma campanha de medição de temperatura distribuída (aproximadamente 30h de dados),

realizada em dois trechos do Rio Heihe, no centro-norte da China, cuja bacia tem características de clima árido. A partir da observação das variações espaciais de temperatura e por meio da aplicação de testes estatísticos (teste z), tais autores buscaram identificar as áreas representativas de fluxos mais profundos e áreas de fluxos de zona hiporreica. Apesar de se beneficiar das vantagens do uso do DTS na detecção das anomalias de temperatura, o estudo foi realizado em uma única campanha e não permitiu identificar como os testes utilizados se comportariam para a definição de tais regiões, considerando a sazonalidade das temperaturas ambientes.

Figura 6 - Fluxos de águas rasas, na zona hiporreica, visto em planta e em corte

Planta



Fonte: Adaptado de Gooseff (2010)

Outros pesquisadores vem utilizando a comparação da temperatura da água e a temperatura do ar como forma de classificar a fonte de água predominante em bacias de diferentes regiões dos Estados Unidos (BRIGGS et al., 2018; JOHNSON et al., 2020; HARE et al., 2021; HARE et al., 2023). A partir de dados médios diários de temperatura da água, medidos nos exutórios das bacias, agrupados em escala anual, por meio de uma função senoidal, tais pesquisadores classificaram as bacias em três categorias, considerando a assinatura carregada pela água subterrânea: *deep* (profunda, indicativa de água oriundas de profundidades superiores a 6 metros), *shallow* (águas rasas, oriundas de

fluxo de zona hiporreica) e *atmospheric* (águas de locais com baixa interação rio-aquífero). Esta classificação foi cruzada com índices hidrológicos, como o BFI (*base-flow index*), a fim de confirmar a efetividade da temperatura na classificação do comportamento das bacias avaliadas.

O trabalho de tais autores foi possível em virtude da elevada disponibilidade de dados de monitoramento hidrológico nas bacias americanas, com séries superiores a 30 anos. É importante ressaltar que a metodologia de classificação considera a determinação da razão entre as amplitudes dos sinais de temperatura da água e do ar, assim como o tempo de retardamento de tais sinais (*lag-time*). A partir de tais parâmetros, foram estabelecidas faixas de classificação para as categorias citadas acima. O uso desta metodologia ainda não foi observado em conjunto com dados de medição distribuída de temperatura, buscando identificar as zonas de interação ao longo do comprimento longitudinal dos rios. Adicionalmente, tais análises não foram realizadas com dados medidos em escalas temporais inferiores, como os possivelmente levantados com dispositivos DTS. A mudança de condições climáticas, comparando bacias temperadas e bacias tropicais, também pode influenciar o comportamento dos parâmetros e a respectiva classificação dos locais de interação. (BRIGGS et al., 2018; JOHNSON et al., 2020; HARE et al., 2021; HARE et al., 2023).

Considerando o contexto apresentado e as lacunas ainda presentes na literatura, esta tese busca associar o uso da medição distribuída de temperatura e o uso desta grandeza física como traçador natural da interação rio-aquífero, em áreas tropicais, a fim de considerar as condições particulares desta região. A temperatura será utilizada como ferramenta de diferenciação da origem dos fluxos, buscando identificar regiões com contribuição de águas rasas e águas profundas, por meio de metodologias variadas. O estabelecimento de métricas iniciais para esta diferenciação também é um resultado de interesse.

3 METODOLOGIA

Este capítulo apresenta os aspectos metodológicos principais desta tese. São apresentados detalhes da área de estudo e da região em que a medição de temperatura distribuída foi implementada e a realizada, os equipamentos utilizados, assim como a distribuição da coleta de dados ao longo das estações do ano. São explanados aspectos relativos ao tratamento inicial dos dados de temperatura levantados, assim como as propostas de metodologia utilizadas para a diferenciação da origem dos fluxos, com base na temperatura.

3.1 Área de estudo

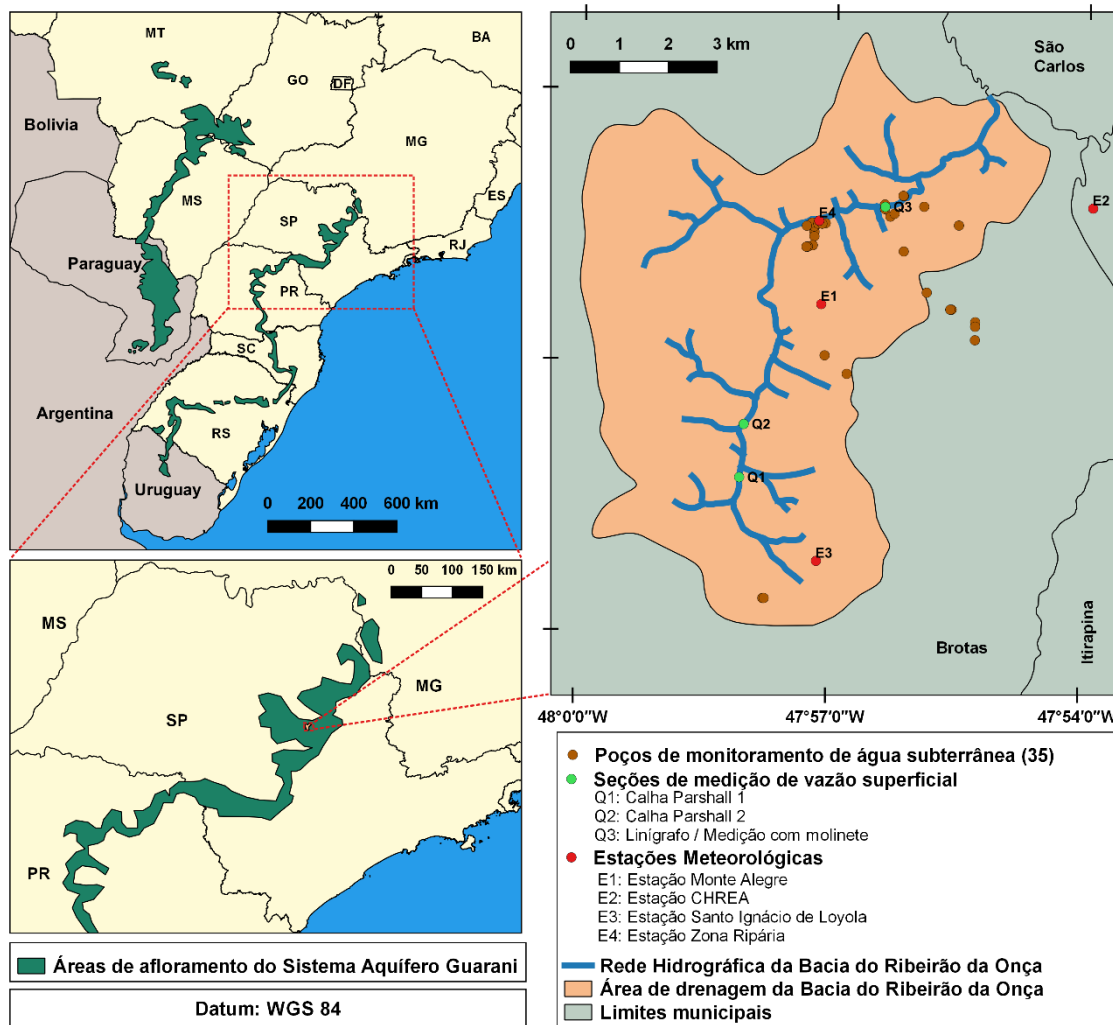
A área de estudo desta tese é a Bacia Hidrográfica do Ribeirão da Onça (BRO). Localizada no município de Brotas/SP (Figura 7), a cerca de 20 km a sudoeste do campus da USP/São Carlos, a BRO tem área de drenagem de 65 km², e é ocupada pelas mais comuns atividades agrícolas do Estado de São Paulo: a pastagem, o cultivo de cana-de-açúcar, de laranja e de eucalipto. Também são visualizadas áreas remanescentes de Cerrado. O Ribeirão da Onça drena a bacia e escoar com nível normal superior a 1 m de profundidade e aproximadamente 0,5 m³ s⁻¹ de vazão de base no exutório. Observa-se que o escoamento freático na bacia geralmente acompanha a declividade do terreno, descarregando principalmente no ribeirão (WENDLAND et al., 2007; COUTINHO, 2019; COUTINHO et al., 2020).

De acordo com a classificação climática de Köpper-Geiger, a BRO está localizada em uma região de clima subtropical úmido (classe Cwa), marcado por invernos secos e verões chuvosos (BECK et al., 2018). O Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) indica que o clima na região da BRO é do tipo Tropical do Brasil Central, com temperaturas do ar médias entre 20 e 28°C e suscetíveis a ação de massas de ar polar vindas do sul do planeta, ocasionando períodos de frio (NIMER, 1979; IBGE, 2023). A precipitação média anual na bacia é de 1500 mm e a temperatura média do ar é de 21,6 °C (WENDLAND et al., 2007; CABRERA et al., 2016).

Em termos de classificação pedológica dos solos, a BRO é recoberta principalmente por neossolo quartzarênico órtico a moderado e por latossolos vermelhos. Em termos geológicos, a bacia é predominantemente recoberta pela Formação Botucatu, composta por arenitos finos a médios de cores avermelhadas. Na região próxima ao exutório da bacia, é possível visualizar áreas com derrames basálticos, que caracterizam a Formação Serra Geral (CASTRO JUNIOR e WENDLAND, 2015; COUTINHO, 2019;

COUNTINHO et al., 2020). A altitude na BRO varia entre 643 a 842 metros, em relação ao nível do mar, com declividades médias de 7,6 m / km (MEIRA NETO et al., 2011).

Figura 7 - Mapa de localização da Bacia do Ribeirão da Onça (BRO), área de estudo deste trabalho



Fonte: Autor (2023)

O interesse nesta bacia reside primeiramente na sua localização, uma vez que sua área está inteiramente situada em uma das regiões de afloramento do Sistema Aquífero Guarani (SAG). Neste sentido, ela pode fornecer elementos de interesse para o aprofundamento dos conhecimentos sobre o comportamento desse sistema, de importância nacional e internacional (GASTMANS et al., 2010; RICHTS et al., 2011; HIRATA et al., 2020; HIRATA e FOSTER, 2021), especialmente no que tange à recomposição de suas reservas e suas respectivas relações com as águas superficiais.

Outro fato que incentiva o estudo desta área é a disponibilidade de dados climatológicos, levantados pela USP, desde a década de 1980. O Laboratório de

Hidráulica Computacional da Escola de Engenharia de São Carlos (LHC/EESC/USP) dispõe de uma rede de monitoramento contínuo, implantada progressivamente a partir do ano de 2004. Esta rede permite o levantamento manual e automático de dados na bacia, tais como o nível freático e a temperatura das águas subterrâneas em 31 poços de observação ativos, a vazão e os níveis de água do curso superficial em três seções fluviométricas, assim como os principais parâmetros de clima, monitorados por três estações meteorológicas automáticas, instaladas na área da BRO; além da estação convencional do Centro de Recursos Hídricos e Estudos Ambientais da Universidade de São Paulo (CRHEA/USP), localizada nas proximidades da bacia. Todos estes dispositivos de monitoramento subsidiam a realização de diversos trabalhos de pesquisa da universidade (REIS et al., 2022).

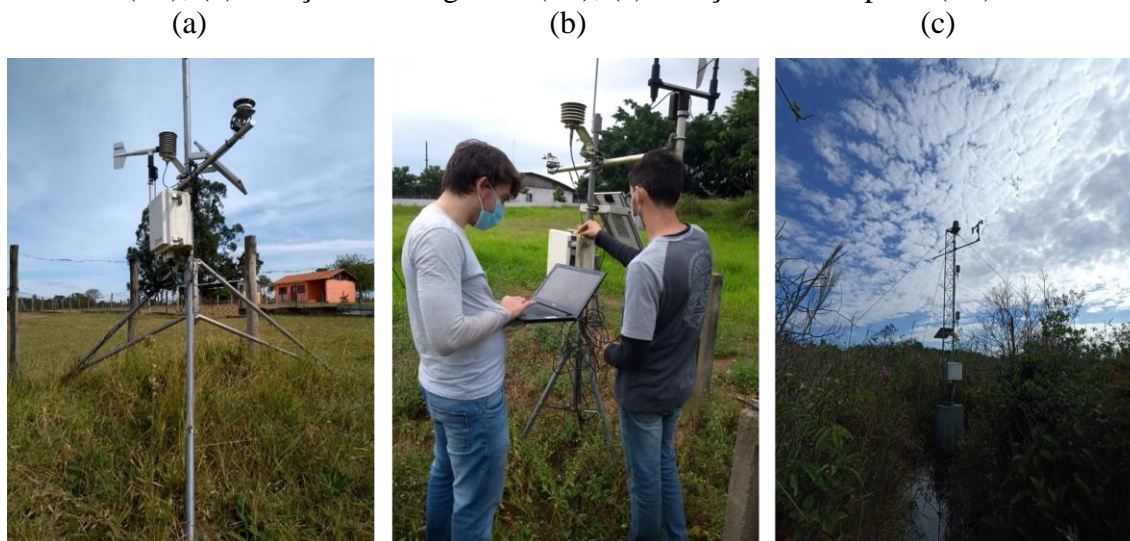
3.2 Dados de temperatura do ar

Os dados de temperatura do ar foram importantes no contexto desta pesquisa, uma vez que é uma das condições atmosféricas mais influentes no regime termal das águas superficiais (CAISSIE et al., 2006). Adicionalmente, tais informações foram dados de entrada para alguns dos métodos utilizados para a diferenciação e classificação dos fluxos de água na zona hiporreica e sua respectiva interação com o meio superficial.

Como observado no mapa de localização da área de estudo (Figura 7), a BRO conta com 3 estações meteorológicas automáticas (Figura 8), instaladas em diferentes regiões de sua área de drenagem. Estes dispositivos monitoram dados de temperatura do ar, precipitação, radiação solar, direção e velocidade do vento, armazenando tais dados em registradores de dados (*dataloggers*). Tais informações são coletadas pela equipe de monitoramento a cada visita de campo, momento no qual também são realizadas inspeções no funcionamento dos dispositivos de medição.

No contexto desta pesquisa, os dados de temperatura do ar destas três estações foram analisados para os seis períodos em que foram realizados monitoramento da temperatura da água com o dispositivo DTS (mais detalhes são apresentados no item 3.4). Foi possível observar uma boa consistência dos dados nestas datas entre essas estações. Optou-se pelo uso das informações coletadas na Estação Monte Alegre (E1 - Figura 7), uma vez que foi a única estação que não apresentou falhas de medição, nos períodos concomitantes com o levantamento da temperatura da água. Adicionalmente, a Estação Monte Alegre é aquela que apresenta maior série histórica de dados climáticos na BRO, com monitoramento contínuo desde o ano de 2011 (REIS et al., 2022).

Figura 8 - Estações meteorológicas automáticas da BRO: (a) Estação Monte Alegre (E1); (b) Estação Santo Ignácio (E3); (c) Estação Zona Ripária (E4)



Fonte: Autor (2023)

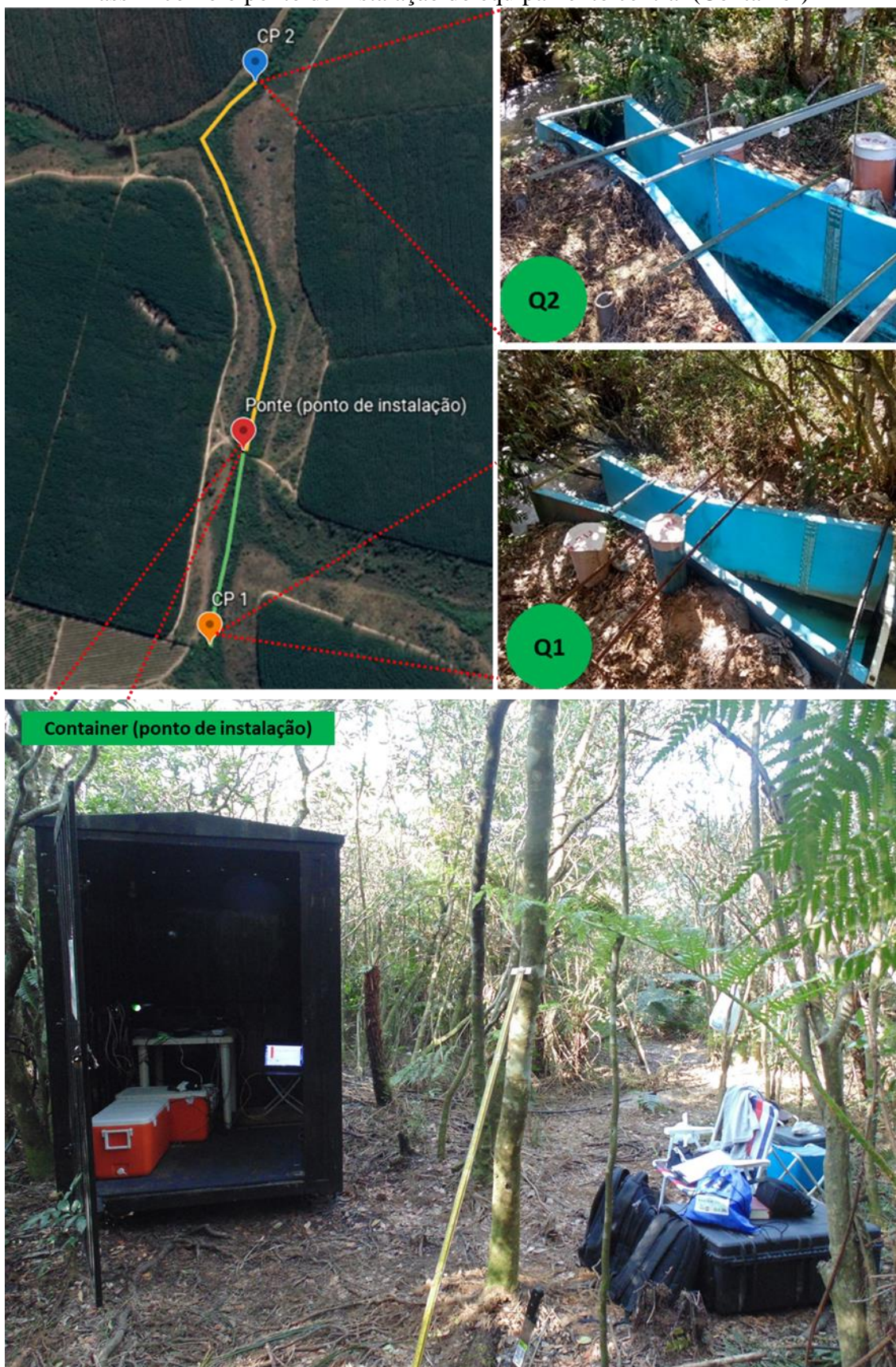
3.3 Implementação da medição distribuída de temperatura em campo

A medição distribuída de temperatura na área de estudo foi implementada no alto curso do Ribeirão da Onça, no trecho entre as Calhas Parshall 1 e 2 (Figura 7 – seções de vazão Q1 e Q2). Tais pontos distam entre si cerca de 1300 metros, ao longo do curso principal da bacia, e a fibra ótica instalada foi dividida em dois trechos: trecho de jusante, com cerca de 805 metros de comprimento (Figura 9 – trecho em amarelo) e o trecho de montante, com cerca de 550 metros de comprimento (Figura 9 – trecho em verde). Tais trechos foram assim nomeados considerando o ponto de instalação da central DTS, na parte central do trecho, onde um container foi instalado para receber o equipamento (Figura 9 - container).

O referido trecho foi escolhido pelos seguintes motivos:

- (i) A partir de visitas prévias ao trecho, foi possível observar visualmente a ocorrência de ressurgências de água subterrânea sobre o leito do ribeirão, o que indicava a constante interação rio-aquífero na região, que poderia ser devidamente confirmada com o uso da medição de temperatura distribuída;
- (ii) O trabalho prévio de Wendland et al. (2022) coletou pioneiramente dados de temperatura com fibra ótica, em um comprimento de 180 metros nas proximidades da Calha Parshall 2 (seção Q2). Com o uso de um dispositivo DTS de uma instituição parceira, os dados foram coletados durante 72 horas, no inverno de 2017. Foi possível observar a presença de pontos quentes, indicativos da descarga de água subterrânea no ribeirão, uma vez que a água

Figura 9 - Local de instalação da fibra ótica para medição distribuída de temperatura, com destaque aos pontos inicial (CP 1 - Seção Q1) e final (CP 2 - Seção Q2) do trecho, assim como o ponto de instalação do equipamento central (Container)



Fonte: Autor (2023)

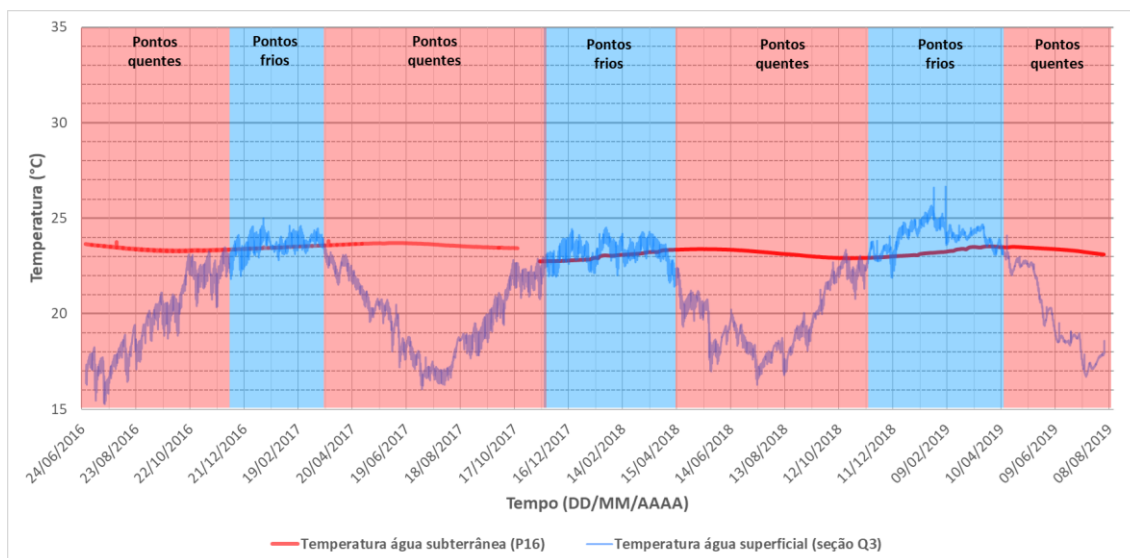
superficial encontrava-se mais fria, considerando a temperatura ambiente da estação em que o monitoramento foi realizado. A expansão do comprimento monitorado foi então indicada como forma de obter mais conclusões relativas ao uso da temperatura como traçador.

- (iii) A mesma época da campanha pioneira de medição distribuída de temperatura, as calhas Parshall foram instaladas na região, permitindo o monitoramento das vazões superficiais no trecho e a possível correlação com a descarga de água subterrânea (ROSA, 2018).

Corroborando a necessidade de expandir o monitoramento distribuído de temperatura na BRO, uma hipótese a ser confirmada era a variação na forma de identificação dos pontos de interação rio-aquífero ao longo do ano, considerando as variações sazonais da temperatura do ar, trazidas pelas estações. Os pontos quentes seriam observados nos períodos mais frios do ano, em que a temperatura da água subterrânea se apresenta superior à da água superficial, enquanto à identificação por pontos frios ocorreria quando a situação se invertesse, ou seja, a temperatura das águas superficiais superasse a das águas subterrâneas.

Esta hipótese foi embasada a partir da comparação entre dados de temperatura (Figura 10) de água em um dos poços instalados na BRO (poço 16), em conjunto com dados de temperatura de água superficial, monitorados na seção de monitoramento Q3 (vide Figura 7), coletados entre 2016 e 2019, por dispositivos automáticos (*levellogers*). Estimava-se que no fim da primavera (início do mês de dezembro), durante todo o verão (entre os meses de dezembro e março) e no início do outono (entre os meses de março e abril), os pontos de descarga de água subterrânea poderão ser identificados por pontos frios (faixas em azul na Figura 10), com a água subterrânea apresentando temperaturas inferiores à da água superficial. Nos demais períodos do ano, entre os meses de abril e dezembro (fim do outono, todo o inverno e a maior parte da primavera), a tendência é que os pontos de descarga sejam identificados por pontos quentes (faixas em vermelho na Figura 10). Apesar da comparação ser feita com dados de temperatura de água em diferentes níveis de profundidade, a ocorrência desta alternância nos pontos interação rio-aquífero é plausível, considerando a conexão entre águas superficiais e subterrâneas. Os resultados obtidos com as medições distribuídas de temperatura, no contexto desta tese, permitirão uma discussão em torno desta hipótese, o que será realizado na seção de resultados do Capítulo 5.

Figura 10 - Variação da temperatura da água medida superficialmente (em azul, seção Q3) e em um dos poços de monitoramento (em vermelho, poço 19), na BRO, entre 2016 e 2019. Destaque para as faixas indicativas para os períodos do ano em que estimava-se identificar a interação rio-aquífero por pontos quentes (faixas em vermelho) e por pontos frios (faixas em azul).



Fonte: Autor (2023)

A instalação definitiva da fibra ótica, utilizada como sensor distribuído de temperatura foi realizada em novembro de 2020 (Figura 11). Os cabos foram posicionados sobre o leito, na parte central da seção transversal do ribeirão, de forma a medir uma temperatura em cada seção, de acordo com a resolução de amostragem da central DTS. Para que a fibra permaneça na posição esperada, sem mudanças bruscas causadas pelo fluxo de água e pelo depósito de sedimentos, os cabos foram amarrados a hastes metálicas com cordas de nylon trançadas. Tais hastes foram, em seguida, cravadas no leito, paralelamente ao cabo de fibra ótica. O uso das cordas de nylon garante um grau de liberdade para movimentação do cabo, sem rigidez excessiva, evitando possíveis rupturas e dobras, que podem ser prejudiciais à propagação do sinal de luz no interior do cabo.

Em termos de características técnicas, a fibra ótica implementada é da marca Furukawa, modelo Fiberlan, do tipo multimodo OM3 (FURUKAWA, 2023). O cabo possui 4,8 mm de diâmetro externo e em seu interior, há dois canais, ou seja, no interior do mesmo cabo, existem duas fibras óticas, pelo qual o sinal de luz pode trafegar. Estes canais foram interligados, nas extremidades do cabo próximas as Calhas Parshall,

possibilitando o retorno do sinal enviado pela central DTS pelo segundo canal, até o ponto inicial.

Figura 11 - Instalação da fibra ótica no leito do Ribeirão da Onça



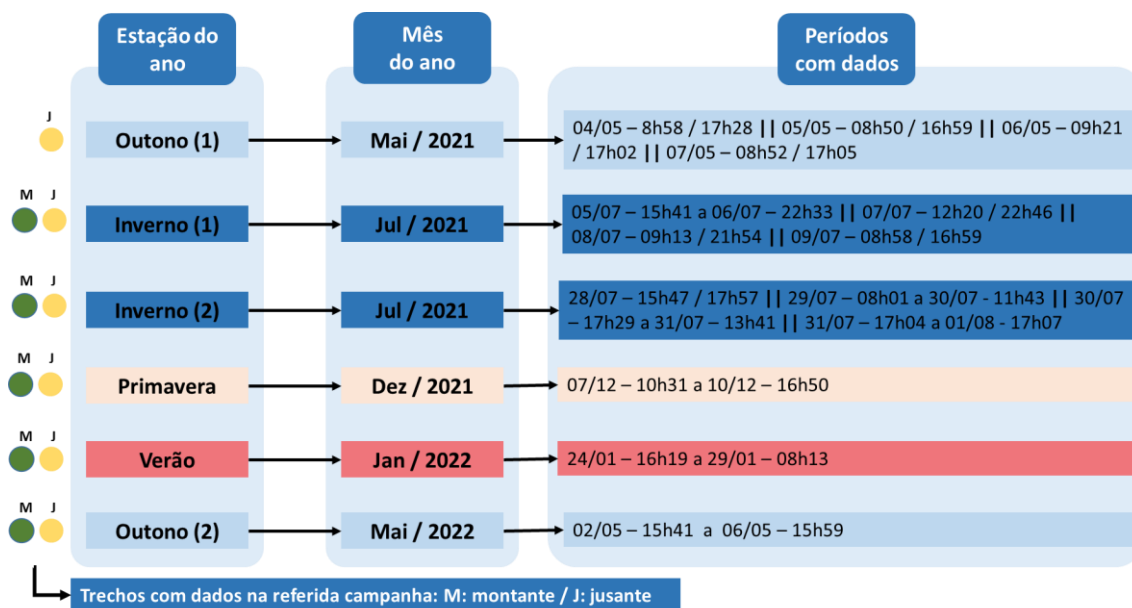
Fonte: Autor (2023)

3.4 Campanhas de medição de temperatura realizadas

As medições de temperatura foram realizadas em seis campanhas de aproximadamente uma semana cada, distribuídas ao longo de todas as estações do ano, entre o outono de 2021 e o outono de 2022 (Figura 12), em dias sem a ocorrência de precipitação, visando avaliar diretamente a ocorrência da interação rio-aquífero e a vazão de base. O objetivo principal deste monitoramento dividido ao longo das estações do ano foi avaliar a sazonalidade da temperatura da água e o seu efeito na identificação e caracterização da interação rio-aquífero. Comumente, a literatura reporta campanhas curtas de medição distribuída de temperatura, da ordem de horas ou dias. Os dados coletados neste trabalho geraram um dos maiores bancos de dados de medição distribuída de que se tem conhecimento.

As campanhas são identificadas neste trabalho pela estação do ano em que foram realizadas. Para as estações de outono e o inverno, foram realizadas mais de uma campanha e a sua identificação conta com um número adicional. Adicionalmente, a Figura 12 indica os trechos em que foram realizadas as medições, em conjunto com os períodos em que os dados foram observados.

Figura 12 - Campanhas de medição de temperatura realizadas, com os períodos de dados coletados. Os círculos à esquerda indicam os trechos que tiveram dados coletados naquela campanha.



Fonte: Autor (2023)

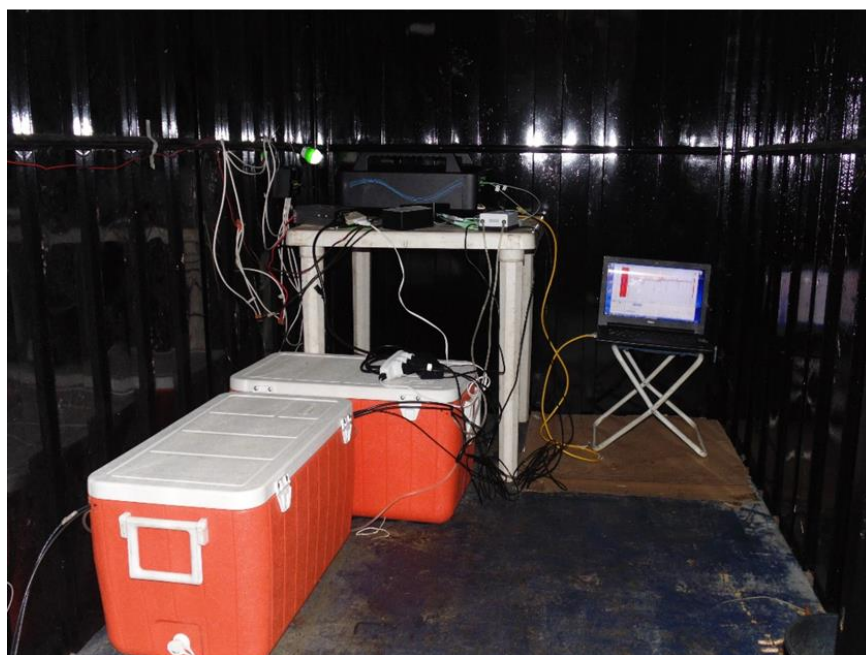
A campanha Outono (1) mediu apenas o trecho de jusante, uma vez que o cabo de montante foi rompido, pela ação de pássaros, em fevereiro de 2021, sendo consertado posteriormente, em junho de 2021. Esta mesma campanha também apresenta apenas dados diurnos, uma vez que o equipamento era transportado a campo diariamente, por razões de segurança. As demais campanhas já apresentam dados diurnos e noturnos, uma vez que foi possível deixar o equipamento montado e monitorando ao longo de todo o período.

As campanhas de Inverno apresentam recortes e interrupções nos dados, em virtudes de falhas na energização da central DTS. Com os dias mais curtos e a menor insolação nesta época do ano, as baterias utilizadas, recarregadas por placas solares, não se recarregavam suficientemente para manter o equipamento em funcionamento ao longo de toda a noite. Desta forma, as medições eram retomadas, a partir das visitas da equipe de monitoramento. Para as campanhas posteriores, tal problema de alimentação foi solucionado, com o aumento do número de baterias, permitindo a obtenção de dados contínuos.

A central DTS empregada nas medições é do modelo XT-DTS, da fabricante inglês Silixa, que possui resolução de amostragem mínima de 25 cm e resolução de

temperatura de $0,01^{\circ}\text{C}$ (Figura 13). Este dispositivo é capaz de realizar medições por até 10 km de comprimento de fibra, com intervalos de medida de até cinco segundos (SILIXA, 2023). Nas campanhas realizadas, os dados foram levantados em intervalos que variaram entre 8 e 12 minutos, de acordo com a campanha e as suas configurações. Tais intervalos são considerados suficientes para a verificação das anomalias de temperatura, causadas pela interação rio-aquífero.

Figura 13 - Dispositivo DTS utilizado, em ambiente de laboratório e aplicado na área de estudo

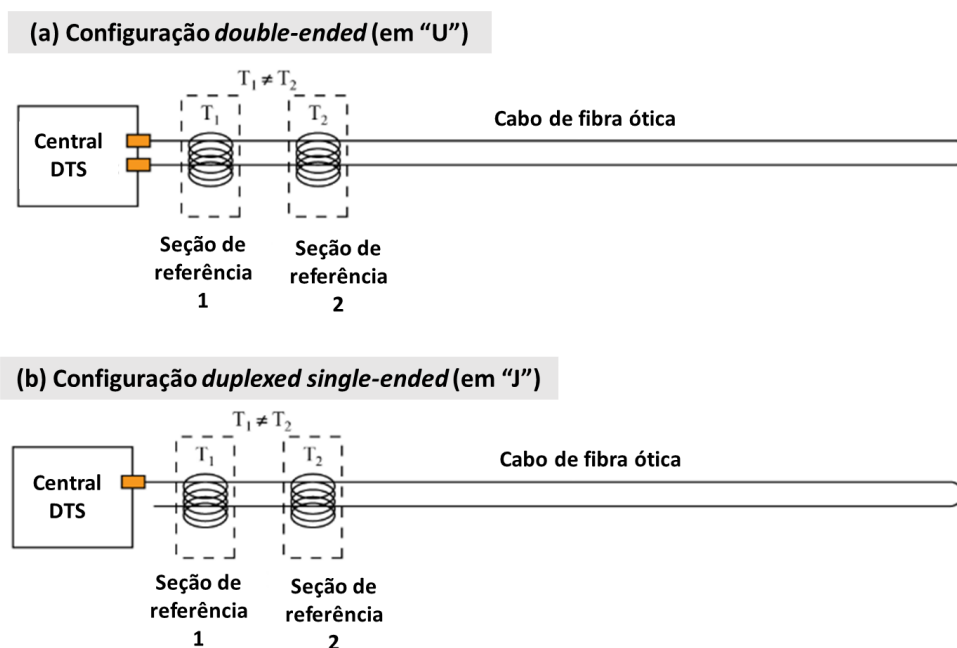


Fonte: Autor (2023)

O dispositivo DTS empregado tem capacidade para medir 4 canais simultaneamente (portas verdes visíveis na Figura 13). Como já informado na seção anterior, o cabo de fibra ótica implementado na área de estudo possui dois canais. Assim, era possível utilizar até dois canais do equipamento para cada trecho de fibra implantado (montante e jusante, conforme indicado na Figura 9).

Quando as duas extremidades de uma mesma fibra se encontram conectadas à central DTS, tem-se a configuração *double-ended* (TYLER et al., 2009; HAUSNER et al., 2011), assumindo o formato em “U” (Figura 14a). Esta configuração é a mais recomendada para aplicações ambientais da medição distribuída de temperatura, ao permitir que o equipamento realize a medição de temperatura de forma duplicada, enviando o sinal em ambos os sentidos, o que facilita a calibração interna do aparelho. Tal configuração foi utilizada nas três campanhas iniciais (Outono (1), Inverno (1) e Inverno (2)), quando os quatro canais foram utilizados para as medições longitudinais de temperatura.

Figura 14 - Configurações de conexão entre fibra ótica e central DTS utilizadas neste trabalho



Fonte: Adaptado de Hausner et al. (2012)

Quando apenas uma das extremidades da fibra está conectada à central DTS e a outra extremidade também retorna a origem, tem-se a configuração *duplexed single-ended* (TYLER et al., 2009; HAUSNER et al., 2011), assumindo o formato em “J” (Figura

14b). Ainda é possível obter as medições de forma duplicada (uso do termo *duplexed*), mas o sinal é enviado apenas a partir do canal conectado ao equipamento (uso do termo *single-ended*). Tal configuração foi utilizada nas três últimas campanhas (Primavera, Verão, Outono(2)), uma vez que dois canais disponíveis na central DTS foram utilizados para testes complementares durante as campanhas.

Quando em funcionamento, a central DTS realiza uma calibração interna dinâmica, ao longo de todas as medições. Isso é feito, pois a temperatura depende não somente da intensidade dos sinais Stokes e anti-Stokes, mas também de parâmetros que levam em conta a atenuação do sinal ao longo do cabo de fibra ótica, trazidas pelo próprio material e pelas conexões; além de possíveis desvios de temperatura, devido à mudanças bruscas durante a medição. A calibração interna da central DTS demanda o uso das seções de referência (caixas térmicas, em laranja, na Figura 13), que consistem em trechos de fibra ótica com temperatura controlada por um dispositivo adicional. A própria central DTS já fornece dois termômetros adicionais, que conectados a ela, permitem o levantamento da temperatura das seções de referência e o cruzamento com o trecho de fibra ótica nelas contido. No mínimo duas seções de referência com temperaturas diferentes e com comprimento de fibra ótica superior a dez vezes a resolução de amostragem do equipamento são necessárias para esta calibração (TYLER et al., 2009; HAUSNER et al., 2011). Nesta pesquisa, uma das caixas térmicas continha água com gelo (temperatura próxima a 0° C) enquanto a outra continha água quente (temperatura próxima de 30° C), garantindo um bom contraste entre as seções. A água nestas caixas térmicas era continuamente recirculada, visando uniformizar a temperatura em toda a seção e evitando a sua estratificação. A água e o gelo eram renovados diariamente, pelas manhã, durante as campanhas realizadas. Os comprimentos inseridos nas seções de referência eram superiores a dez metros, superando o valor recomendando na literatura. Tais comprimentos não são exibidos nos resultados, por não representarem efetivamente trechos submersos no ribeirão. Trechos entre o container e o curso superficial também foram retirados.

3.5 Análise de dados

A realização das campanhas de medição de temperatura distribuída e a respectiva aplicação da central DTS em campo permitiu a obtenção dos dados crus de temperatura. Apesar dos procedimentos de calibração padrão disponíveis no equipamento DTS utilizado, em aplicações ambientais, é recomendada uma calibração secundária dos dados

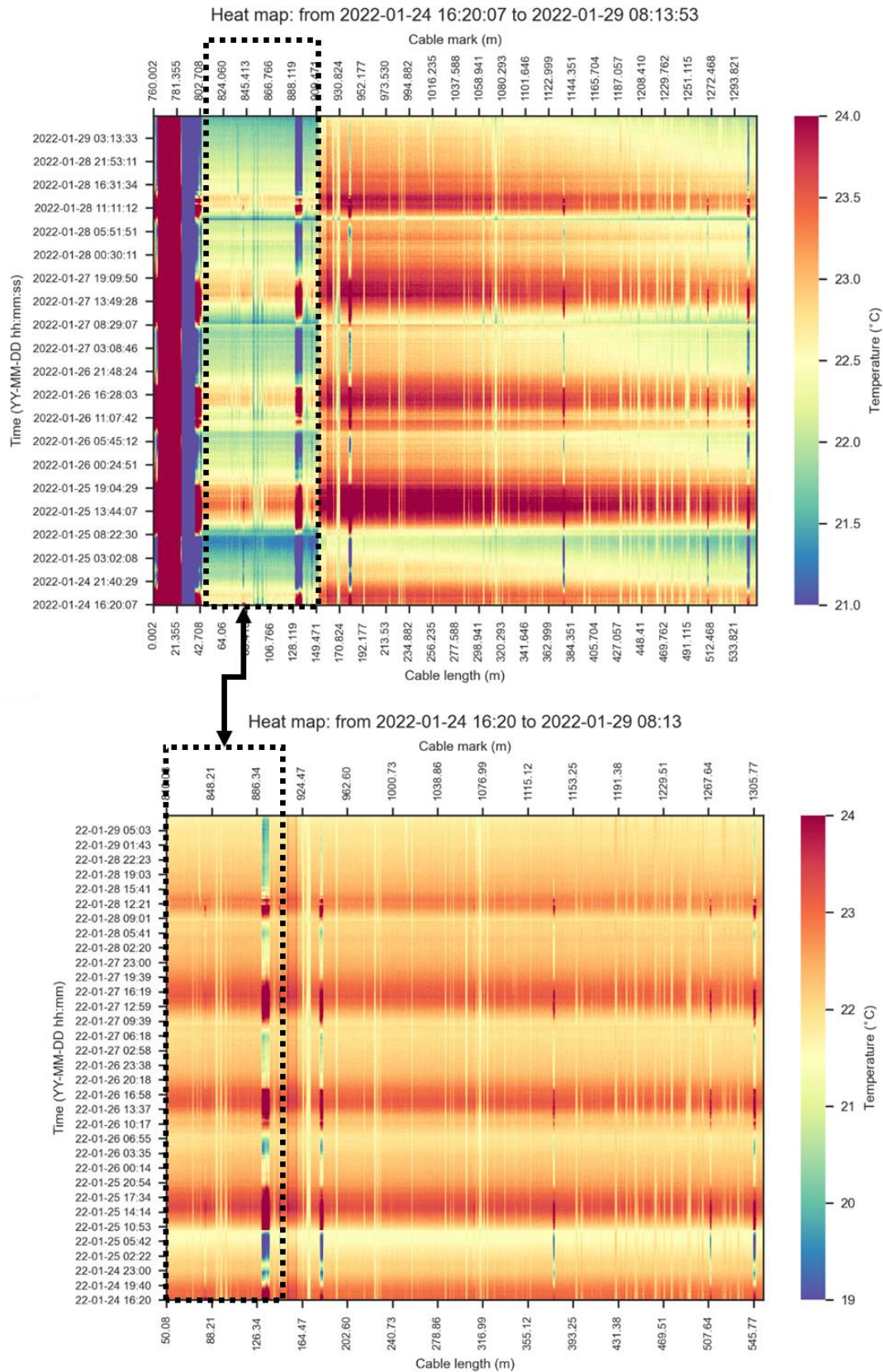
(TYLER et al., 2009; HAUSNER et al., 2011; VAN DE GIESEN et al., 2012; DES TOMBE et al., 2020). Tal recomendação se baseia na possível exposição do equipamento a condições extremas de temperatura, umidade e fonte de alimentação energética; assim como o cabo de fibra ótica pode estar suscetível a dobras induzidas por agentes naturais, fusões e interligações realizadas para conexão da central e de trechos de fibra. Tais situações podem afetar a atenuação diferencial do sinal nas medições, que pode não ser devidamente detectada pelos procedimentos padrão dos fabricantes de equipamento.

Esta necessidade de calibração ficou evidente nos dados monitorados nesta pesquisa, especialmente para o trecho de montante (Figura 15), onde, como já comentado, foi necessário realizar uma fusão do cabo de fibra ótica, em virtude de uma ruptura causada pela ação de pássaros. Foi observado um salto pontual nos dados crus de temperatura de cerca de 2°C, na região onde tal emenda foi realizada. Tal salto é incoerente com o visualizado em campo, uma vez que não havia nenhuma fonte de calor que pudesse causar tal mudança de temperatura em todo o trecho a jusante da emenda. A calibração secundária permitiu a correção deste problema, sem prejuízo ao monitoramento distribuído da temperatura. Mesmo os dados sem saltos visíveis passaram pelo procedimento de calibração secundária, em ambos os trechos.

O procedimento de calibração secundária foi baseado na proposta de Des Tombe et al. (2020), um dos mais recentes e disponíveis na literatura, que engloba diversas melhorias na estimativa da temperatura, quando comparada a procedimentos propostos anteriormente (TYLER et al., 2009; HAUSNER et al., 2011; VAN DE GIESEN et al., 2012). Além de utilizar os dados de temperatura medidos nas seções de referência, a metodologia proposta permite informar a localização de emendas e de outros pontos em que os sinais Stokes e Anti-Stokes apresentem atenuações consideráveis (ex.: curvas acentuadas ou dobras no cabo de fibra ótica).

Adicionalmente, é possível informar outras seções de fibra ótica que devem apresentar temperaturas iguais, além das próprias seções de referência. Isso ocorre, pois ao se utilizar configurações do tipo *double-ended* ou *duplexed single-ended*, o sinal laser enviado pela fibra passa duas vezes pela mesma posição do cabo, em diferentes canais, resultando em dois valores de temperatura estimados, que não devem apresentar um grande desvio entre si. Porém, a atenuação do sinal, ao trafegar pelos canais deve ser levada em conta, sendo então a temperatura resultante da calibração um valor ponderado entre o valor obtido no canal de ida e o valor obtido no canal de volta. Para mais detalhes

Figura 15 - Comparação de dados crus e dados com calibração secundária, para a campanha de verão e trecho de montante.



Fonte: Autor (2023)

sobre a metodologia e visualização do equacionamento envolvido neste procedimento, recomenda-se a leitura do texto publicado por Des Tombe et al. (2020).

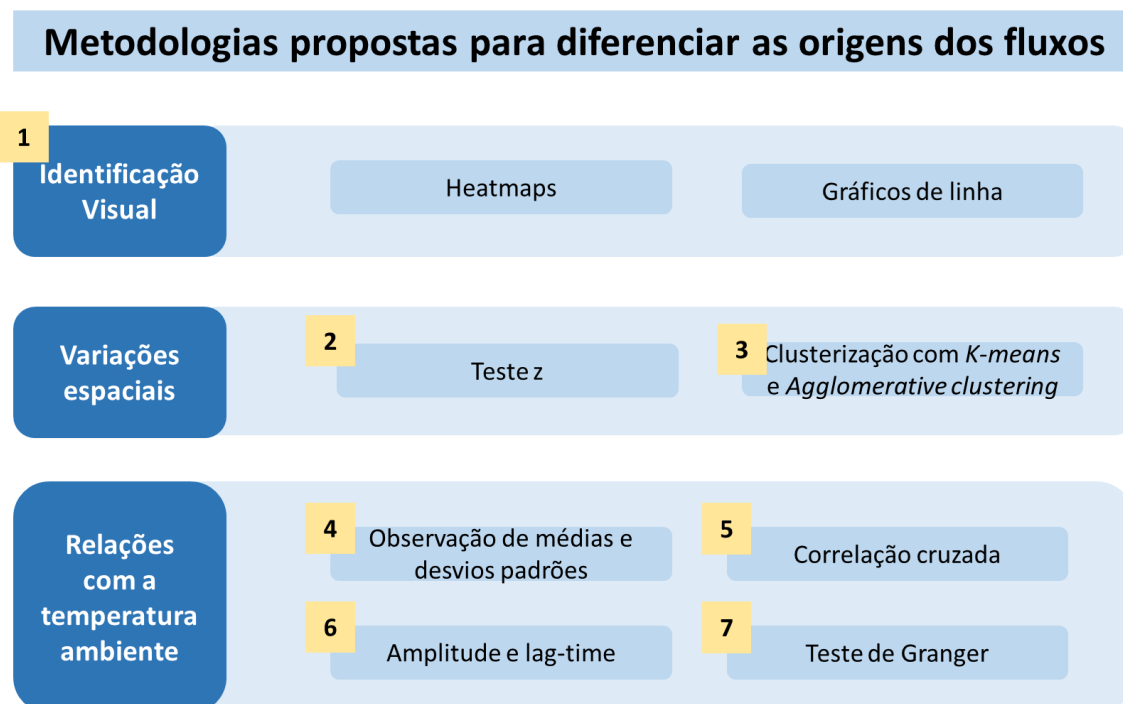
A metodologia foi implementada pelos referidos autores (DES TOMBE et al., 2020) em uma biblioteca da linguagem *Python*, utilizada neste trabalho para o tratamento dos dados crus de temperatura. Após a calibração, os dados de cada período contínuo de tempo, mensurados nas campanhas, foram reunidos em único arquivo, do tipo *netCDF* (extensão *.nc*). Por padrão, os dados crus produzidos por dispositivos da Silixa resultam em um arquivo por medida realizada (a cada 8 ou 12 minutos, um novo arquivo era salvo). Esta conversão facilitou a leitura de dados e a geração dos resultados exibidos nas etapas seguintes.

A partir dos dados de temperatura da água calibrados, foi possível a implementação de rotinas computacionais com as metodologias propostas (Figura 16) para a diferenciação da origem dos fluxos que ocorrem na interação rio-aquífero. Tais metodologias foram agrupadas em três grandes categorias, que serão detalhadas nos Capítulos 5, 6 e 7 deste trabalho, com a devida explanação dos métodos, em conjunto com a apresentação dos resultados e discussões. São elas:

- A identificação visual dos fluxos, a partir de mapas de calor (heatmaps) e recortes horários de dados de temperatura, exibidos em gráficos de linha;
- A verificação das variações espaciais da temperatura da água, com uso de testes estatísticos, como o teste z; e o agrupamento de dados, por meio de algoritmos de clusterização;
- A verificação das relações entre a temperatura da água e a temperatura ambiente, que contemplam a observação de valores estatísticos destes dados, o uso da correlação cruzada e do Teste de Granger, além da verificação das amplitudes e do tempo de retardamento (lag-time) entre tais dados;

As diferentes abordagens propostas visam atender aos objetivos específicos estabelecidos para esta tese, sendo implementadas para todas as campanhas de medição de temperatura realizadas. Neste sentido, buscou-se observar a capacidade de cada um dos métodos em diferenciar os fluxos da zona hiporreica, com base na temperatura da água, e sua sazonalidade ao longo das estações do ano. O estabelecimento de métricas, em termos de valores numéricos de parâmetros avaliados, também foi interesse desta verificação, como forma de indicar referências iniciais para futuros estudos, envolvendo a temperatura e a interação rio-aquífero.

Figura 16 - Visão geral das metodologias utilizadas para diferenciação da origem dos fluxos na zona hiporreica



Fonte: Autor (2023)

4 DADOS DE TEMPERATURA DO AR

Este capítulo visa apresentar o recorte dos dados de temperatura do ar levantados na área de estudo, nos períodos concomitantes à realização do monitoramento da temperatura da água, com o uso do dispositivo DTS. Observar tais dados pode ser útil na análise e compreensão do comportamento da temperatura da água e das metodologias implementadas para a diferenciação dos fluxos da zona hiporreica, apresentados nos capítulos subsequentes.

Como já comentado, as três estações automáticas localizadas na BRO apresentaram boa consistência nos dados nestes períodos, mas deu-se preferência ao uso das informações coletadas pela Estação Monte Alegre (ponto E1 - Figura 7 e Figura 8), que não apresentou falhas de medição nestas datas. Tais dados são apresentados na Figura 17, Figura 18 e Figura 19, separadas pela proximidade das estações (dados de outono; dados de inverno e dados de primavera/verão) em que as campanhas de monitoramento foram realizadas. O gráfico apresenta todo o intervalo completo de datas, mesmo que o levantamento de dados com o DTS tenha iniciado nas manhãs ou tardes ou tenha apresentado algum tipo de descontinuidade. Adicionalmente, o intervalo de plotagem do eixo y foi comum para todas as figuras (faixa entre -1°C e 35°C), de forma a facilitar a comparação dos resultados entre as estações.

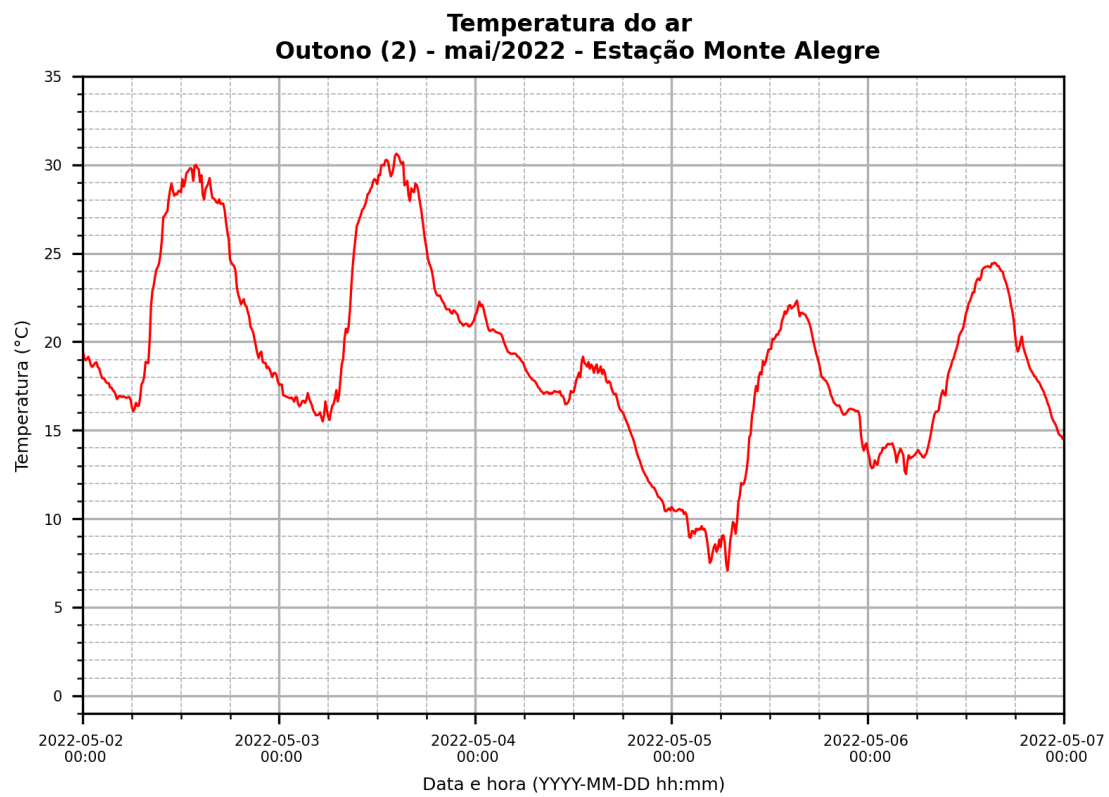
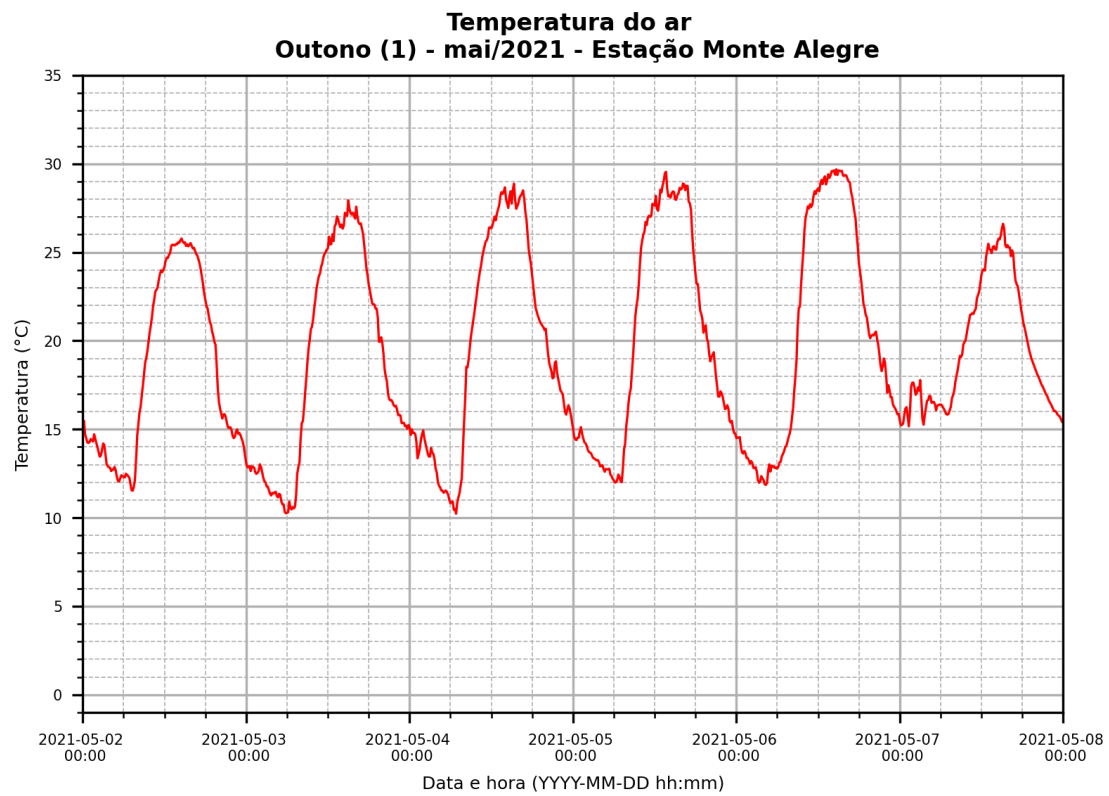
Nestes gráficos, destacam-se os seguintes pontos:

- As amplitudes térmicas diárias de temperatura do ar, observadas nas semanas de monitoramento da temperatura da água, variaram entre 8 e 18°C . O outono e inverno, estações de temperaturas mais frias e amenas, apresentaram as maiores variações (Figura 17 e Figura 18), enquanto a primavera e o verão apresentam menores amplitudes diárias (Figura 19), nos períodos apresentados.
- As temperaturas do ar máximas visualizadas nos períodos monitorados ocorreram durante a campanha de Verão (Figura 19), com valores superiores à 30°C em alguns dos dias de janeiro de 2022. Primavera e Outono também apresentaram dias quentes, com temperaturas máximas superiores a 25°C , enquanto as temperaturas máximas do ar no Inverno foram inferiores a 25°C .
- O padrão observado para as temperaturas máximas também se repete para as mínimas observadas nos períodos aqui apresentados. Durante a campanha de Verão, as temperaturas mínimas estiveram próximas dos 15°C . Já para as

campanhas de Outono e Primavera, as mínimas estiveram na faixa entre 10 e 15 °C, enquanto no Inverno, mínimas inferiores à 10 °C foram observadas. A ocorrência de frente frias, em algumas datas específicas, afetou os valores mínimos observados em algumas das datas monitoradas.

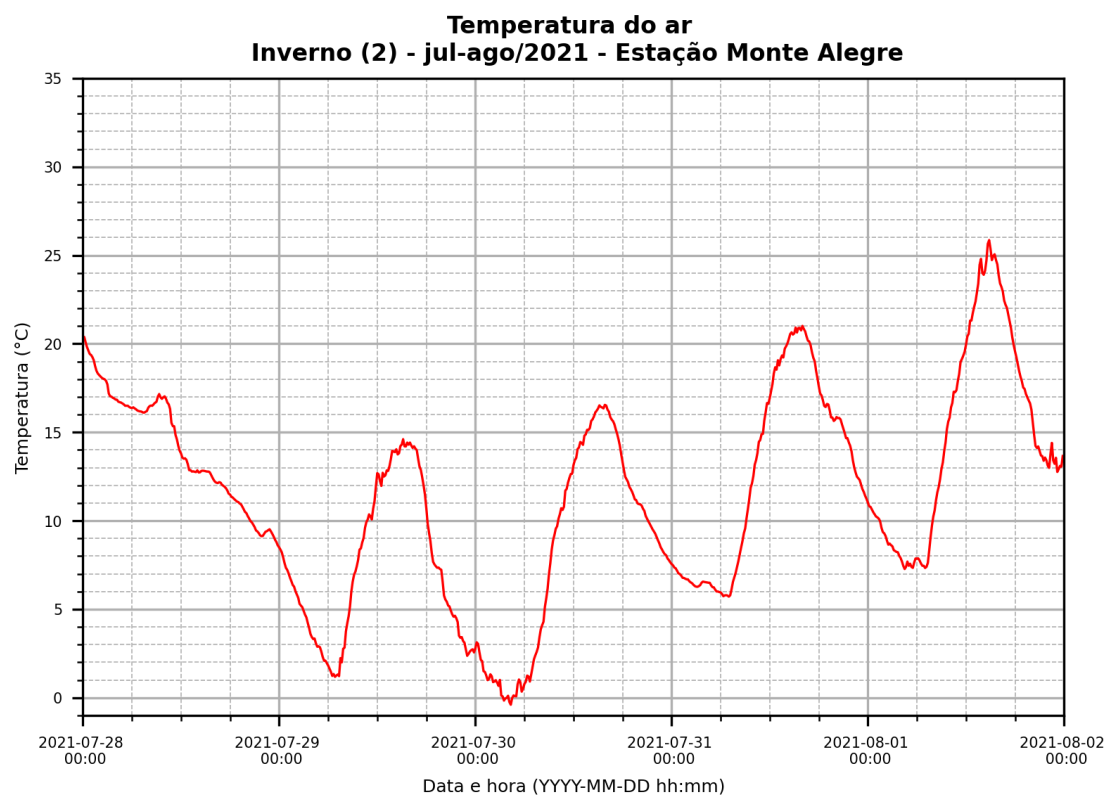
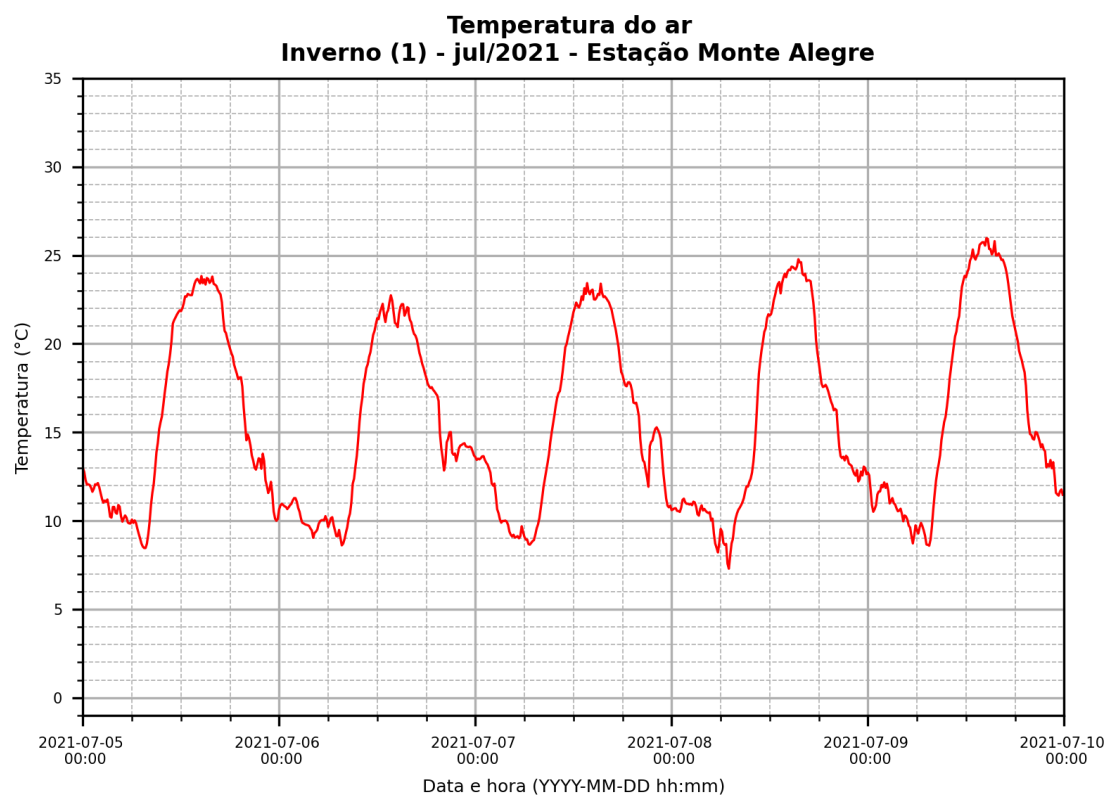
- A ocorrência de frente frias na região Sudeste do Brasil é visualizada durante as campanhas de Outono (2), entre os dias 04 e 05 de maio de 2022 (Figura 17) e Inverno (2), entre os dias 28 e 31 de junho de 2021 (Figura 18). Em ambos os períodos, é possível observar a queda acentuada da temperatura do ar ao longo do período diurno (da ordem de 10 a 15 °C), com a respectiva ocorrência de temperatura mínimas invertidas, em que as temperaturas mais baixas do dia ocorrem no fim da tarde e não no início das manhãs.
- A ocorrência da frente fria visualizada durante a campanha de Inverno (2), entre os dias 28 e 31 de junho de 2021 (Figura 18), foi considerada uma das mais intensas de todo o histórico de monitoramento meteorológico do Brasil (INMET, 2023). É possível observar nos dados monitorados pela Estação Monte Alegre a ocorrência de temperaturas mínimas negativas. A queda na temperatura da água também foi acentuada neste período, como será visualizado nos resultados apresentados nos capítulos seguintes.
- Na ocorrência da frente fria visualizada durante a campanha de Outono (2), apesar de menos intensa quando comparada com a ocorrida em 2021, foi possível observar uma queda na média de temperatura do ar nos dias subsequentes a ocorrência da frente fria (dias posteriores ao dia 05 de maio de 2022). Isso se diferencia do visualizado na frente fria intensa de 2021, onde os patamares de temperatura anteriores e posteriores ao fenômeno meteorológico foram próximos. O efeito desta condição na temperatura da água poderá ser melhor visualizado nos resultados apresentados em capítulos subsequentes.

Figura 17 - Dados de temperatura do ar, monitorados pela Estação Monte Alegre, para os períodos das campanhas de Outono (1) e Outono (2)



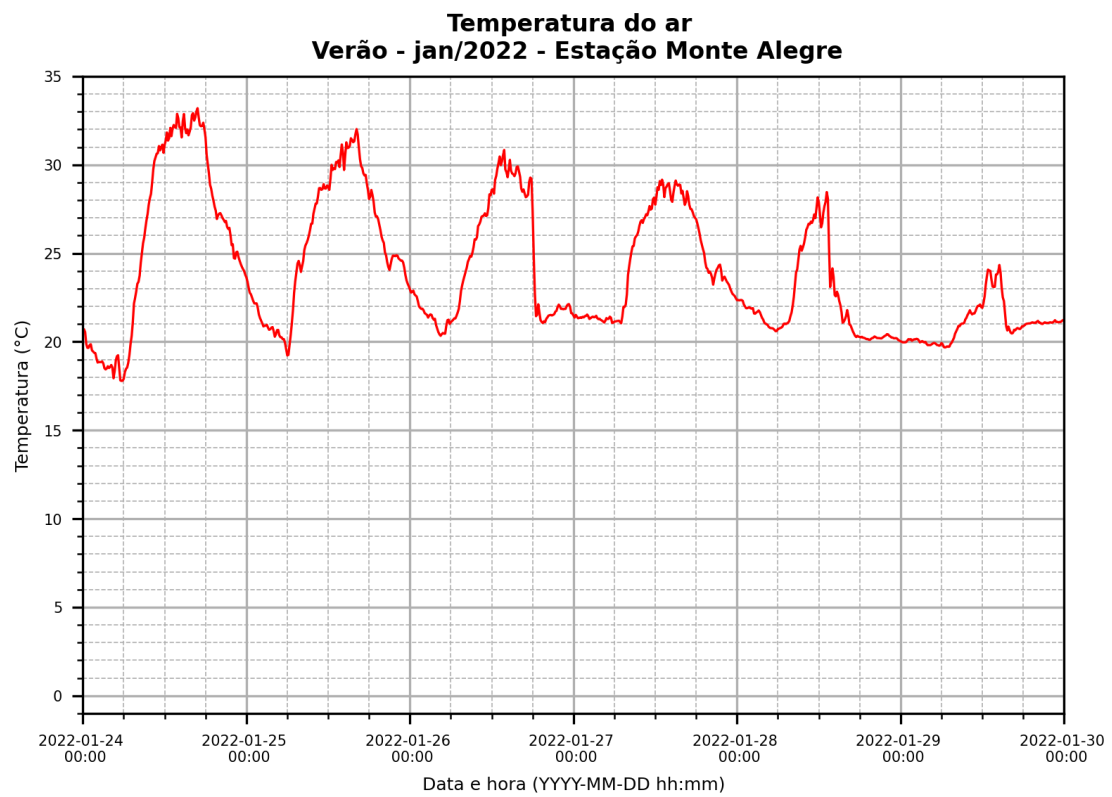
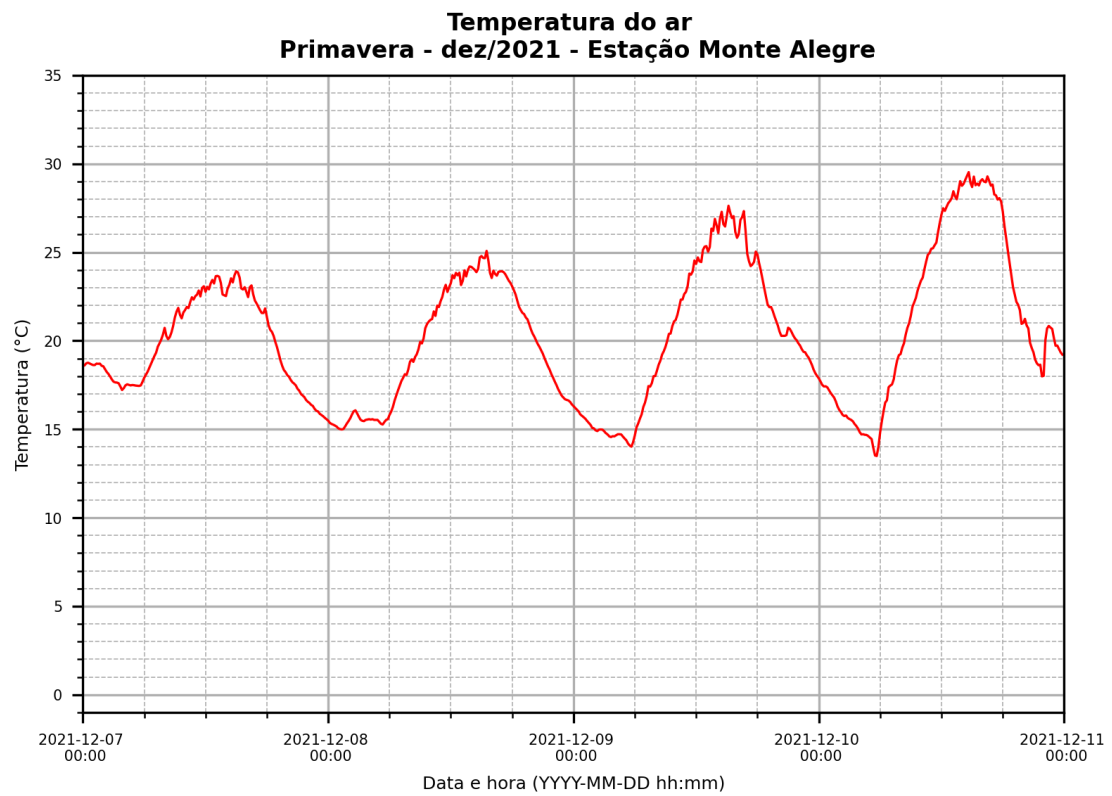
Fonte: Autor (2023)

Figura 18 - Dados de temperatura do ar, monitorados pela Estação Monte Alegre, para os períodos das campanhas de Inverno (1) e Inverno (2)



Fonte: Autor (2023)

Figura 19 - Dados de temperatura do ar, monitorados pela Estação Monte Alegre, para os períodos das campanhas de Primavera e Verão



Fonte: Autor (2023)

5 IDENTIFICAÇÃO VISUAL: USO DE HEATMAPS E GRÁFICOS DE LINHA PARA CARACTERIZAÇÃO DA INTERAÇÃO RIO-AQUÍFERO, A PARTIR DE DADOS DE TEMPERATURA

5.1 Introdução

A visualização de dados é a representação de elementos e informações utilizando tabelas, gráficos, mapas e outras ferramentas visuais. É um modo de comunicação que busca representar um conjunto de dados densos e complexos em formas de fácil compreensão e análise. Desta forma, pessoas em geral e profissionais podem compreender a ocorrência de padrões, tendências e *outliers* contidos em um conjunto de dados, assim como realizar comparações e correlações entre as informações.

O uso da visualização de dados apresenta bastante importância nos dias atuais, tanto em termos científicos quanto no cotidiano das pessoas em geral, considerando o volume de informação produzido e apresentado nas mais diferentes plataformas. O seu bom uso permite a comunicação das mais diferentes formas de informação, gerando insights e uma melhor compreensão de comportamentos e relações, além de dar suporte à tomadas de decisão.

A escolha de uma representação visual para dados e informações depende do modo em que tal dado precisa ser comunicado e o que se espera transmitir com aquela informação. Ao se pensar na temperatura como parâmetro físico comumente monitorado ao longo do tempo, no contexto hidrogeológico, visualizar sua variação temporal é uma das primeiras apurações buscadas. Neste sentido, a representação da série temporal com uso de gráficos de linha é uma abordagem inicial para dados de temperatura, com o parâmetro tempo comumente exibido no eixo das abcissas, enquanto o eixo das ordenadas exibe os valores de temperatura.

O uso dos dispositivos DTS para a medição de temperatura fez com que esta informação ganhasse uma componente adicional: a posição em que o dado de temperatura foi estimado, ao longo da extensão do cabo de fibra ótica. Assim, além da variação temporal, a variação espacial também é de interesse neste tipo de dado levantado. Neste sentido, o uso de mapas de calor (ou *heatmaps*), com a temperatura exibida em pixels coloridos, é uma das representações visuais mais utilizadas para exibição de temperaturas medidas de forma distribuída. O uso de gráficos com projeções tridimensionais também pode ser encontrado com essa finalidade, mas sua aplicação em textos e plataformas estáticas pode dificultar sua compreensão e análise.

Considerando a aplicação da medição distribuída de temperatura no contexto da interação rio-aquífero e da caracterização dos fluxos da zona hiporreica, o uso combinado de gráficos de linha e mapas de calor se torna interessante e são comuns na literatura do tema. Ambas as representações atuam como instrumento de identificação visual das zonas (ou regiões) em que tal interação é mais evidente, considerando a ocorrência das anomalias de temperatura, sendo que cada uma pode apresentar vantagens, considerando a extensão espacial e temporal dos dados de temperatura levantados.

Os *heatmaps*, ao relacionarem temperatura, espaço e tempo, permitem a plotagem contínua dos dados monitorados, ao longo de toda uma campanha de medição. Desta forma, é possível observar a ocorrência e a persistência das anomalias de temperatura, em relação às zonas vizinhas, que pode indicar locais de troca entre água superficial e subterrânea. A variação temporal e espacial destas zonas também pode ser avaliada neste contexto, permitindo comparações entre diferentes estações do ano e diferentes campanhas realizadas, caracterizando a sazonalidade da interação rio-aquífero identificada com a temperatura. Tais conclusões são obtidas a partir do contraste de cores trazido pelo mapa de calor, indicativo das anomalias de temperatura.

Já os gráficos de linhas serão utilizados para recortes temporais específicos nas campanhas de monitoramento realizados, relacionando o comprimento da fibra ótica ao longo do eixo das abcissas e os valores de temperatura no eixo y. Atuando de forma complementar aos *heatmaps*, tais representações permitirão a identificação de possíveis variações no comportamento das zonas de interação rio-aquífero, a depender do horário e da estação do ano em que as temperaturas foram observadas. Picos e vales são pontos de maior interesse, ao indicarem as anomalias de temperatura. Adicionalmente, é possível verificar o comportamento geral da temperatura ao longo do comprimento do rio, em termos de aquecimento e resfriamento.

5.2 Metodologia implementada

Considerando este contexto, neste trabalho foram produzidos mapas de calor e gráficos de linha para uso como ferramentas visuais de caracterização da interação rio-aquífero. Foram utilizadas bibliotecas de plotagem disponíveis na linguagem de programação Python. Tais imagens foram produzidas separadamente, para cada trecho de fibra ótica instalado na área de (jusante e montante), o que será realçado durante a discussão dos resultados. Tal produção pode ser dividida em três grupos:

- Mapas de calor representativos de períodos contínuos de monitoramento de temperatura da água. Considerando as campanhas iniciais (Outono (1), Inverno (1) e Inverno (2)), foram gerados *heatmaps* para cada intervalo contínuo de tempo, uma vez que optou-se por não se unir os levantamentos descontínuos, o que faz com que tais campanhas tenham mais de um mapa de calor construído. Já as campanhas de Primavera, Verão e Outono (2) resultam em um único *heatmap*, dada a medição contínua realizada nestas estações.
- Gráficos de linha que exibem a temperatura em horários específicos (0h, 4h, 9h, 13h e 17h) e comparam dados monitorados em diferentes campanhas e diferentes estações do ano. Tais horários foram definidos considerando sua maior repetição nas diferentes campanhas, considerando possíveis falhas e discontinuidades nos monitoramentos.
- Gráficos de linha que exibem a temperatura em horários específicos e comparam dados monitorados em uma escala inferior a um dia. Buscou-se exibir tais resultados em intervalos da ordem de 4 a 6h, realçando horários extremos (maiores ou menores temperaturas médias).

Os principais objetivos do uso destas ferramentas visuais na análise dos resultados são:

- Destacar as regiões com anomalias de temperatura, por meio do contraste de cores e da ocorrência de picos e vales, indicando sua posição ao longo do comprimento da fibra ótica instalada, tanto em termos de distância ao ponto de instalação do equipamento quanto em relação a indicação métrica exibida no próprio cabo instalado.
- Avaliar se tais regiões com anomalias de temperatura correspondem a locais de troca de água superficial ou subterrânea ou a locais de exposição do cabo de fibra ótica ao ar atmosférico, ao se avaliar as variações temporais da temperatura.
- Verificar se, em termos espaciais, há permanência das regiões de interação ao longo do tempo; e se há o surgimento de novas regiões de interação, em determinadas épocas do ano, considerando a variabilidade do regime de chuvas e a disponibilidade de água no aquífero.

- Observar se há mudança no padrão de identificação das regiões de interação rio-aquífero, em termos de pontos quentes e pontos frios, nas diferentes estações do ano ou mesmo em períodos do dia de uma mesma campanha. Adicionalmente, indicar a faixa de temperatura em que tal mudança ocorre.
- Estabelecer períodos ideais de monitoramento de temperatura da água em cada uma das estações do ano, visando a utilização deste traçador natural como ferramenta de observação da interação rio-aquífero, especialmente em períodos do ano em que o contraste entre as temperaturas da água superficial e água subterrânea é reduzido.
- Observar o comportamento médio da temperatura ao longo do comprimento longitudinal de rio monitorado, buscando compreender razões para o seu aquecimento/resfriamento.

5.3 Resultados

5.3.1 Mapas de calor (*Heatmaps*)

A Figura 20 e a Figura 21 apresentam os mapas de calor produzidos para os trechos de jusante e montante, respectivamente. Optou-se aqui pela apresentação conjunta dos *heatmaps* de todas as campanhas em um única figura, a fim de facilitar as comparações entre as estações e a discussão dos resultados obtidos. Para uma visualização com maior nível de detalhe, tais gráficos são apresentados de forma ampliada no Apêndice A deste trabalho.

Nestes gráficos, a abcissa principal (eixo x inferior) corresponde ao comprimento de fibra, em metros, enquanto a abcissa secundária (eixo x superior) corresponde a marcação métrica presente no cabo, facilitando a identificação das regiões em campo. Os trechos iniciais de cabo, correspondentes às seções de referência para calibração, não são exibidos nestes gráficos. As ordenadas correspondem à data e a hora em que o dado foi monitorado, enquanto as cores são representativas do valor da temperatura. Em função da variação da temperatura ao longo das estações e do objetivo em se destacar as suas anomalias, a escala numérica de cores para a temperatura varia em cada mapa de calor, como pode ser observado nas suas respectivas legendas. Ou seja, nem sempre a mesma cor representa a mesma temperatura. Aponta-se esta como uma dificuldade em se utilizar os *heatmaps*, ao se comparar várias estações do ano e com variações de temperatura média consideráveis, sob o risco de não evidenciar os locais de interação.

Adicionalmente, é importante salientar que, para as três campanhas iniciais, os mapas de calor correspondem a períodos selecionados, uma vez que os dados apresentaram descontinuidades no monitoramento. Já os *heatmaps* das últimas três campanhas correspondem aos vários dias monitorados em sequência. Tais períodos são indicados na parte superior de cada um dos gráficos, assim como podem ser identificados no eixo das ordenadas. Outra observação é com relação a quantidade de gráficos. Enquanto a Figura 20 apresenta seis mapas de calor, a Figura 21 apresenta apenas cinco, uma vez que o trecho de montante não teve dados coletados durante a campanha de Outono (1).

Ao se observar ambas as figuras, é possível verificar a presença de anomalias de temperatura em determinadas regiões, a partir da existência de segmentos verticais com coloração diferente (mais quente ou mais fria) em relação as regiões vizinhas. Tais anomalias podem corresponder aos locais de interação entre água superficial e subterrânea, onde a mistura das águas com diferentes características causa uma modificação local na temperatura observada a partir do cabo de fibra ótica. As anomalias também podem ser indicativas de regiões em que o cabo está exposto ao ar atmosférico, apresentando assim temperaturas que variam ao longo do tempo e com valores diferentes das áreas vizinhas que estão submersas.

A diferenciação entre estas duas situações ocorre por meio da observação dos padrões de temperatura nestas regiões ao longo do tempo. Os pontos de interação rio-aquífero são vistos como faixas verticais com uma única coloração, indicando a constância no fenômeno ao longo do tempo, sob os mesmos valores de temperatura, mais quentes ou mais frios que as regiões vizinhas. Já os pontos expostos ao ar são vistos como faixas verticais, cuja coloração varia, indo de temperaturas mais quentes a temperaturas mais frias, a depender do horário em que o dado foi levantado, acompanhando a variação diária da temperatura do ar. Estes trechos de cabo fora d'água são indesejáveis, mas acabam aparecendo em trechos extensos de medição, como os visualizados neste estudo, em virtude da movimentação do cabo pelo fluxo de água e pela variação dos níveis de água no ribeirão.

A ocorrência das faixas indicativas de anomalias de temperatura fica evidente em todos os mapas de calor apresentados, independentemente da extensão temporal apresentada. Porém, é perceptível que, quanto mais longo for o monitoramento, mais fácil é a tendência de confirmação entre quais faixas representam zonas de interação e quais representam pontos expostos ao ar atmosférico. Nos mapas de calor apresentados na

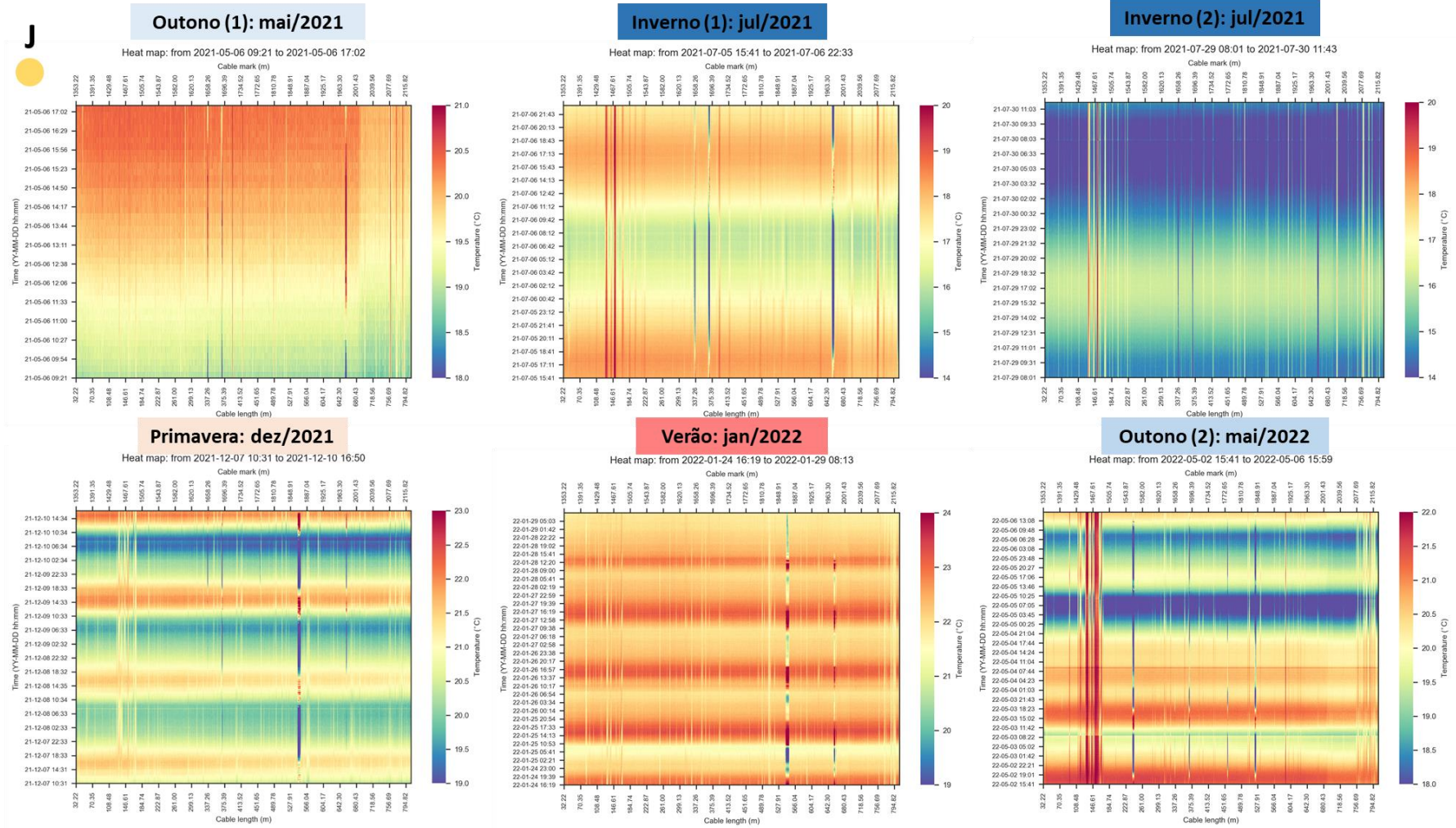
Figura 20 e na Figura 21, existem intervalos de tempo total de monitoramento entre 8 (campanha de Outono (1)) e 111 horas (campanha de Verão), que fortalecem esta observação.

Os mapas de calor que apresentam período de monitoramento superior à 24 horas (todos à exceção da campanha de Outono (1)), são observadas faixas horizontais alternadas, entre temperaturas mais quentes e temperaturas mais frias. Tais faixas são indicativas da variação diária da temperatura média da água, que aquece ao longo do dia, com a radiação solar como fonte de calor; e esfria durante às noites, com a perda de calor da água para o ar. É possível observar que as zonas de interação com água subterrânea, representadas pelas faixas verticais, também permanecem constantes, sofrendo pouca variação com essa sazonalidade. Em estações em que o contraste entre as temperaturas da água superficial e da água subterrânea é reduzido, como pode ser visto nas campanhas de Outono (1), Primavera e Verão, as faixas verticais podem momentaneamente se ocultar, reaparecendo posteriormente, em momentos de maior diferença entre as duas temperaturas. Tal fato é indicativo de quais horários mais adequados para o monitoramento da interação rio-aquífero, usando a temperatura como traçador, e será melhor evidenciado com os recortes temporais exibidos nos gráficos de linha.

Ao avaliar o conjunto de heatmaps de todas as campanhas e as faixas de anomalia de temperatura representativas de zonas de interação, com tendência de temperatura constante e persistente, com a faixa apresentando uma mesma coloração ao longo de todo o período de medição, é possível observar que tais zonas apresentam tendência de serem mais quentes do que o seu entorno, confirmando o visualizado por Wendland et al. (2022), que monitorou dados de temperatura na parte final do trecho de jusante, somente no período de inverno, em que o contraste entre as temperaturas é maior. Tal fato é uma característica das zonas tropicais, uma vez que trabalhos semelhantes, realizados em zonas temperadas, localizam as zonas de interação por meio de regiões mais frias que a temperatura média do curso superficial (LOWRY et al., 2007; MATHESWARAN et al., 2013; YAO et al., 2015).

Porém, ao se observar os heatmaps das campanhas de Primavera e Verão e as zonas de interação presentes em outras estações do ano, é possível observar a redução do contraste de temperatura e mesmo a inversão na forma de detecção das zonas de interação. Especialmente durante as tardes destes períodos do ano, tais zonas apresentam temperaturas mais baixas quando comparadas às regiões vizinhas. Tal fato se dá em virtude da elevação da temperatura do ar nestas estações e de sua consequente influência

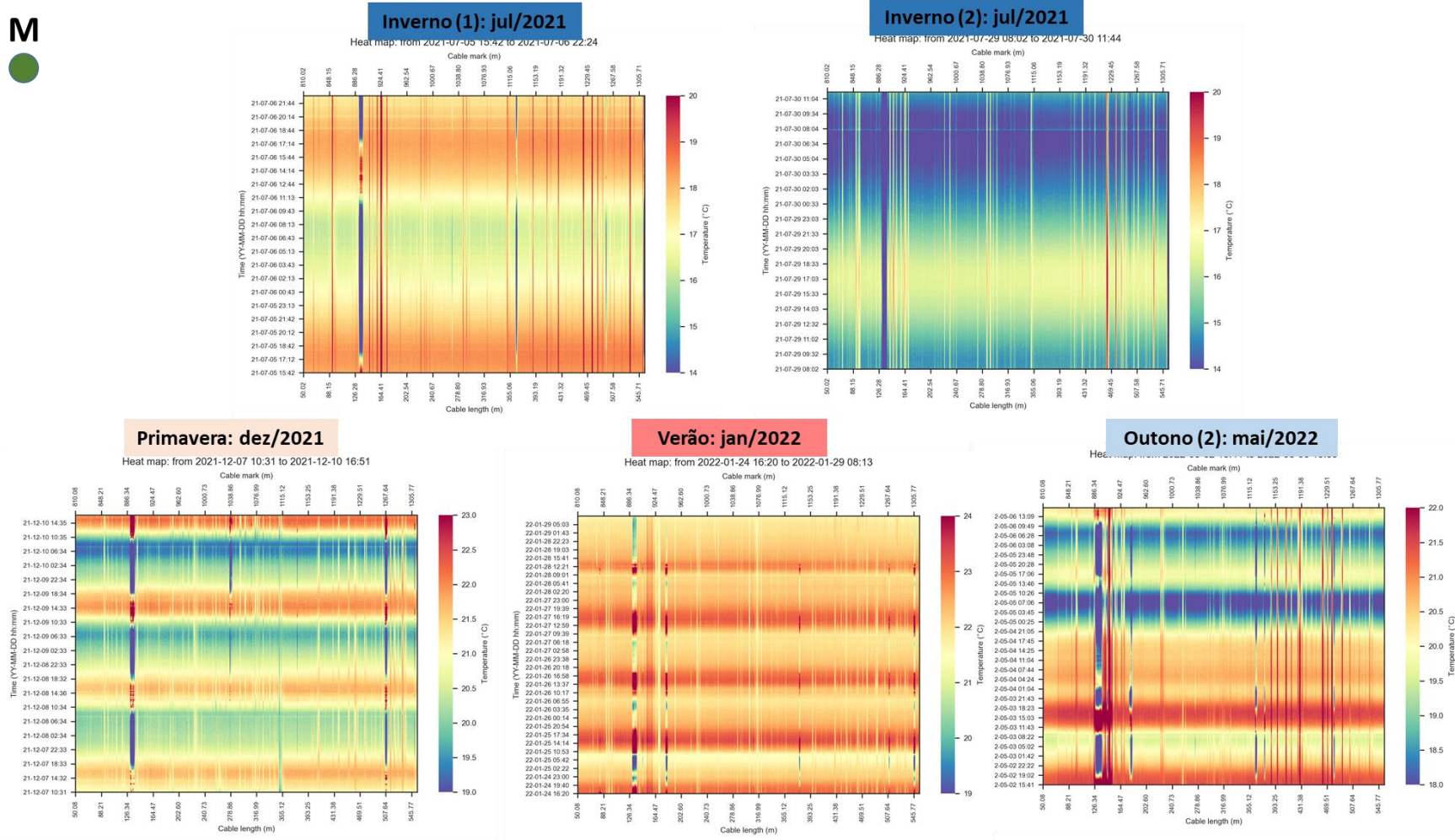
Figura 20 - Heatmaps de todas as campanhas, para o trecho de jusante. Versões ampliadas destas imagens podem ser vistas no Apêndice A



Fonte: Autor (2023)

Figura 21 - Heatmaps de todas as campanhas, para o trecho de montante. Versões ampliadas destas imagens podem ser vistas no Apêndice A

M



Fonte: Autor (2023)


na temperatura média da água do ribeirão, o que realça a necessidade de avaliação da influência da sazonalidade climática na identificação e caracterização da interação rio-aquífero, usando a temperatura como traçador. Isso será novamente destacado com o uso dos gráficos de linha, onde será possível identificar a temperatura de transição entre a detecção por pontos quentes ou por pontos frios.

A Tabela 1 e a Tabela 2 listam, para os trechos de jusante e montante, respectivamente, as posições das anomalias de temperatura de interesse, tanto em termos de zonas de interação com a água subterrânea quanto em termos de regiões de exposição do cabo ao ar. Tal posição é exibida em termos de comprimento do cabo de fibra ótica, a partir do ponto de instalação da central DTS, e pode ser lido no eixo principal das abcissas, em cada um dos *heatmaps*. As colunas indicam ainda as campanhas em que tais anomalias foram observadas, considerando possíveis modificações de condição ao longo do ano monitorado.

Essencialmente, tais tabelas indicam as regiões que apresentaram anomalias de temperatura em todas as campanhas realizadas e que são facilmente identificadas pelos mapas de calor, apresentando as características típicas de zonas de interação (faixa vertical com temperatura constante ou com baixas variações) e de trechos expostos ao ar (faixa vertical com variações bruscas de temperatura, superiores aos valores médios da temperatura da água). É possível identificar regiões com maior comprimento longitudinal e maior densidade de faixas verticais de temperatura constante, indicando uma descarga intensa de água subterrânea no meio superficial. Exemplos destas regiões podem ser vistos no trecho de jusante, entre $x = 130$ m e $x = 160$ m, entre $x = 170$ m e $x = 220$ m e entre 740 e 800 m, sendo este último segmento coincidente com o estudado por Wendland et al. (2022), que também identificou diversas anomalias de temperatura no levantamento de dados realizado em 2017. No trecho de montante, regiões de forte interação podem ser vistas nos segmentos entre $x = 90$ e $x = 100$ m, entre $x = 145$ e 170 m e $x = 480$ e 505 m.

Observando ainda as tabelas e o conjunto de mapas de calor apresentados, é possível observar que as regiões com anomalias de temperatura, indicativas de interação com as águas subterrâneas, apresentaram localização constantes ao longo das diferentes campanhas de monitoramento realizadas. Porém, a comparação visual dos mapas de calor de Primavera e Verão com os *heatmaps* das demais campanhas permite notar um aumento na densidade de faixas verticais de temperatura constante, indicando o surgimento de áreas de troca com meio subterrâneo nestas estações, mesmo em um período de redução

Tabela 1 - Posição das faixas de anomalia de temperatura, para o trecho de jusante

J 	Posição, em termos de comprimento da fibra, em metros	Outono (1)	Inverno (1)	Inverno (2)	Primavera	Verão	Outono (2)
Zonas de interação rio-aquífero	Entre x = 60 e x = 100 m						
	Entre x = 130 e x = 160 m						
	Entre x = 170 e x = 220 m						
	x = 290 m						
	x = 320 m						
	x = 390 m						
	x = 413 m						
	x = 488 m						
	x = 520 m						
	x = 566 m						
	x = 590 m						
	x = 630 m						
	x = 700 m						
	Entre x = 740 e x = 800 m						
Trecho de cabo fora d'água	x = 240 m						
	x = 337 m						
	x = 374 m						
	x = 452 m						
	x = 526 m						
	x = 550 m						
	x = 650 m						

Fonte: Autor (2023)

de contraste na temperatura entre estes dois meios. Considerando a data de realização destas campanhas, coincidentes com o período de chuvas da área de estudo, o aumento dos níveis freáticos favorece o escoamento subterrâneo e a sua descarga ao curso superficial. A ocorrência de escoamento subsuperficial, próximos do ribeirão, decorrentes dos eventos de chuva também pode contribuir para o aparecimento destes novos pontos de interação. Historicamente, os meses de dezembro e janeiro, nos quais as campanhas

de Primavera e Verão, apresentam as cargas hidráulicas elevadas em toda a BRO, detectadas a partir do monitoramento da área (COUTINHO, 2019; CALIXTO, 2020).

Tabela 2 - Posição das anomalias de temperatura, para o trecho de jusante

M 	Posição, em termos de comprimento da fibra, em metros	Inverno (1)	Inverno (2)	Primavera	Verão	Outono (2)
	Zonas de interação rio-aquífero	Entre x = 70 e x = 80 m				
Entre x = 90 e x = 100 m						
Entre x = 145 e x = 170 m						
Entre x = 230 e x = 240 m						
Entre x = 290 e x = 300 m						
x = 320 m						
x = 354 m						
x = 393 m						
x = 430 m						
x = 465 m						
Entre x = 480 e x = 505 m						
Entre x = 530 e x = 540 m						
Trecho de cabo fora d'água	Entre x = 130 e x = 145 m					
	Entre x = 170 e x = 180 m					
	x = 275 m					
	x = 360 m					
	x = 370 m					
	x = 475 m					
	x = 507 m					
	x = 545 m					

Fonte: Autor (2023)

A mudança na localização dos pontos de interação é uma condição ainda intrigante nos estudos do tema. Alguns autores já observaram, em campanhas curtas de levantamento de temperatura com dispositivos DTS, a manutenção destes pontos de interação (LOWRY et al., 2007; YAO et al., 2015). Em outros trabalhos, com mais campanhas de medição, foi possível observar mudanças das regiões de interação, para alguns metros a montante e a jusante dos pontos inicialmente observados

(MATHESWARAN et al., 2013), que podem estar ligados a fatores geológicos, topográficos, hidráulicos e hidrológicos. A ocorrência de novos pontos de interação, em virtude da ocorrência de chuvas, aumento dos níveis freáticos e dos níveis do curso superficial também foi recentemente relatado na literatura (LE LAY et al., 2019; SIMON et al., 2022). Tais observações corroboram com os resultados obtidos na área de estudo deste trabalho.

Ainda em referência a Tabela 1 e a Tabela 2, foram indicadas as regiões que o cabo esteve exposto ao ar durante as campanhas, não captando as temperaturas da água. Tais pontos são destacados por apresentarem anomalias de temperatura em relação as zonas vizinhas, mas não tendo interesse na identificação da interação com as águas subterrâneas. Ao serem listados nas referidas tabelas, o leitor pode encontrar com facilidade quais são estas regiões, sempre que necessário.

Outras observações pontuais nos mapas de calor podem ser notadas. Para o trecho de jusante (Figura 20), ao se observar especialmente a campanha de Outono (1), é possível observar um deslocamento vertical na faixa de cores, próximo do comprimento igual a 700 metros. Tal deslocamento indica uma queda pontual na temperatura média do ribeirão, quando se avalia uma medição por vez. Isso ocorre em virtude do encontro do curso principal com um pequeno afluente, na margem esquerda (visível no mapa da Figura 9), que possui águas mais frias, com menor influência de águas subterrâneas. Esta mudança pontual de temperatura também pode ser observada nos demais *heatmaps* do trecho, mas fica mais visível nas campanhas mais curtas.

Foi possível ainda observar o efeito das frentes frias ocorridas concomitantemente às campanhas de monitoramento de Inverno (2), em julho de 2021, e Outono (2), em maio de 2022 (*heatmaps* na coluna da direita, na Figura 20 e na Figura 21). É possível observar uma mudança mais brusca na coloração das faixas horizontais nestes dois gráficos, em períodos posteriores à queda de temperatura ambiente provocada pelo deslocamento de ar polar ao Sudeste do Brasil (verificar quedas de temperatura exibidas na Figura 17 e na Figura 18). Ao se comparar os mapas de calor das campanhas de Inverno (1) e Inverno (2), que foram realizadas no mesmo mês do ano e estão apresentadas com a mesma escala de cores (entre 14 e 20 °C), a diferença nos tons quentes e frios também demonstra o efeito da queda de temperatura na segunda campanha. Tal fato realça a influência da temperatura do ar na temperatura média da água no curso superficial, ao mesmo tempo que demonstra como as zonas de interação com a água subterrânea permanecem com temperaturas mais constantes, mesmo sob o efeito de fenômenos meteorológicos

sazonais, o que fortalece a ideia destas regiões como refúgios para diferentes espécies durante tais eventos.

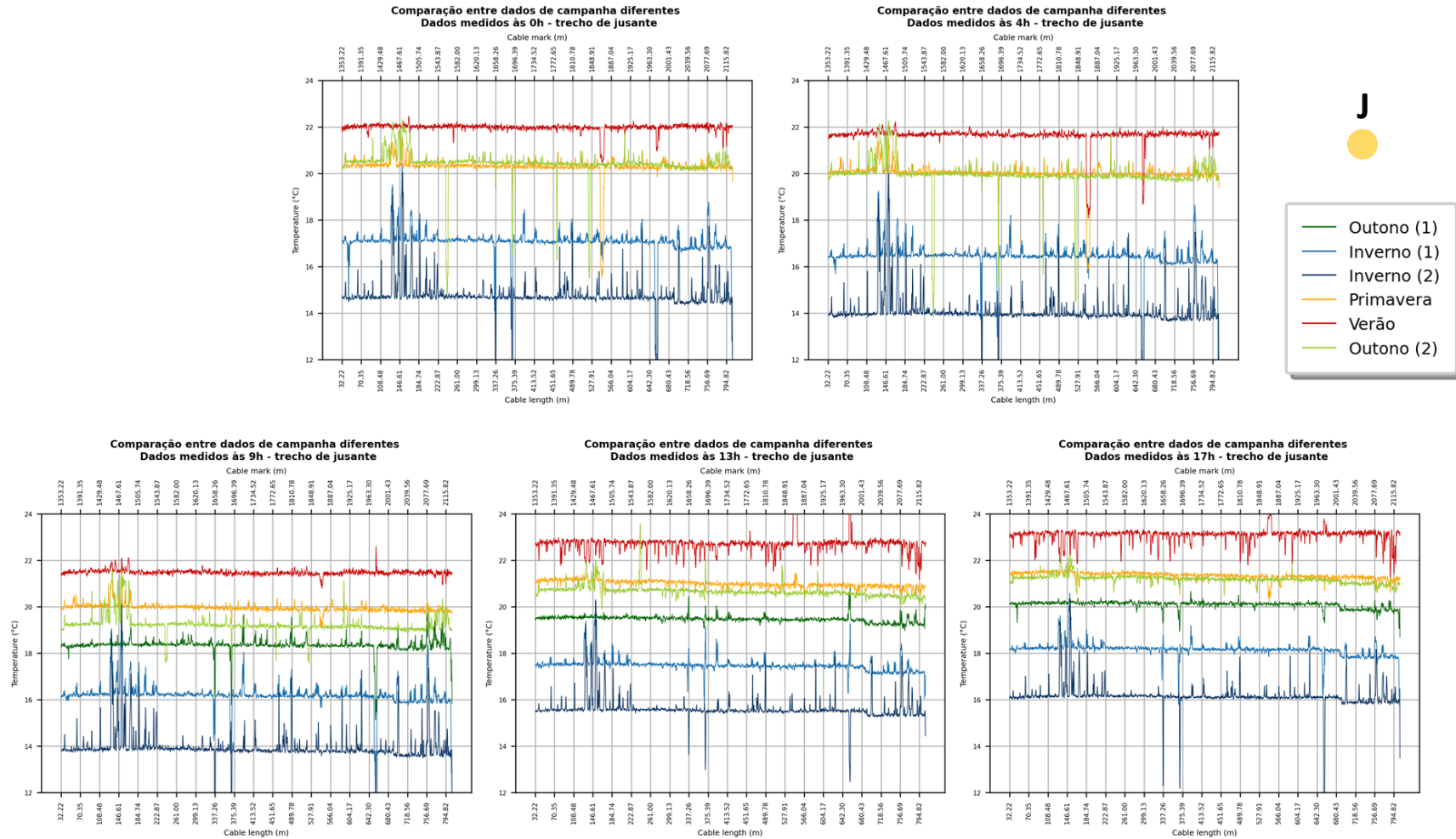
A partir da observação dos mapas de calor apresentados, é possível observar a sua potencialidade como ferramenta de visualização das áreas de interação rio-aquífero, detectadas com o uso da temperatura como traçador. Na maior parte das campanhas realizadas, as zonas de interação se apresentaram como regiões mais quentes do que as zonas vizinhas. Nas estações mais quentes do ano, tal condição se inverte com as áreas de interação sendo detectadas como zonas mais frias. A plotagem contínua de dados de temperatura é uma das vantagens dos *heatmaps* na caracterização dos locais de interação, ao permitir observar a constância da temperatura nestas áreas, em termos espaciais e temporais, mesmo sob a influência da variação diária da temperatura do ar e dos efeitos de fenômenos meteorológicos pontuais, como a ocorrência de frente frias. Apesar de tais características, o uso dos mapas de calor não permite uma classificação direta dos tipos de fluxos causadores das anomalias de temperatura, demandando o uso de metodologias adicionais para este fim. A escolha da escala de cores e do intervalo de temperatura indicados neste gráfico é fator importante, especialmente quando se compara informações obtidas em diferentes épocas do ano. Nesses casos, o uso de um intervalo único pode ocultar áreas de interação, especialmente em períodos de baixo contraste entre as temperaturas da água superficial e da água subterrânea.

5.3.2 Gráficos de linha

Como já comentado, o uso dos gráficos de linha para a representação de dados de temperatura levantados por dispositivos DTS é interessante para a realização de recortes temporais específicos, permitindo a comparação do comportamento entre as diferentes estações em que o dado foi monitorado ou mesmo a comparação das temperaturas em uma mesma campanha de monitoramento. Tais recortes buscam apresentar diferentes pontos de vista dos dados monitorados, muitas vezes não visíveis na plotagem contínua dos mapas de calor.

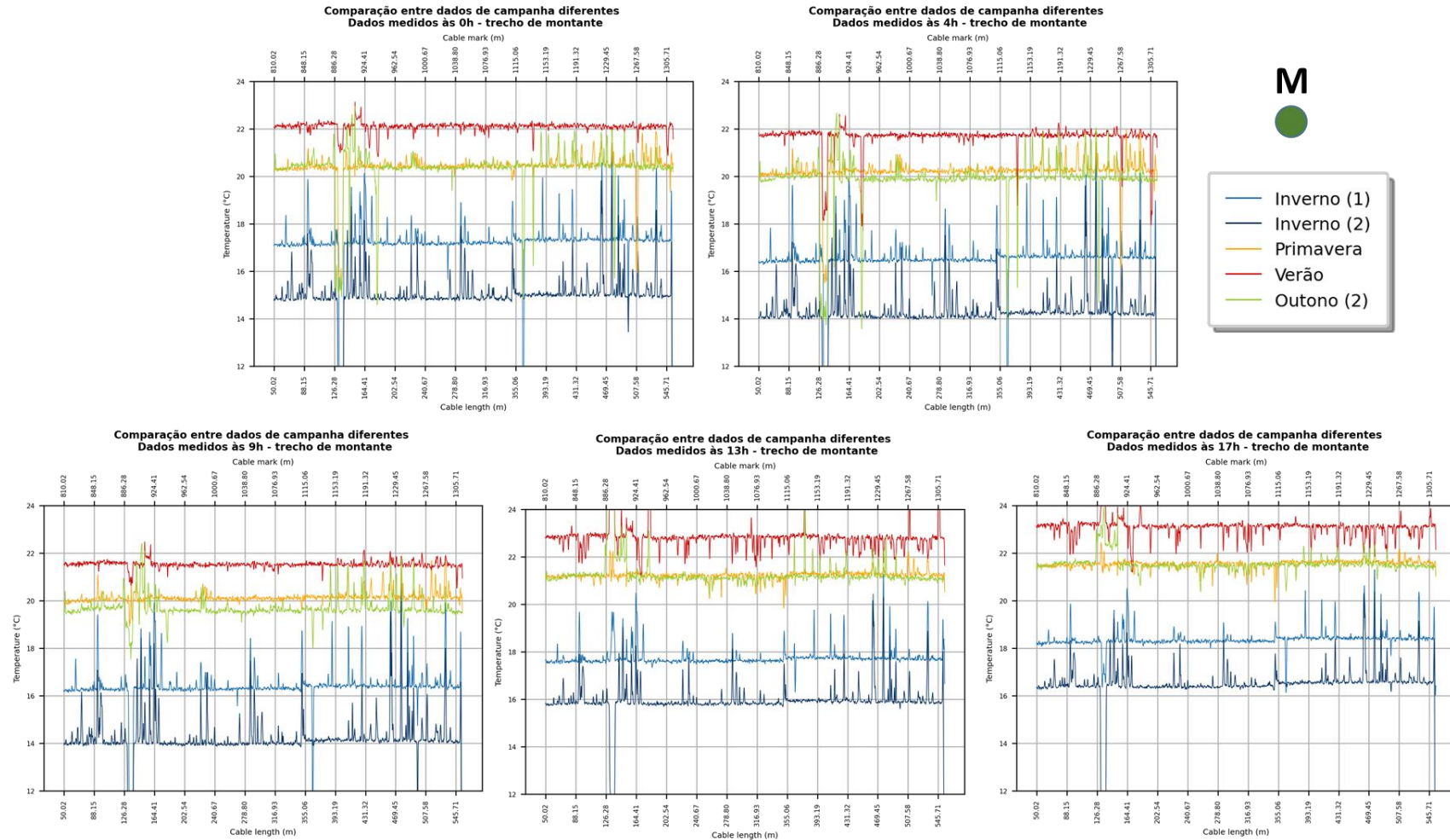
A Figura 22 e a Figura 23 apresentam cinco gráficos de linha, com dados de temperatura dos trechos de jusante e montante, respectivamente, coletados em diferentes horários do dia: às 0h, às 4h, às 9h, às 13h e às 17h. Tais horários foram elencados por serem aqueles que possuíam dados representativos em todas as campanhas de monitoramento realizadas, mesmo naquelas em que houve descontinuidade nas medições. Uma versão ampliada de tais gráficos é apresentada no Apêndice B deste trabalho,

Figura 22 - Comparação de dados de diferentes estações, para o trecho de jusante. Cada gráfico representa um determinado horário, enquanto cada linha representa uma estação do ano



Fonte: Autor (2023)

Figura 23 - Comparação de dados de diferentes estações, para o trecho de montante. Cada gráfico representa um determinado horário, enquanto cada linha representa uma estação do ano



Fonte: Autor (2023)

permitindo ao leitor a visualização individual de cada quadro, caso necessário. Outros detalhes da montagem de tais gráficos também são indicadas na referida seção.

Nas referidas figuras, os gráficos de todos horários estão apresentados na mesma faixa de temperatura (eixo das ordenadas), no intervalo entre 12 e 24° C. O dado de cada campanha realizada é apresentado por uma linha de diferentes cores, conforme indicado na legenda, posicionada no lado superior direito, junto a qual também se encontra a identificação do trecho a que os gráficos se referem. A campanha de Outono (1) não possui dados para os horários noturnos, para o trecho de jusante; e não possui dados para o trecho de montante, que se encontrava rompido à época da realização da campanha.

Considerando o uso do mesmo intervalo de temperatura em todos os gráficos, é possível observar como a sazonalidade da temperatura do ar em cada estação afeta também as temperaturas médias da água. As linhas referentes às campanhas de Inverno (1) e Inverno (2), em tons de azul, são aquelas que apresentam temperaturas médias mais baixas, enquanto a campanha de Verão, representada pela linha em vermelho, apresenta as maiores temperaturas. Primavera e Outono se caracterizam como estações de transição e apresentam temperaturas médias intermediárias. A comparação entre mesmas estações (Outono (1) versus Outono (2) e Inverno (1) versus Inverno (2)) também demonstra a possibilidade de variação da temperatura da água em períodos semelhantes, que dependem das condições de temperatura do ar de períodos próximos ao monitoramento realizado. Cruzando tais dados com os dados de temperatura ambiente da Estação Monte Alegre (Figura 17 e Figura 18), nota-se que as condições atmosféricas a cada campanha eram diferentes, resultando em temperaturas da água também diferentes, mesmo para estações do ano iguais.

A plotagem conjunta dos gráficos de linha com dados de diferentes estações do ano permite também observar a persistência das zonas de interação, ao longo das diferentes campanhas e também em diferentes horários do dia. A ocorrência de picos de temperatura, especialmente nos períodos de inverno são indicativos iniciais da descarga de água subterrânea no curso superficial, como já indicava Wendland et al. (2022). Ao se avaliar os resultados das demais estações, nota-se que tais zonas de interação são persistentes, com picos de temperatura também se repetindo em diferentes épocas do ano, mas com menores desvios em relação a temperatura média da água naquela campanha, em virtude da redução no contraste das temperaturas das águas de ambas as fontes.

A mudança de característica na identificação da interação rio-aquífero fica mais clara ao se observar os dados de temperatura das campanhas de Primavera e Verão,

especialmente durante o período vespertino (gráficos das 13h e 17h). Nestas estações e nestes horários, as mesmas regiões que apresentavam picos de temperatura, indicativos de zonas de temperatura, passam a apresentar vales nos gráficos de linha, indicativos de zonas mais frias, em relação a temperatura média do rio naquele período. Tal fato reforça a necessidade estudos que levem em conta a sazonalidade da temperatura, ao ser utilizada como traçador natural do fenômeno de interação rio-aquífero.

Ainda observando os dados das campanhas de Primavera e Verão, fica mais evidente o aparecimento de zonas de interação rio-aquífero decorrentes do aumento dos níveis freáticos e dos eventos de chuva. Exemplos de tais trechos podem ser observados, especialmente nos gráficos das 13h e 17h, no trecho de jusante (Figura 22), entre $x = 220$ m e $x = 300$ m; e no trecho de montante (Figura 23), entre $x = 180$ m e $x = 210$ m; entre $x = 310$ m e $x = 330$ m e entre $x = 430$ m e $x = 450$ m. Em tais regiões, durante os períodos de inverno e outono, anomalias de temperatura não eram observadas. Já nos períodos de primavera e verão, é possível notar o surgimento de pequenos vales nos gráficos de linha, semelhantes aos observados em outras zonas, onde a interação já estava caracterizada.

Ao se observar os gráficos de linha e esta transição na forma de identificação da interação rio-aquífero, é possível indicar a temperatura de 21°C como limiar para esta mudança. Assim, observando a temperatura média da água na campanha, quando tal valor é inferior a 21°C , as zonas de interação são identificadas como regiões quentes, enquanto valores médios de temperatura da água superiores a 21°C resultarão em áreas de interação identificadas como regiões mais frias. Tal valor é condizente com os valores de temperatura de água subterrânea observados em poços de observação de pequena profundidade, localizados na área de estudo, assim como se aproxima do valor médio de temperatura do ar da região (WENDLAND et al., 2007; CABRERA et al., 2016), ao qual a temperatura da água subterrânea tende a se aproximar (NGWA, 2019).

Adicionalmente, os períodos indicados para ocorrência da mudança na forma de identificação da interação rio-aquífero, de regiões quentes para regiões frias, se aproxima bastante da hipótese sugerida neste trabalho, a partir da comparação do levantamento de temperaturas pontuais de água superficial e de um dos poços da bacia (veja a Figura 10). Tal análise é um primeiro passo para trabalhos futuros, em outras bacias tropicais, que visem utilizar a temperatura como traçador da interação rio-aquífero, a fim de estabelecer os períodos de maior e menor contraste das temperaturas, assim como quais os períodos (manhãs, tardes ou noites) mais interessantes para o monitoramento, considerando a sua realização por meio de campanhas.

Ao se comparar os gráficos de linha do trecho de jusante e de montante, é possível observar que a quantidade de anomalias de temperatura é maior no trecho de montante, mesmo esse trecho possuindo um menor comprimento de fibra ótica instalado. Tal fato pode ser explicado pela posição do trecho em uma região de alto curso da bacia, mais próximo da nascente do Ribeirão da Onça. A maior declividade topográfica das áreas de alto curso das bacias hidrográficas tende a favorecer o trânsito da água subterrânea e a sua contribuição ao meio superficial (CARUSO et al., 2016; LEE et al., 2020).

Ao se observar todos os gráficos de linha apresentados, é possível observar uma pequena redução na temperatura média da água ao longo do comprimento da fibra ótica, inferior a 0,5 °C. Esta redução coincide com o sentido de fluxo do ribeirão, sendo observado para valores de crescentes de comprimento de fibra (eixo x), nos gráficos do trecho de jusante; e para valores decrescentes de comprimento de fibra, nos gráficos do trecho de montante. É importante lembrar que a fibra parte do ponto de instalação central do equipamento, em direção às calhas Parshall 1 e 2 (veja mapa da Figura 9). Assim, para o trecho de jusante, o aumento do comprimento da fibra coincide com o sentido do fluxo do ribeirão, enquanto para o trecho de montante, a situação se inverte.

Desta forma, foi possível observar que, na área de estudo, o curso superficial principal tem tendência de redução de temperatura ao longo do seu comprimento. Apesar das contribuições de água subterrânea quentes, a mistura desta com a água superficial, em maior volume e com temperaturas mais amenas, tende a reduzir as temperaturas médias observadas. Adicionalmente, a água superficial tende a perder calor ao meio atmosférico, em termos de calor sensível e calor latente, o que pode contribuir para a redução de temperatura observada. Tal fato poderia ainda ser confirmado em estudos posteriores, por meio do balanço de fluxos de calor do rio, aproveitando da cobertura temporal e espacial dos dispositivos DTS, contribuindo a uma área ainda carente na literatura (OUELLET e CAISSIE, 2023). A presença de áreas ripárias preservadas, que reduzem a incidência direta de radiação solar e também causam sombreamento no curso superficial também é característica influente na ocorrência de um gradiente decrescente de temperatura, ao longo do comprimento do rio (CAISSIE, 2006; GARNER et al. 2014, OUELLET e CAISSIE, 2023).

Outro destaque a ser feito é a queda de temperatura localizada visualizada nos gráficos de linha do trecho de jusante, próximo ao comprimento $x = 700$ m, onde o afluente da margem esquerda se encontra com o curso principal. Tal destaque já havia sido observado nos heatmaps, mas é bem evidenciado pelos gráficos de linha exibidos. A

partir de observações in situ e com os resultados observados, estima-se que o afluente possui pouca contribuição de águas subterrâneas apresentando temperaturas mais próximas a temperatura do ar. Corrobora a esta conclusão o fato de que, em estações de baixo contraste de temperatura entre as águas de diferentes origens e a respectiva elevação da temperatura do ar, tais como a Primavera e o Verão, esta queda local deixa de ser visualizada nos gráficos de linha.

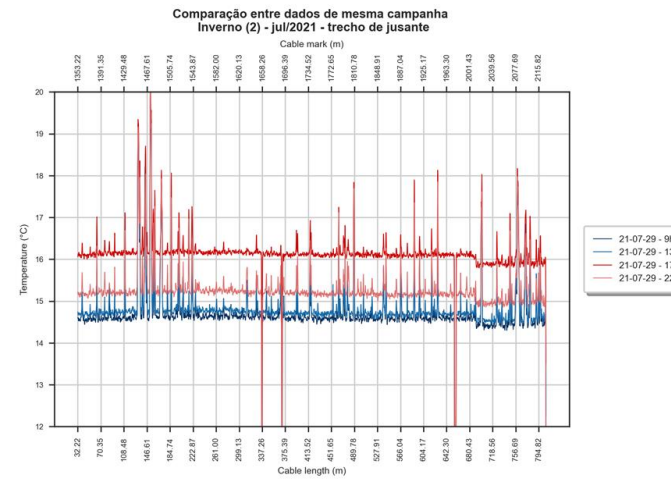
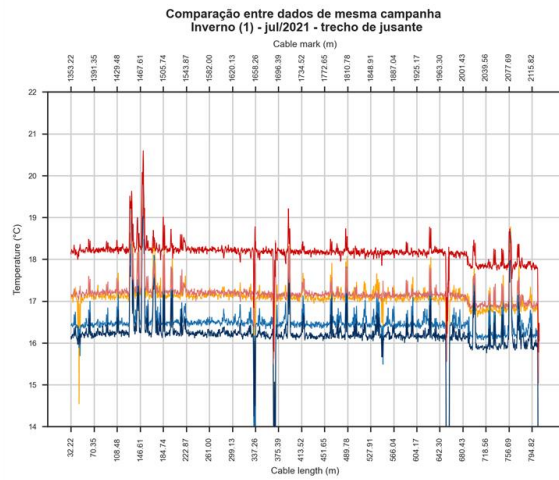
Passando às comparações de dados de uma mesma campanha, medidos em diferentes horários, a Figura 24 apresenta dados medidos durante a campanha de Inverno (1) e Inverno (2), nos dias 06 de julho (coluna da esquerda) e 29 de julho de 2021 (coluna da direita). Os dados do trecho de jusante são mostrados na linha superior, enquanto os dados de montante são exibidos na linha inferior. É possível observar em tais gráficos a persistência dos picos de temperatura em zonas de interação rio-aquífero, caracterizadas pelas regiões com temperaturas mais elevadas, em relação à temperatura média. Por se tratar do período de maior contraste entre a temperatura das águas de diferentes fontes, a evidenciação de tais zonas é facilitada. Por lidar diretamente com os valores numéricos da temperatura, o uso dos gráficos de linha para recortes temporais em uma mesma campanha, é complementar ao uso dos mapas de calor. Por não depender de uma escala de cores, os as anomalias de temperatura, com maior ou menor intensidade, ficam evidenciadas.

Nesse sentido, as diferentes intensidades dos picos de temperatura possibilitam uma classificação visual inicial dos pontos de interação, visando diferenciar a origem dos fluxos. Considerando que a variação da temperatura média da água nos diferentes horários causa redução no contraste das temperaturas, alguns picos de menor intensidade podem ser ocultados momentaneamente, mesmo nas medições de inverno. Por outro lado, outras zonas não são ocultadas por esta condição. Os picos ocultos momentaneamente apresentam pequenos fluxos e com temperatura mais próxima da temperatura média da água superficial. Assim, essas pequenas anomalias de temperatura podem ser indicativas de fluxos de zona hiporreica.

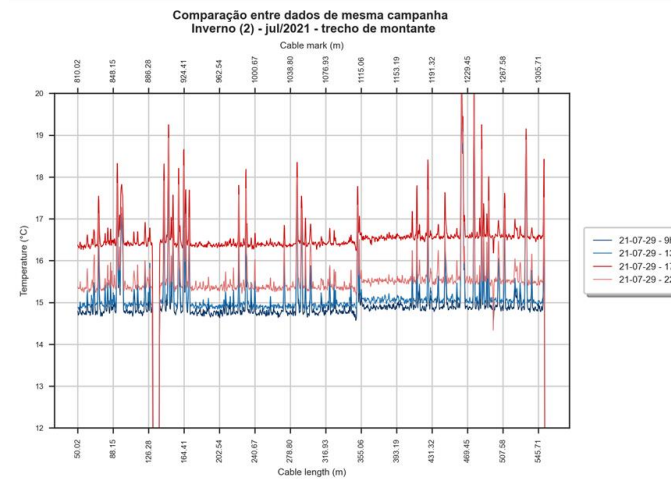
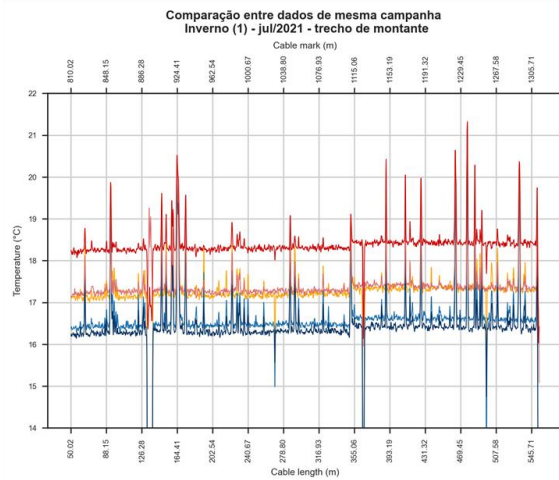
É importante lembrar que a temperatura medida pela fibra ótica é referente à mistura entre as águas superficial e subterrânea. Neste sentido, picos de maior intensidade e maior persistência são indicativos de locais com maiores descargas de água subterrânea, que podem indicar maior gradiente hidráulico e contribuições de camadas mais profundas do aquífero. Nestas regiões, é possível notar uma tendência de aproximação dos valores de temperatura ao limiar de 21°C, valor identificado como de transição entre a forma de

Figura 24 - Gráficos de linha comparando dados monitorados, em diferentes horários, durante a campanha de Inverno (1) e Inverno (2). Primeira linha exibe dados para o trecho de montante enquanto a segunda linha apresenta para o trecho de jusante.

J



M



Fonte: Autor (2023)

detecção da interação e próximo da temperatura média das águas subterrâneas na região. Quanto mais próximo desse limiar, entende-se que maior é a proporção de água subterrânea em relação à água superficial na mistura. Adicionalmente, ressalta-se que a temperatura ambiente e sua respectiva influência na temperatura média da água influencia no valor máximo dos picos, considerando a temperatura medida como resultante da mistura entre as duas origens. A comparação dos valores máximos nos picos entre as duas datas evidencia este fato.

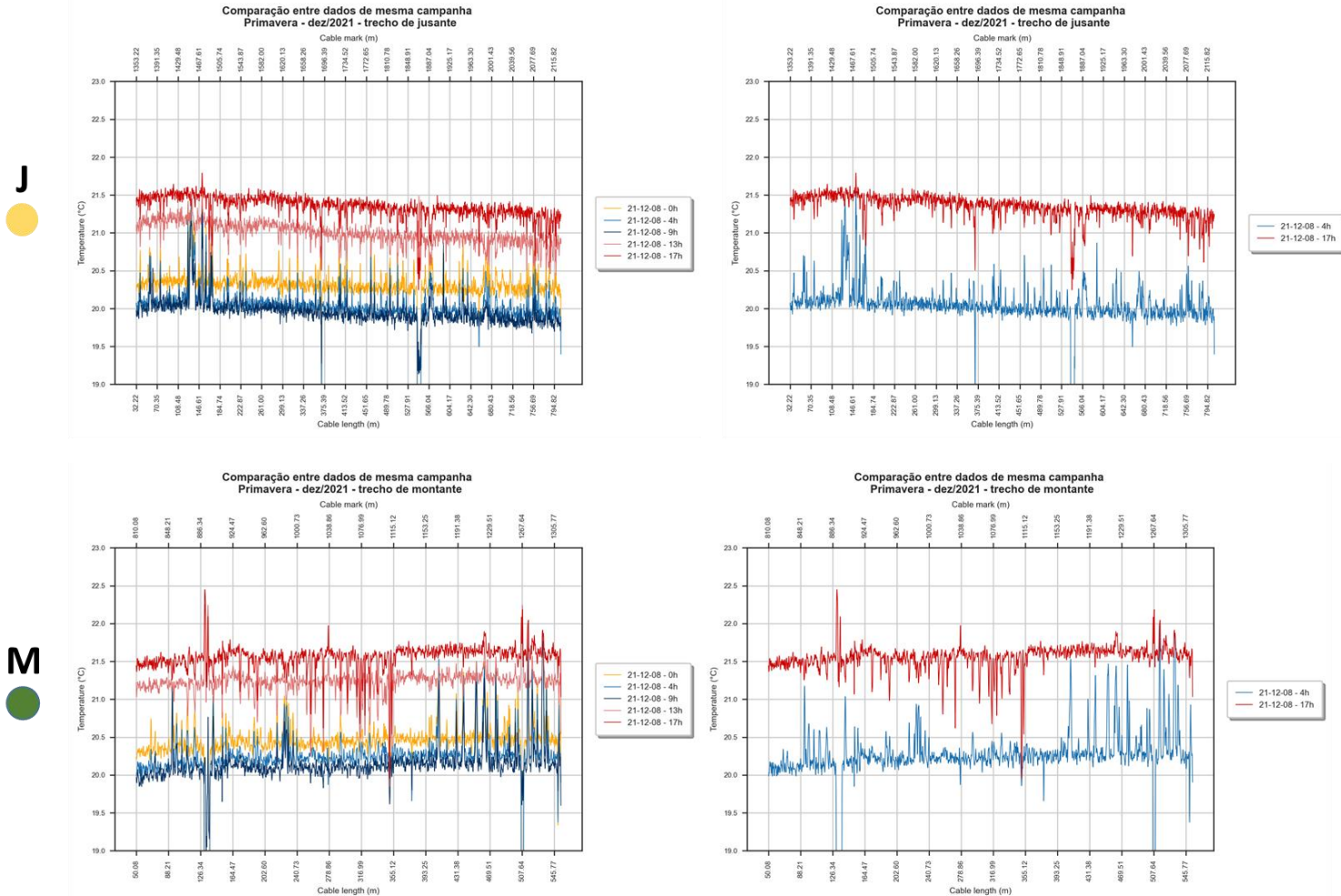
Apesar desta indicação inicial, a partir da análise da persistência dos picos de temperatura ao longo do tempo, utilizando os gráficos de linha, a indicação da origem dos fluxos precisa ser confirmada com o uso de metodologias adicionais, como as utilizadas nos demais capítulos deste trabalho. A análise dos sinais de temperatura em diferentes períodos do ano também complementa tal indicação.

A Figura 25 apresenta os dados de temperatura monitorados na campanha de Primavera, a partir de um recorte do dia 08 de dezembro de 2021. A coluna da esquerda apresenta gráficos de linha para 5 horários diferentes do referido dia, indicados na legenda; enquanto a coluna da direita apresenta isola as linhas com valores extremos de temperatura, obtidos às 4h e às 17h. Os dados do trecho de jusante são representados na linha superior, enquanto o trecho de montante é mostrado na linha inferior.

O interesse neste recorte temporal é observar que nesta estação a transição na identificação dos pontos de interação já se evidencia. Enquanto nas madrugadas e nas manhãs (dados das 0h, 4h e 9h), as zonas de interação rio-aquífero se apresentam mais quentes que a temperatura média da água, nos períodos vespertinos (dados das 13h e 17h), as zonas de interação se mostram mais frias que seu entorno. Em ambos os trechos, o limiar de transição 21 °C fica destacado, uma vez que as temperaturas vespertinas estão próximo ou acima deste valor, enquanto as temperaturas matutinas estão abaixo de tal patamar.

A separação dos períodos de ocorrência de cada uma das formas de identificação é importante, no contexto de programação de campos de monitoramento. Mesmo em estações de transição, como a primavera e o outono, onde as temperaturas ambientes e, por consequência, a temperatura média da água superficial, sofrem alterações, o uso da temperatura como traçador natural ainda é passível de uso, levando em conta determinados momentos do dia (madrugadas/manhãs e fim de tardes/noites), onde o contraste ainda pode ser observado. No contexto da análise dos dados, ao se utilizar metodologias adicionais, tal separação também é relevante, uma vez que os valores extre-

Figura 25 - Gráficos de linha comparando dados monitorados, em diferentes horários, durante a campanha de Primavera. Primeira linha exibe dados para o trecho de montante enquanto a segunda linha apresenta para o trecho de jusante.



Fonte: Autor (2023)

mos obtidos nos picos / vales são de interesse para a separação das zonas de interação e da classificação dos fluxos.

A Figura 26 apresenta os dados monitorados na campanha de Verão, em um recorte do dia 26 de janeiro de 2022. Analogamente à figura anterior, a coluna da esquerda apresenta dados de cinco horários diferentes, enquanto a coluna da direita separa as temperaturas da madrugada (4h) e do fim da tarde (17h). As linhas exibem os dados para cada um dos trechos de rio monitorados.

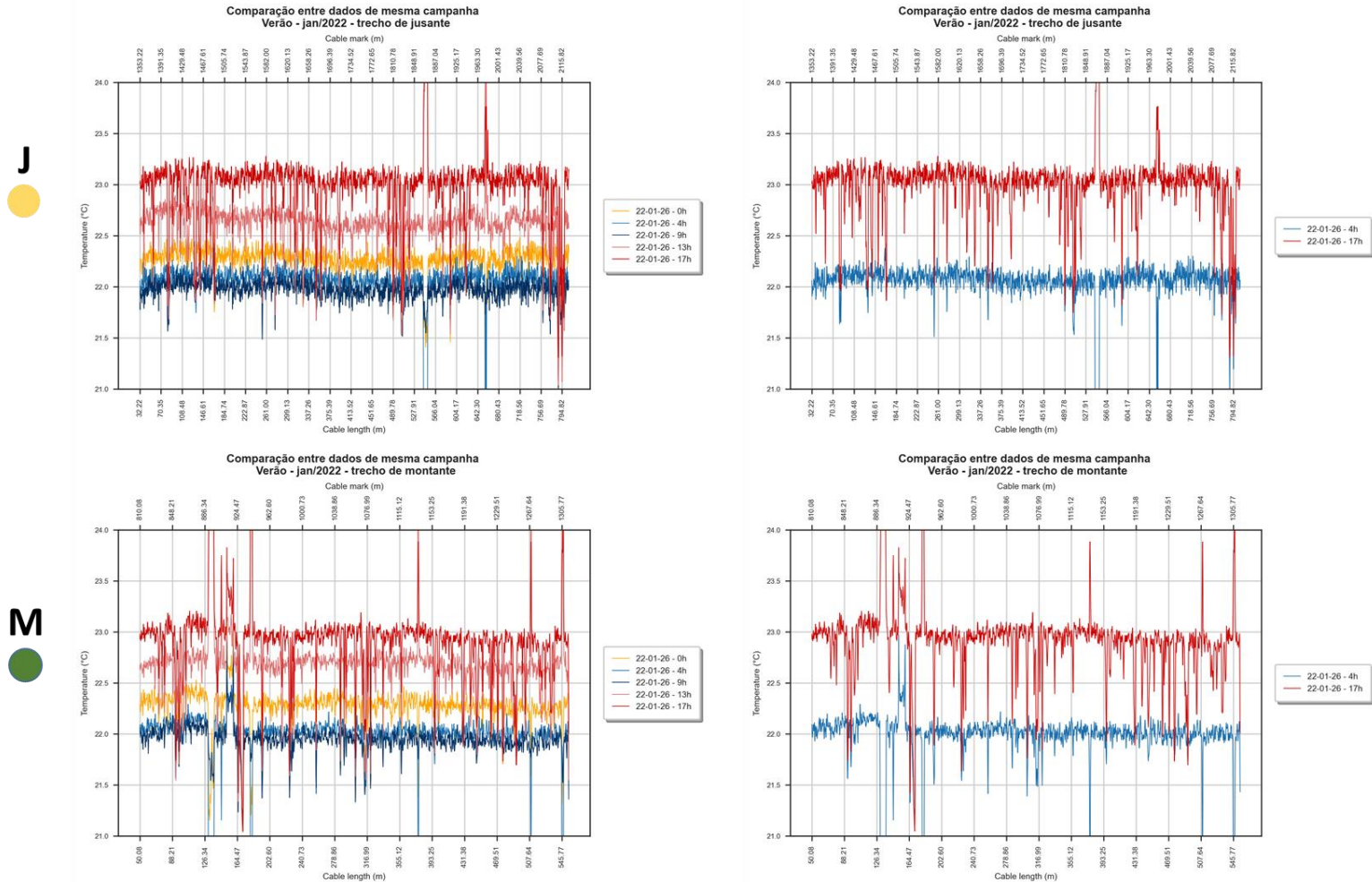
Ao observar a figura, nota-se que os patamares de temperatura média da água são todos superiores à 21 °C e às zonas de interação se apresentam como regiões mais frias que as zonas vizinhas em todos os horários plotados. A partir dos *heatmaps*, tal situação já havia sido evidenciada, de forma contínua, confirmando a hipótese de que nos períodos mais quentes do ano, as zonas de interação tem sua identificação modificada. Tal fato também reforça a importância do levantamento sazonal das temperaturas da água.

Ainda no contexto dos dados de Verão, a ocorrência dos vales (ou picos invertidos) mais acentuados passa a ocorrer nos períodos vespertinos. Como as temperaturas ambientes máximas tendem a ocorrer nestes períodos do dia e a obtenção do maior contraste entre a temperatura da água subterrânea e a temperatura da água superficial consiste no afastamento do limiar de 21 °C, a visualização das zonas de interação fica facilitada nestes períodos. Assim, em termos de prioridade, no caso da realização de campanhas mais curtas nesta época do ano, recomenda-se o levantamento de dados durante as tardes e início das noites.

A Figura 24, a Figura 25 e a Figura 26 realçam ainda a variação da temperatura média do rio, em termos longitudinais, ao longo do comprimento da fibra ótica (eixo x) dos gráficos. A tendência de resfriamento das águas superficiais, ao longo do comprimento do rio, no sentido de montante para jusante, é confirmada em todos os recortes apresentados. É importante lembrar que o sentido de fluxo varia nos gráficos, considerando o posicionamento da fibra a partir do ponto de instalação do equipamento central. Assim, o sentido do fluxo coincide com x crescente para os gráficos referentes ao trecho de jusante, enquanto para o trecho de montante, o sentido do fluxo ocorre para x decrescente.

Observando os recortes realizados, os dados levantados no período de Primavera apresentam maior queda de temperatura ao longo do comprimento longitudinal do fibra, se aproximando a cerca de 0,5 °C de redução entre o ponto mais a montante e o ponto mais a jusante do trecho de rio monitorado. Nos períodos de Inverno e Verão, nota-se

Figura 26 - Gráficos de linha comparando dados monitorados, em diferentes horários, durante a campanha de Verão.. Primeira linha exibe dados para o trecho de montante enquanto a segunda linha apresenta para o trecho de jusante.



Fonte: Autor (2023)

uma maior estabilidade das temperaturas entre os pontos extremos do comprimento monitorado, com modificações pontuais ocorrendo nas zonas de interação e nos locais de encontro com afluentes.

Uma hipótese inicial para este comportamento é considerar que o balanço de fluxos de calor na água superficial varia ao longo do ano. A variação na radiação solar, mais intensa e com maior número de horas no verão, compensa o menor contraste entre a temperatura da água superficial e subterrânea, levando ao equilíbrio das temperaturas nos pontos extremos do trecho monitorado. O mesmo tenderia a ocorrer no inverno, com a menor incidência de radiação solar e o maior contraste entre as temperaturas da água de ambas as origens, tendendo novamente a um equilíbrio. Durante a estação de transição tal equilíbrio não seria observado, considerando as variações de comportamento das zonas de interação rio-aquífero, ora indicadas por regiões quentes ora indicadas por regiões frias, e com uma situação intermediária com relação a incidência solar. A realização de trabalhos futuros pode confirmar tal hipótese, cruzando dados de temperatura da água com informações das estações meteorológicas da área de estudo.

5.4 Conclusões

A visualização de dados é uma ferramenta essencial para a interpretação e análise de um conjunto de dados. No contexto da temperatura, como dado hidrológico que varia ao longo do tempo, o uso do gráfico de linha é uma das primeiras formas de representação visual desta variável. O uso dos dispositivos DTS e a necessidade de indicar a posição em que tal temperatura ocorre ao longo do comprimento da fibra motivou um maior uso dos mapas de calor para comunicação do levantamento de tais informações. Ambas as formas gráficas são eficazes na indicação das anomalias de temperatura, que no contexto da interação rio-aquífero e dos estudos de fluxos em zona hiporreica, caracterizam a troca entre águas superficiais e subterrâneas.

Os *heatmaps* utilizados neste trabalho permitiram a comparação entre os dados monitorados em diferentes épocas do ano, caracterizando assim o comportamento sazonal da interação rio-aquífero em áreas tropicais. Foi possível notar que na maior parte do tempo, as regiões de interação são identificadas por regiões mais quentes, em virtude da maior temperatura da água subterrânea em relação a água superficial. Em períodos de primavera e verão, tal condição se inverte, com as zonas de interação sendo identificadas por regiões mais frias em relação ao seu entorno, considerando o aumento da temperatura do ar nestes períodos do ano.

Adicionalmente, a detecção das anomalias pelos *heatmaps* permitiu a análise da variação espacial das zonas de interação. Foi possível observar a manutenção da maioria das regiões de interação ao longo das campanhas de monitoramento realizadas. Nota-se que nos períodos mais chuvosos, como na primavera e no verão, foi possível identificar visualmente o aumento das faixas verticais com temperatura constante, indicando o aparecimento de zonas de interação nestes períodos, decorrentes do aumento do nível freático e da ocorrência de eventos chuvosos. Tais resultados concordam com outros estudos de interação rio-aquífero presentes na literatura.

A plotagem contínua dos dados de temperatura monitorados pela fibra ótica é uma das principais vantagens do uso dos mapas de calor. Esta utilização permite a verificação qualitativa e visual dos efeitos de variação da temperatura do ar, seja em termos diários, seja pela ocorrência de eventos meteorológicos, como o deslocamento de frentes frias, além das alterações de temperatura causadas por afluentes. Mesmo com tais efeitos, o uso dos *heatmaps* permitem a visualização e identificação fácil e rápida das áreas de interação e das áreas em que o cabo se encontra exposto ao ar, se tornando uma boa ferramenta para tomada de decisão, em termos de monitoramentos específicos nos locais de troca com a água subterrânea e de manutenção do sensor distribuído de temperatura.

Indica-se aqui como desvantagens do uso dos mapas de calor a dificuldade em se utilizar uma única escala de cores em um banco de dados longo, que englobe campanhas de monitoramento realizadas em diferentes períodos do ano. Ao padronizar tal escala, considerando a variação anual da temperatura da água e do ar, as faixas indicativas das zonas de interação podem não serem devidamente identificadas ou destacadas, especialmente nas épocas do ano de baixo contraste de temperatura entre as águas de diferentes origens. Além disso, a redução do intervalo de temperaturas exibido nos mapas de calor pode ocultar o efeito dos fenômenos meteorológicos pontuais na temperatura da água. Neste sentido, recomenda-se a abordagem utilizada neste trabalho, que ao comparar mapas de temperatura de diferentes épocas do ano, buscou destacar as zonas de interação, alterando-se os intervalos de temperatura exibidos em cada *heatmap*, considerando os valores observados naquela campanha.

Já os gráficos de linha são utilizados para realizar recortes temporais dos dados de temperatura, em períodos específicos. Complementares aos mapas de calor, tais figuras são úteis para a comparação direta entre dados medidos em diferentes estações e horários semelhantes, permitindo a verificação da sazonalidade da interação rio-aquífero, em termos de variações espaciais e temporais das zonas de interação e da modificação no

modo de caracterização das trocas de água entre os meios, em regiões mais quentes ou mais frias, a depender das estações do ano.

Além disso, os gráficos de linha foram úteis para a identificação do limiar de transição entre estas características, que gira em torno dos 21 °C e a definição de horários de maior interesse para a realização de campanhas de monitoramento curtas durante as estações de menor contraste de temperatura entre as águas de diferentes origens, como a Primavera e o Verão. Nestes períodos, sugere-se a medição da temperatura da água durante a tarde e início da noite, coincidindo com as temperaturas ambientes máximas e um maior distanciamento em relação ao limiar de 21° C.

Outra observação possível foi o comportamento longitudinal da temperatura, ao longo do comprimento do rio, nas diferentes estações do ano. Enquanto no Inverno e no Verão, foi possível observar temperaturas semelhantes nos pontos extremos do rio, indicando um possível equilíbrio nos fluxos de calor entre ar e água, a partir do balanço da radiação solar e do calor injetado pela descarga de água subterrânea; nas estações de transição, foi possível observar um resfriamento da ordem de 0,5°C entre o ponto mais a montante e o ponto mais a jusante do trecho monitorado. Estudos posteriores poderão avaliar este comportamento sazonal e como tal balanço energético ocorre nas diferentes estações do ano.

Assim, nota-se que os mapas de calor e os gráficos de linha são excelentes ferramentas para a visualização dos dados de temperatura e a obtenção dos primeiros insights relativos à interação rio-aquífero. A identificação das zonas de interação rio-aquífero e a verificação visual da sazonalidade de seu comportamento, dentre outras razões, são incitam o seu uso nos estudos do tema. Considerando a classificação dos fluxos da zona hiporreica e a determinação de sua origem, apesar da verificação visual das zonas de maiores anomalias e da sua persistência temporal e espacial, recomenda-se que tais ferramentas de visualização sejam implementadas em conjunto com outras metodologias, a fim de confirmar o que cada anomalia de temperatura representa. Exemplos destas metodologias são apresentados nos capítulos seguintes desta tese.

6 VARIAÇÕES ESPACIAIS: APLICAÇÃO DE TESTES ESTATÍSTICOS E ALGORITMOS DE CLUSTERIZAÇÃO PARA DIFERENCIAÇÃO DOS FLUXOS

6.1 O teste z como ferramenta de diferenciação dos fluxos

Ao se analisar dados, a aplicação das técnicas estatísticas é uma das formas iniciais de caracterização dos fenômenos e de obtenção de percepções em relação ao seu comportamento. Além da estatística descritiva, testes estatísticos são comumente utilizados, a fim de obter conclusões e tomadas de decisão para uma população, a partir da análise de amostras reduzidas daquele dado. A semelhança ou não de duas ou mais amostras de dados, a relação estatisticamente significativa entre duas variáveis e a generalização de resultados amostrais são alguns dos resultados obtidos a partir do uso dos testes estatísticos.

Ao se observar a literatura, é possível encontrar inúmeros testes que auxiliam na análise de dados quantitativos e qualitativos. A escolha de tais testes se baseia na natureza dos dados, que podem ser discretos ou contínuos, qualitativos ou quantitativos, distribuídos uniformemente ou de forma assimétrica, comporem grandes ou pequenas amostras; da pergunta de pesquisa a ser respondida com a sua aplicação, relativas a determinação da semelhança de grupos de amostras, da associação entre duas variáveis, do efeito de uma variável sobre a outras, dentre outros; e na suposição implícita aos dados, que se referem à ocorrência de normalidade, linearidade, homogeneidade, dentre outras condições.

Um dos testes estatísticos mais conhecidos é o teste Z (ou *Z-test*). Este teste é aplicado para comparar os valores médios de duas amostras independentes, determinando se há diferença estatística entre elas. Este teste é apropriado para situações em que se conhece as variâncias populacionais ou mesmo quando o tamanho das amostras é grande suficiente para que a estatística do teste se aproxime da distribuição normal. Usualmente, assume-se um número de elementos superior a trinta como referência, atendendo ao pressuposto do Teorema do Limite Central.

A hipótese nula (H_0) do teste indica que não há diferença entre as médias das duas amostras, enquanto a hipótese alternativa (H_1) é que há diferença entre elas. A forma como a hipótese alternativa é definida distingue o teste Z em teste bilateral (permite inferir a diferença das médias comparadas), em teste unilateral à direita (a média da amostra é maior que a média da população) e teste unilateral à esquerda (a média da amostra é

menor que a média da população). A estatística do teste z, que permite a verificação das hipóteses é calculado, a partir da Equação 1. Seu resultado é comparado ao valor crítico, associado a um nível de significância pré-definido, determinando se a diferença observada é estatisticamente significativa.

$$Z = \frac{X - \mu}{\frac{\sigma}{\sqrt{n}}} \quad (1)$$

Onde:

Z: estatística do teste Z;

X: média amostral;

μ : média populacional;

σ : desvio padrão populacional;

n: tamanho da amostra.

A escolha entre teste bilateral ou unilateral depende da desigualdade esperada. Para o caso da temperatura como ferramenta de identificação das zonas de interação, definidas pelas anomalias de temperatura, ambas as condições podem ser utilizadas, a depender da estação do ano em que o dado foi monitorado e de como as regiões de interação podem ser definidas (zonas quentes ou zonas frias) . Tal informação vem da análise prévia dos dados e com o uso dos *heatmaps* e dos gráficos de linha.

No contexto da interação rio-aquífero e do uso da temperatura como traçador, Yao et al. (2015) aplicaram o teste Z aos dados levantados em uma campanha de medição de temperatura distribuída. A ideia do uso do teste era diferenciar espacialmente zonas de interação com águas profundas, interação com águas rasas e zonas de baixa interação. Para isso, dois testes foram aplicados. Inicialmente, a cada medição, o dado de cada ponto monitorado foi comparado em relação aos oito pontos imediatamente a montante. Valores de p-valor menores que 0,005 seriam indicativos de áreas de interação, com origem ainda não diferenciada. Em seguida, um segundo teste Z foi realizado apenas para a série de temperaturas mínimas, considerando que as zonas de interação eram detectadas por regiões mais frias que as vizinhas. Nesta condição, zonas de interação com águas profundas terão temperaturas mínimas extremas (p-valor inferior a 0,005), quando comparadas aos oito valores de temperatura imediatamente a montante. Fluxos de zona hiporreica apresentam temperaturas intermediárias, identificadas por p-valores superiores a 0,995. Critérios adicionais de rejeição de algumas zonas foram implementados, levando em conta possíveis exposições do cabo ao ar, que também geram anomalias de

temperatura identificadas pelo teste estatístico; além de variações de temperatura causadas pela precisão da medição realizada.

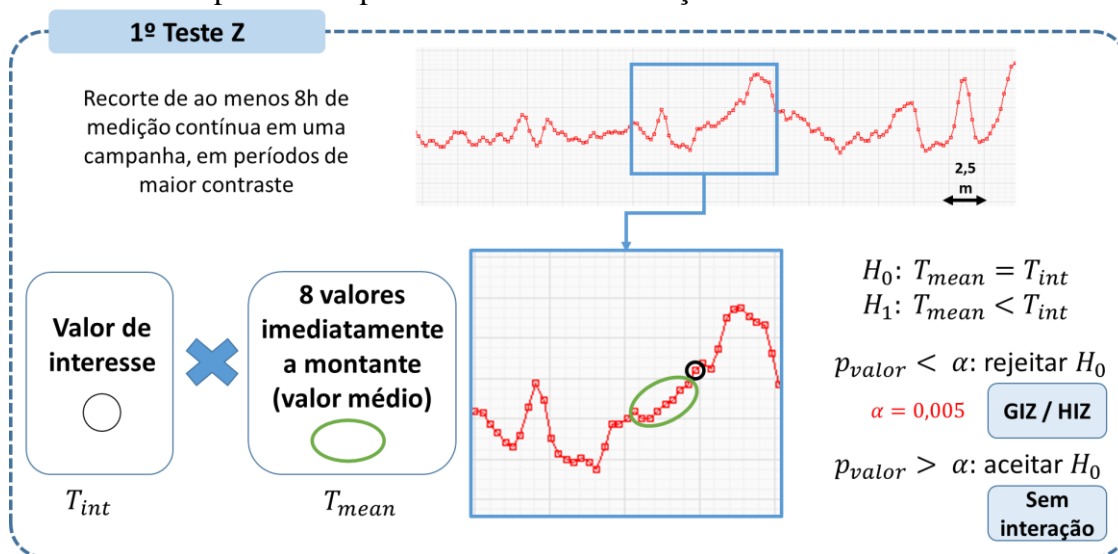
Apesar do pioneirismo no uso do teste com esta finalidade, a forma de exibição dos resultados por Yao et al. (2015) não permitiu a devida identificação do poder do teste nesta diferenciação das zonas. Além disso, a análise de dados proposta pelos autores contemplou uma única campanha de monitoramento, não permitindo identificar como o teste Z se comporta para dados monitorados em outras estações, com possíveis modificações no contraste de temperaturas do ar e da água. Assim, inspirado nestes autores, o teste Z foi utilizado neste trabalho como ferramenta para diferenciação espacial das zonas de interação, monitoradas pela temperatura da água. Foram realizadas adaptações no seu uso e interpretação, conforme apresentado no tópico a seguir, considerando o levantamento de dados realizado em áreas tropicais e em diferentes épocas do ano.

6.1.1 Metodologia utilizada

A aplicação do Teste Z aos dados de temperatura, levantados em diferentes estações do ano, foi realizada por meio de códigos implementados na linguagem Python, utilizando bibliotecas já disponíveis para tal fim. A análise foi dividida em três etapas, semelhante ao realizado por Yao et al. (2015). Tais etapas foram indicadas, para fins explicativos e de apresentação dos resultados, como primeiro Teste Z (Figura 27), aplicação de critérios de exclusão (Figura 28) e segundo Teste Z (Figura 29).

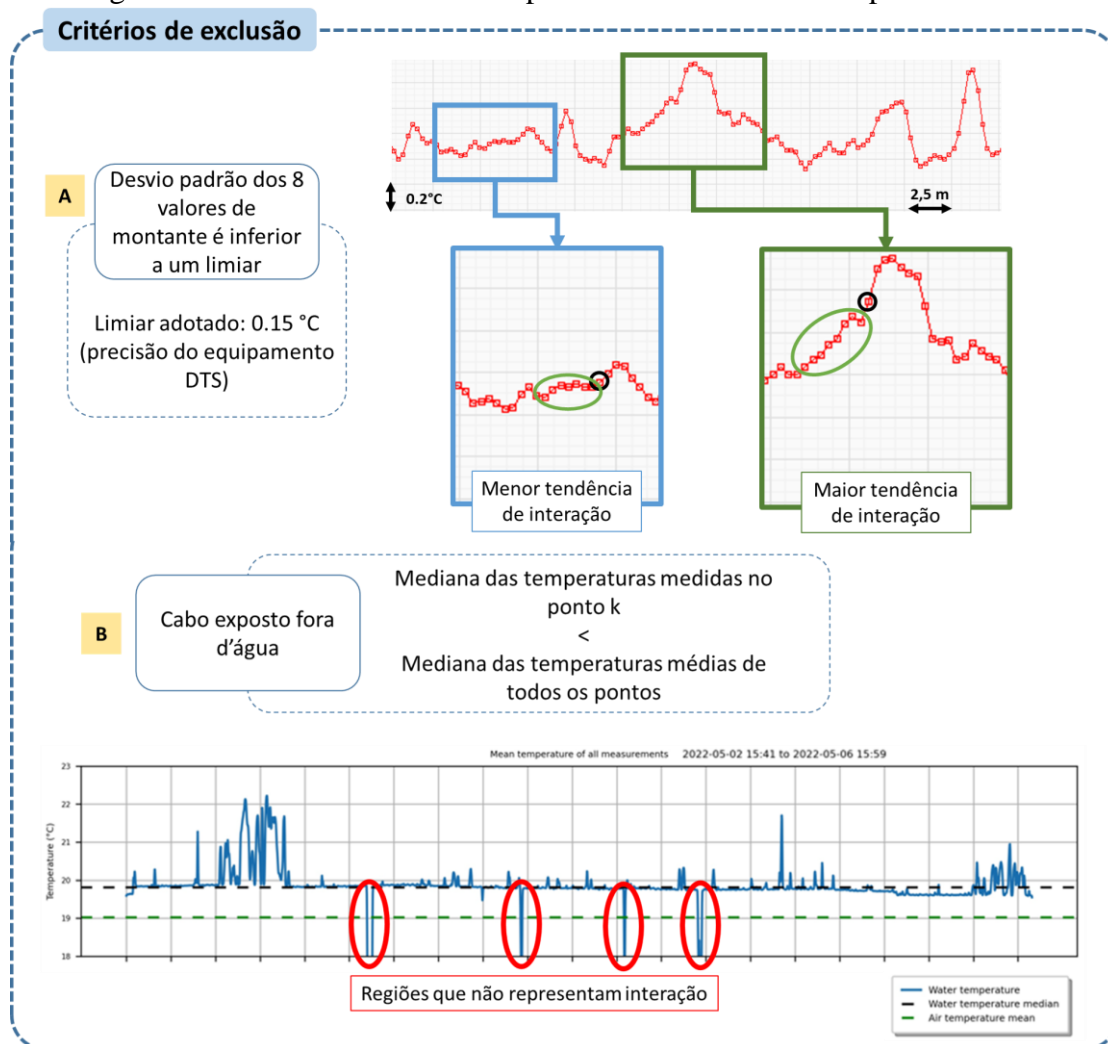
O primeiro Teste Z (Figura 27) visa analisar um conjunto de dados formados por um recorte de 8 horas de monitoramento contínuo, em períodos de maior contraste entre a temperatura do ar e a temperatura da água subterrânea. Neste sentido, durante as campanhas de Outono, Inverno e Primavera, foram explorados os dados levantados durante a noite, entre 22h e 6h, em que, de uma forma geral, as zonas de interação se apresentam com zonas mais quentes. Para os períodos de Verão, foram utilizados os dados vespertinos, inseridos no período entre 13h e 21h, momento no qual os pontos de interação são indicados por zonas frias. Estes recortes nos dados visam facilitar a separação das áreas de interação de zonas influentes ou de baixa interação. Adicionalmente, a indicação dos períodos definidos vem da análise prévia de mapas de calor e gráficos de linha das diferentes campanhas, que permitem a indicação dos períodos mais adequados para o teste z, assim como a definição do tipo de teste a ser realizado:

Figura 27 – Resumo da aplicação do primeiro teste Z aos dados de temperatura, separando as possíveis zonas de interação das demais zonas



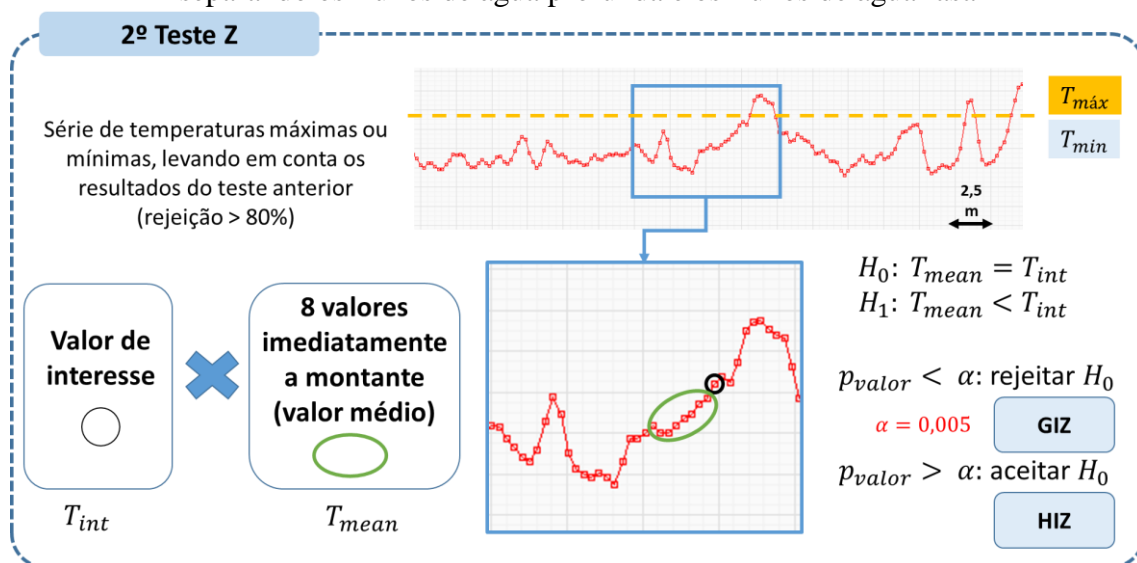
Fonte: Autor (2023)

Figura 28 - Critérios de exclusão aplicados aos resultados do primeiro teste



Fonte: Autor (2023)

Figura 29 - Resumo da aplicação do segundo teste Z aos dados de temperatura, separando os fluxos de água profunda e os fluxos de água rasa



Fonte: Autor (2023)

unilateral à direita, para períodos em que a interação é indicada por zona quente; ou unilateral à esquerda, para períodos em que a interação é indicada por zona fria.

Neste primeiro teste, a temperatura monitorada em cada um dos pontos (T_{int}), ao longo do comprimento da fibra, é comparada à média dos oito valores imediatamente a montante de sua posição (T_{med}). Esta quantidade de valores é escolhida, considerando a resolução de amostragem do equipamento utilizado. A hipótese nula considera que tais valores são iguais, enquanto a hipótese alternativa indica que T_{int} apresenta valores superiores ou inferiores à T_{med} , indicando a ocorrência de uma anomalia de temperatura, que pode ser indicativa tanto da ocorrência de interação quanto de locais de exposição do cabo ao ar ou de variações ligadas à precisão do equipamento de medição. A rejeição da hipótese nula é feita quando o p-valor calculado é inferior a 0,005, sendo o ponto neste caso considerado como região de anomalia de temperatura.

O primeiro teste é aplicado a todo o conjunto de dados monitorado nas 8h de recorte definido. Considerando um intervalo de 10 minutos de medição dos dados, o recorte fornece 48 dados de temperatura para cada um dos pontos dispostos ao longo do comprimento da fibra ótica. Buscou-se avaliar a persistência dos resultados, em termos de rejeição da hipótese nula (p-valor inferior a 0,005). Quanto maior o número de rejeições (quanto mais próximo de 48), mais persistente é a anomalia de temperatura naquele ponto em relação aos pontos vizinhos de montante. Como Yao et al. (2015) não detalha em sua publicação como os resultados do primeiro teste são avaliados, uma proposta feita aqui é utilizar a repetição destas rejeições no primeiro teste já como

ferramenta de classificação dos fluxos, entre águas profundas e águas rasas, em conjunto com a aplicação dos critérios de rejeição indicados a seguir.

Aos resultados do primeiro teste, são aplicados os critérios de exclusão (Figura 28), visando retirar zonas de pequena variação de temperatura, mas que possivelmente tenham sido indicadas como áreas de interação, em virtude de variações e ruídos nas medições executadas pelo equipamento (critério A - Figura 28), além de zonas relativas a exposição do cabo ao ar (critério B - Figura 28). O critério A leva em conta o desvio padrão dos oito valores de montante. Se tal desvio é inferior a $0,15\text{ }^{\circ}\text{C}$, limiar definido a partir da observação dos dados monitorados, indica-se que a zona não apresenta tendência de interação. Desvios maiores que $0,15\text{ }^{\circ}\text{C}$ continuam a ser considerados como locais de anomalia de temperatura.

A exclusão das áreas de exposição do cabo ao ar (critério B - Figura 28) leva em conta a comparação entre o dado de temperatura em determinado ponto monitorado e o valor da mediana das temperaturas médias de todos os pontos, ao longo do comprimento da fibra. De uma forma geral, os pontos expostos apresentam desvios elevados em relação a esta mediana, para cima (em estações quentes) ou para baixos (em estações frias), fortalecendo o uso desta comparação. Atenção especial deve ser dada aos pontos de encontro do curso principal com afluentes e a sua influência nas temperaturas da água a jusante, que podem levar a exclusão de pontos monitorados, não expostos ao ar. Neste sentido, soma-se ao valor da mediana um valor de delta, a fim de evitar tal exclusão.

Conforme a proposta de Yao et al. (2015), que inspira o uso do Teste Z para análise dos dados de temperatura, a separação das áreas de fluxos de águas profundas (GIZ – *groundwater inflow zones*) das áreas de fluxos de águas rasas (HIZ – *hyporreic inflow zones*) é realizada a partir da aplicação do 2º teste Z (Figura 29). Este teste é aplicado para a série de temperatura máxima e/ou mínima do recorte de 8 horas estabelecido pela análise. O interesse em analisar os extremos de temperatura permite diferenciar a contribuição das águas mais profundas, que tendem a apresentar temperaturas mais extremas que os valores observados nas zonas vizinhas, mesmo nas séries de máxima e mínima temperatura. Como os dados levantados nesta pesquisa cobrem diferentes estações do ano, optou-se também por verificar ambas as séries.

A dinâmica proposta para o segundo teste é a semelhante à da primeira aplicação (Figura 29), sendo aplicada apenas às zonas com elevada rejeição da hipótese nula no primeiro teste (definida inicialmente acima de 80%). A temperatura máxima / mínima de cada um dos pontos monitorados ao longo do comprimento da fibra (T_{int}) é comparada à

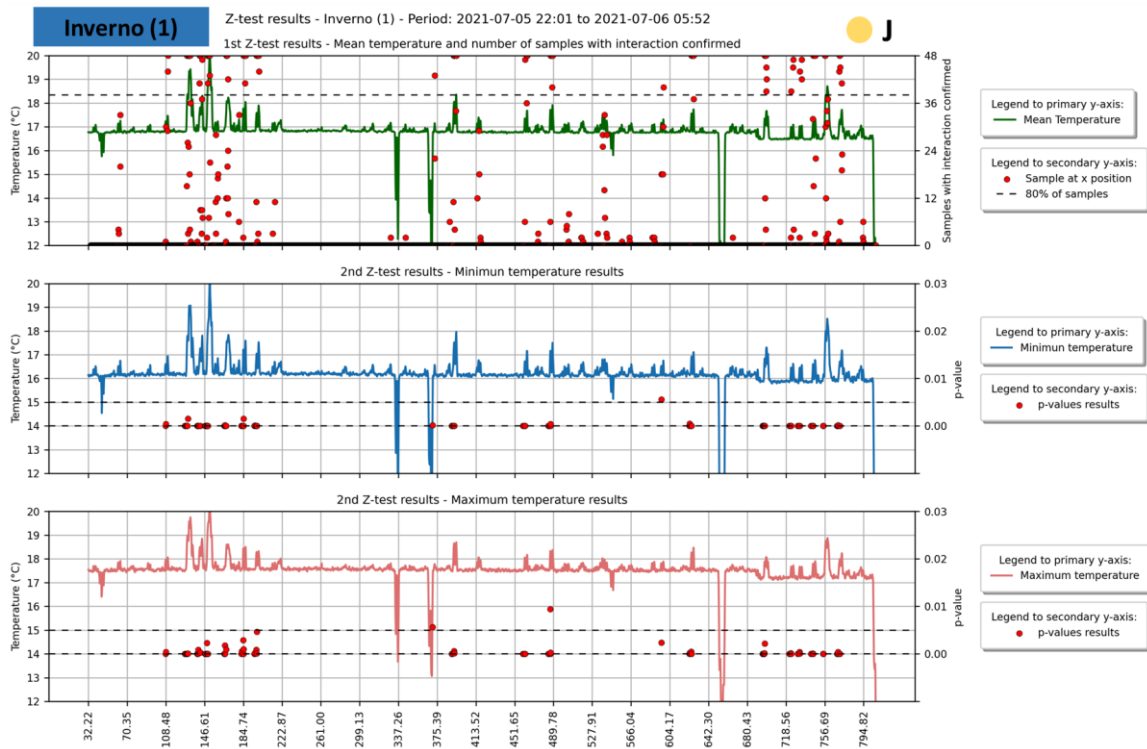
média dos oito valores imediatamente a montante de sua posição (T_{med}). A hipótese nula considera que não há diferença significativa entre os valores, enquanto à hipótese alternativa indica que T_{int} apresenta valores superiores ou inferiores à T_{med} . A rejeição da hipótese nula é feita quando o p-valor calculado é inferior a 0,005, sendo o ponto neste caso considerado como local de fluxo de água profunda (GIZ). Caso a hipótese nula seja aceita, o ponto observado é local de fluxo de água rasa (HIZ)

A aplicação deste segundo teste aos pontos com rejeição mais persistente no primeiro teste é uma adaptação proposta à metodologia inicial indicada por Yao et al. (2015). Caso a maioria dos pontos com mais de 80% de persistência de rejeição no primeiro teste, devidamente filtrados pelos critérios de rejeição, sejam confirmados como zonas de fluxo de água profunda (GIZ), apenas o primeiro teste seria suficiente para a classificação dos fluxos. A análise de tal hipótese com dados em diferentes estações do ano pode reforçar tal indicação.

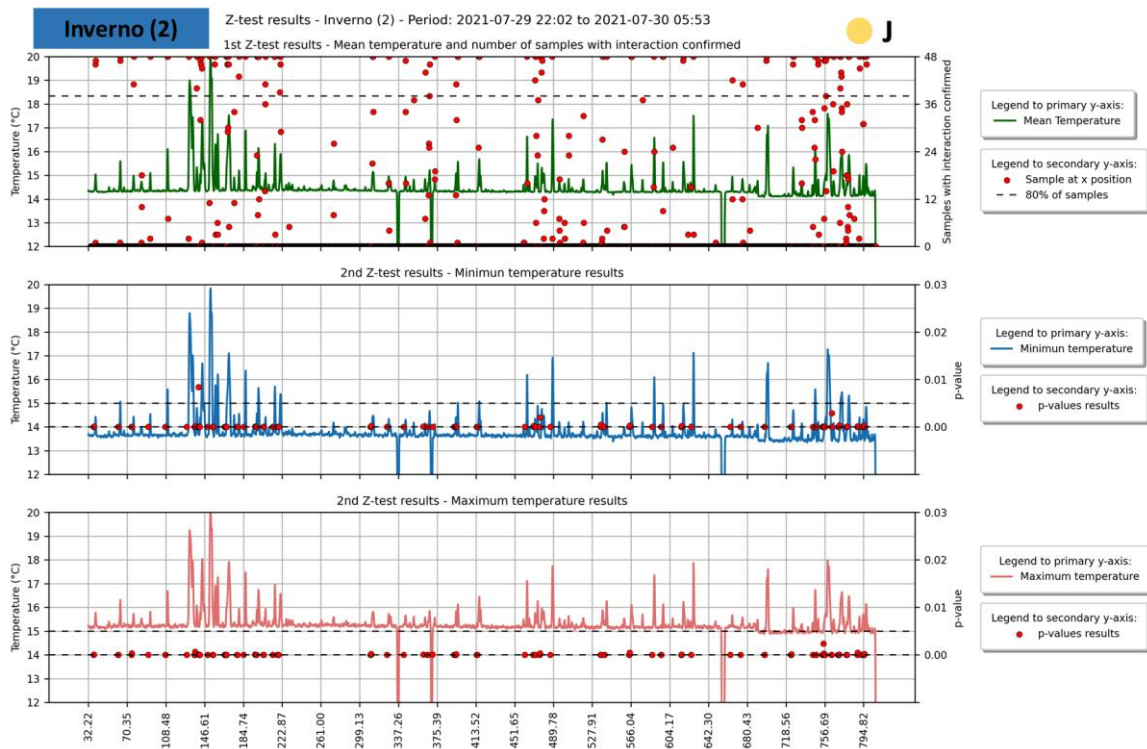
6.1.2 Resultados

A Figura 30 apresenta os resultados da aplicação do Teste Z para os dados da campanha de Inverno (1) e Inverno (2), enquanto a Figura 31 apresenta os resultados para as campanhas de Primavera e Verão, ambas para o trecho de jusante. Figuras semelhantes foram produzidas para as demais campanhas e para o trecho de montante e estão disponíveis no Apêndice C deste texto. Tais figuras são subdivididas em três quadros: o quadro superior apresenta o resultado do primeiro Teste Z, aplicado às 8h de dados selecionados de cada campanha e que apresenta, em conjunto com a temperatura média do período avaliado, a contagem da persistência de rejeição da hipótese nula do teste Z (p-valor inferior a 0,005). Quanto maior o número de rejeições (quanto mais próximo de 48, ou seja, mais pontos vermelhos mais próximos do topo do quadro), mais persistente é a anomalia de temperatura naquele ponto em relação aos pontos vizinhos de montante. Já o quadro central e o quadro inferior apresentam o resultado do segundo teste Z aplicado, respectivamente, para a série de temperaturas máxima e mínima do recorte de 8 horas realizado. Lembra-se que o segundo teste foi aplicado apenas aos pontos que apresentaram persistência superior a 80% nos resultados do primeiro teste e que não foram desconsiderados nos critérios de rejeição estabelecidos, que excluem zonas de cabo exposto ao ar e zonas com baixo desvio padrão entre o ponto avaliado e seus vizinhos de montante. Neste segundo teste, p-valor com resultados inferiores a 0,005 indicam zonas de interação com águas profundas.

Figura 30 - Resultados do teste Z, para o trecho de jusante, para dados monitorados na campanha de (a) Inverno (1) e (b) Inverno (2)

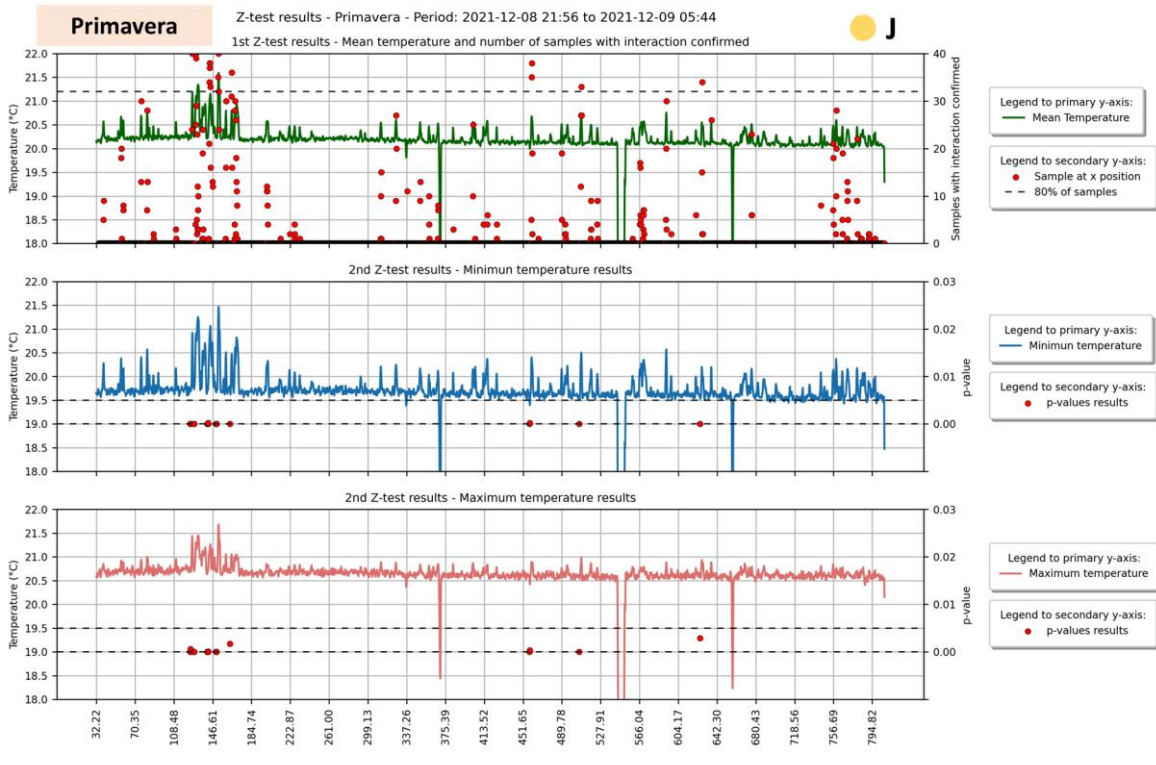


(b)

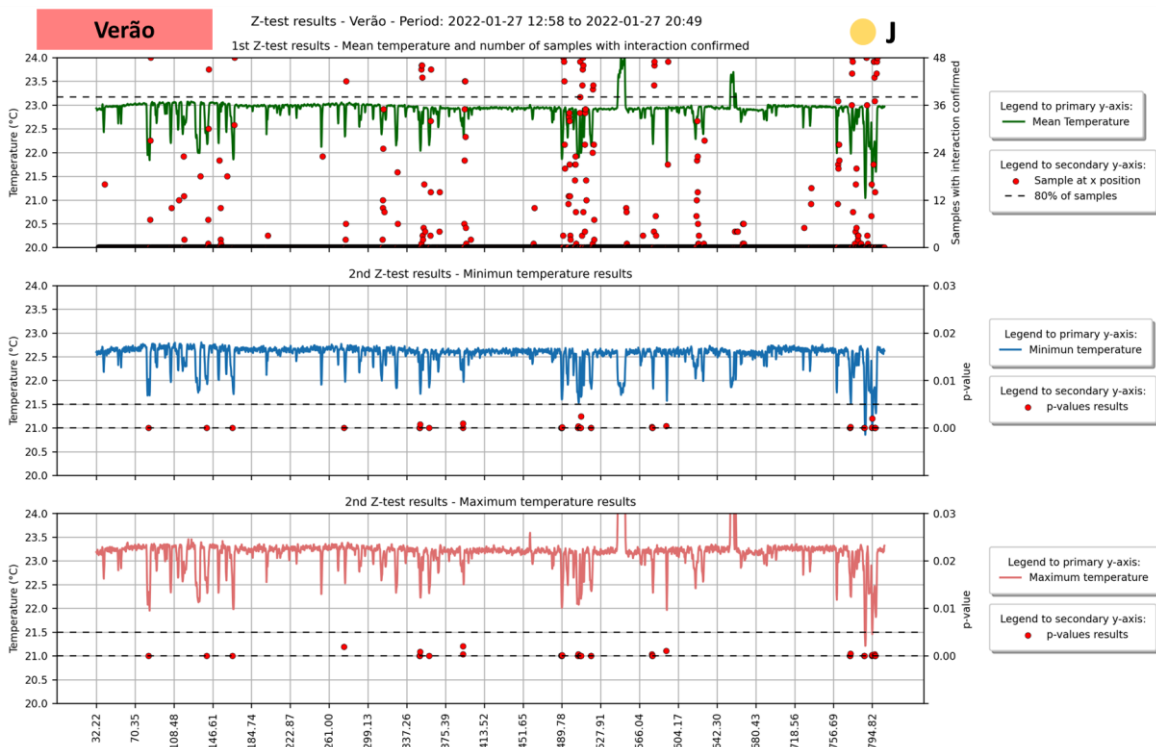


Fonte: Autor (2023)

Figura 31 - Resultados do teste Z, para o trecho de jusante, para dados monitorados na campanha de (a) Primavera e (b) Verão



(b)



Fonte: Autor (2023)

Ao se observar Figura 30, que relaciona dados monitorados na mesma estação do ano (dados de Inverno), monitorados em dois períodos distintos, é possível observar uma relação direta entre as anomalias nas temperaturas médias do recorte selecionado e a persistência de rejeição da hipótese nula do teste Z, com p-valor inferior à 0,005 (quadro superior). Quanto maiores os picos de temperatura, mais próximos os pontos vermelhos, indicativos da contagem de rejeição das amostras se aproxima do topo do quadro superior. A linha tracejada separa as zonas que possuem rejeição em 80% ou mais das amostras consideradas no recorte realizado, limiar inicialmente indicado como separador das zonas de interação com águas profundas ou de áreas de elevada anomalia de temperatura, que também podem ser observadas nas regiões de cabo exposto ao ar, a serem retiradas pelos critérios de rejeição, antes da aplicação do segundo teste Z.

Ao se comparar os dados da campanha de Inverno (1) (Figura 30a) e Inverno (2) (Figura 30b), nota-se que os dados da segunda campanha resultaram na observação de uma maior quantidade de zonas de interação com caráter persistente de rejeição no primeiro teste Z, a partir da diferença visual na quantidade de pontos vermelhos mais próximos do topo do quadro superior em cada uma das figuras. Tal fato é resultante da maior diferença de temperatura média da água superficial em relação a temperatura observada nas zonas de interação na segunda campanha invernal. Neste período, a atuação de uma frente fria resultou em uma queda brusca de temperatura do ar, que também levou à queda nas temperaturas médias da água. Desta forma, as anomalias de temperatura decorrentes da descarga de água subterrânea de diferentes origens, de águas profundas ou águas rasas, são bastante evidenciadas. Considerando o caráter do teste estatístico, que compara o valor temperatura com os vizinhos de montante, a maior diferença entre as temperaturas resulta em uma maior quantidade de rejeições da hipótese nula na aplicação do teste.

De forma oposta ao exposto, ao se observar os resultados do teste Z aplicado às estações mais quentes, de Primavera (Figura 31a) e Verão (Figura 31b), em que o contraste de temperaturas entre as zonas de descarga e as temperaturas médias do curso superficial é reduzida, nota-se também uma redução na quantidade de zonas de descarga de água profundas, identificadas a partir da persistência na rejeição do teste Z. Como já foi observado no tópico anterior, tais estações apresentam uma maior quantidade de anomalias de temperatura, em virtude do aumento dos níveis freáticos e da descarga de águas subterrâneas, como consequência da ocorrência de chuvas. Mesmo com tais

condições, nota-se uma menor quantidade de pontos detectados pelo teste estatístico, em virtude da redução do contraste entre as temperaturas.

Assim, em conjunto com o notado nos dados inverniais, é possível então concluir que o teste Z pode ser influenciado pelo contraste de temperatura observado entre as zonas de descarga e a temperatura média da água superficial. Isso reforça a necessidade da realização de campanhas sazonais de monitoramento para caracterização e diferenciação das zonas de interação rio-aquífero, para melhores conclusões sobre a aplicabilidade de testes estatísticos para separação de tais zonas. As conclusões obtidas por Yao et al. (2015), que consideraram apenas uma campanha de monitoramento, podem ser diferentes a depender da estação do ano do monitoramento realizado, o que pode levar à necessidade de adaptações à forma de uso do teste Z no contexto da interação rio-aquífero.

Considerando tanto a Figura 30 quanto a Figura 31, é possível notar a identificação de zonas persistentes comuns a todas as estações do ano monitoradas, com rejeição superior à 80% no primeiro teste Z. Tal repetição é notória para os dados de Inverno, Verão e Outono, com a densidade de pontos compondo as mesmas zonas variando em cada uma das estações. A diferenciação de algumas zonas é prejudicada no monitoramento de Primavera, considerando a redução do contraste entre as temperaturas nesta zona. Neste sentido, destaca-se que a utilização do teste Z é interessante para a identificação de zonas de interação com ocorrência persistente, nas diferentes estações do ano, que podem ter sido notadas a partir dos mapas de calor e dos gráficos de linha, e que tem seu comportamento confirmado a partir do teste estatístico.

A aplicação dos critérios de rejeição propostos é importante especialmente para a exclusão das zonas de cabo exposto ao ar, que comumente representam anomalias de temperatura em relação aos pontos vizinhos e comumente são inclusos no conjunto de pontos definido pelo teste estatístico. Esta situação pode ser observada nas diferentes estações do ano. Como referência para observação de tal condição, sugere-se a observação dos vales observados nos dados monitorados no Inverno (Figura 30), como base para observação nas demais estações, onde é possível observar uma contagem de rejeição superior a 80% das amostras na qual o primeiro teste Z aplicado (quadro superior da figura). Tais zonas não são avaliadas no segundo teste (quadro central e inferior), considerando sua rejeição nos critérios posteriormente aplicados.

Ao se observar os resultados do segundo teste Z (quadro central e inferior da Figura 30 e da Figura 31), aplicados as séries de temperatura máxima e mínima do período em análise, aos pontos com maior persistência de rejeição da hipótese nula (acima de

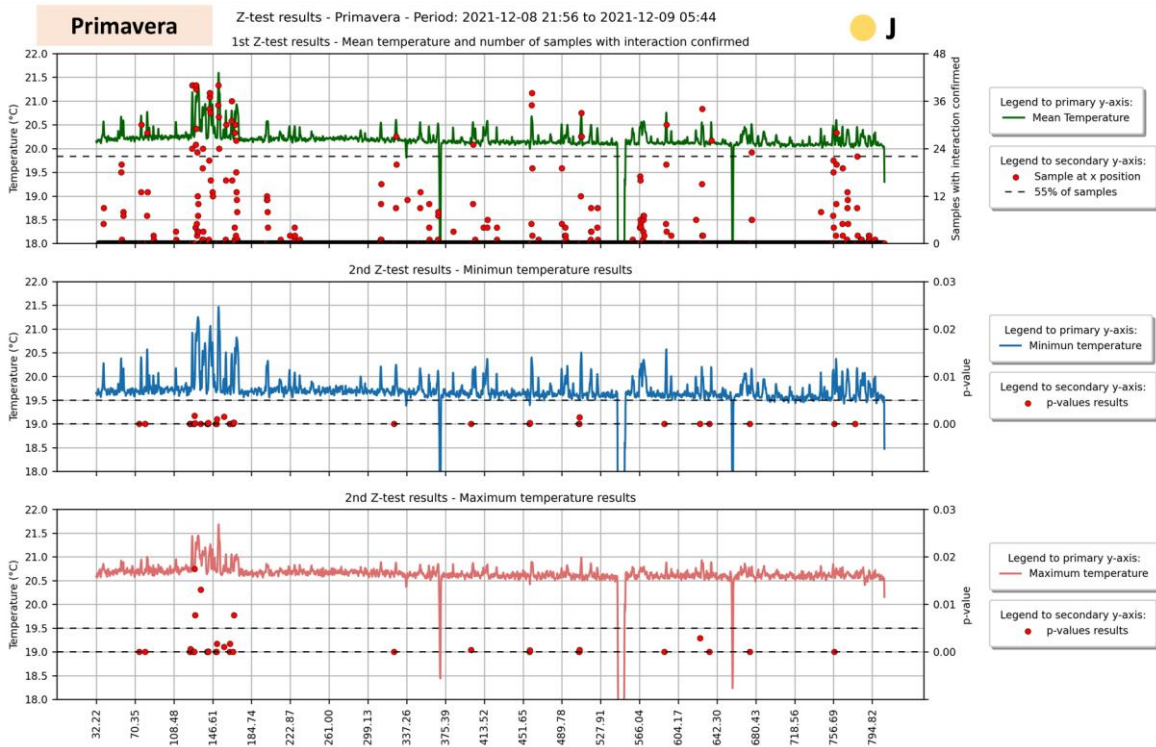
80%), foi possível observar que quase a totalidade dos pontos definidos a partir do primeiro teste, apresentaram resultados de p-valor no segundo teste, inferiores à 0,005, que resultam na rejeição da hipótese nula do teste Z e indicam diferença estatística entre o valor atual e a média dos valores a montante, caracterizando zonas de fluxo de água profunda. Tais resultados indicam a possibilidade de não haver demanda de aplicação do segundo teste Z, na forma definida por Yao et al. (2015), sendo que apenas a análise da persistência das rejeições da hipótese nula no primeiro teste e o estabelecimento de um limiar de diferenciação entre zonas de fluxo de água profunda (GIZ) e zonas de fluxo de água rasa (HIZ) seja suficiente para a separação dos fluxos.

Considerando as demais metodologias utilizadas neste trabalho e a fim de se evitar a dependência direta do contraste dos resultados do teste Z ao contraste da temperatura da água superficial e da água subterrânea descarregada, evitando resultados muito discrepantes entre diferentes campanhas, uma possibilidade é utilizar um valor de limiar variável entre as estações para avaliação da persistência de rejeição no primeiro teste Z, ou seja, não o fixar em 80% das realizações do teste. Ao se observar os resultados das campanhas de Inverno (1), Verão e Outono (2), a diferença entre as temperaturas médias e as temperaturas máximas das anomalias indicativas da interação rio-aquífero está entre 2 e 3°C aproximadamente. Para tais estações, o limiar de 80% utilizado leva a separação de zonas semelhantes, relativas a interação com as águas mais profundas, indicando que tal valor é suficiente para os intervalos de contraste inseridos nesta faixa.

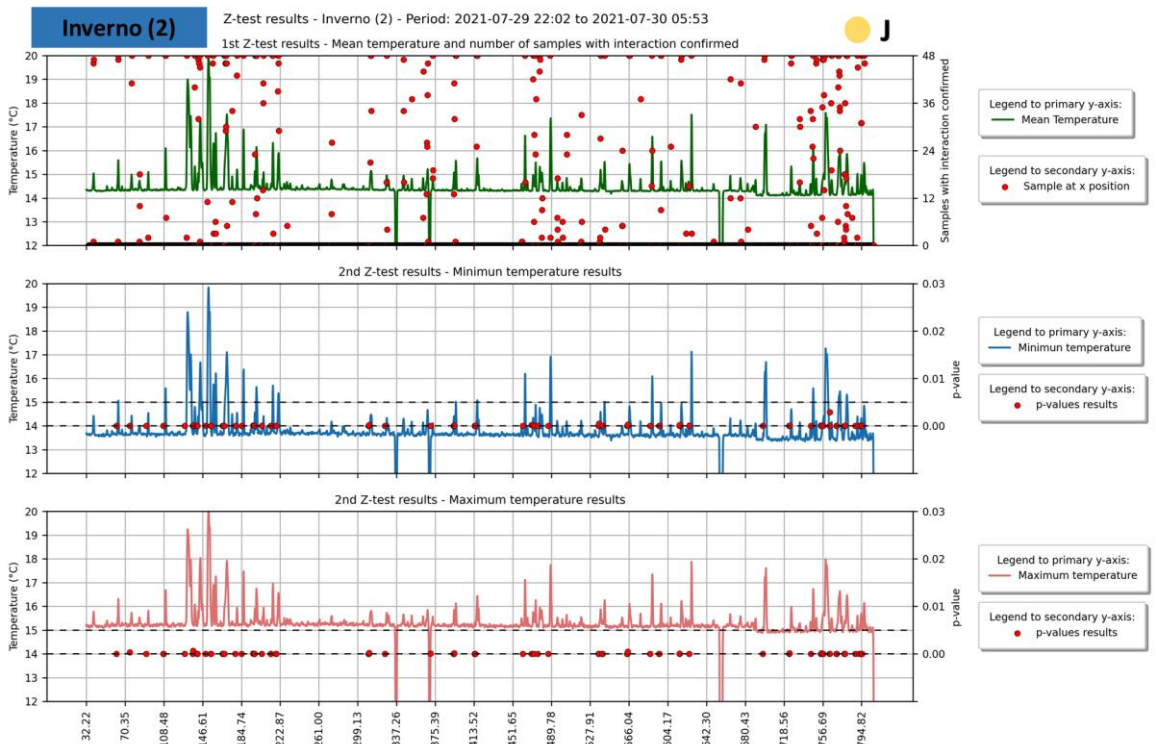
Situações mais específicas podem ser observadas nas campanhas de Inverno (2) e Primavera. Na segunda campanha invernal, a temperatura de contraste é superior à 5°C, resultante dos efeitos da frente fria sobre a temperatura da água superficial. Assim, a aplicação do teste estatístico leva a determinação de um maior número de zonas de interação, mesmo que tais zonas sejam representativas de fluxo de zona hiporreica. Para a campanha de Primavera, esta diferença é inferior à 1,5 °C, o que resulta na menor identificação de zonas de interação pelo teste estatístico. Neste sentido, a definição do limiar de rejeição a ser considerado pode ser ligada a diferença entre as temperaturas médias da água superficial e as temperaturas máximas observadas nas anomalias indicativas da zona de interação.

A partir da realização de testes posteriores nos dados das duas referidas campanhas, foi possível indicar o limiar de 55% de rejeição para a campanha de Primavera (Figura 32a) e o limiar de 100% de rejeição para a campanha de Inverno (2) (Figura 32b). A redução e o aumento nos limiares de rejeição são simultâneos a redução

Figura 32 - Resultados do teste Z, com limiar de rejeição modificado para (a) 55% para os dados de Primavera e (b) 100% para os dados de Inverno (2)



(b)



Fonte: Autor (2023)

e ao aumento nos contrastes de temperatura observados nas referidas estações.

Neste sentido, considerando a proposta inicial de Yao et al. (2015) e os resultados observados para os dados de temperatura levantados nesta tese, sugere-se como abordagem de uso do Teste Z, o seguinte procedimento:

- A aplicação do primeiro e único teste Z, para um recorte de dados de 8 horas de duração, considerando o período de ocorrência de maior contraste de temperatura (noites e madrugadas para dados monitorados em Outono, Inverno e Primavera; e tardes e noites monitoradas em períodos de Verão), em conjunto com os critérios de rejeição previamente definidos, para exclusão de zonas de cabo exposto ao ar e zonas de pouco desvio entre os pontos vizinhos.
- Com base na diferença entre as temperaturas médias e as temperaturas mais extremas verificadas nas anomalias de temperatura indicativas de interação rio-aquífero, estabelecer um limiar de separação para a persistência da rejeição da hipótese nula, para separação das zonas de interação com águas profundas. Como pode ser visto nos resultados apresentados, a utilização de rejeições de 80% das amostras em cada recorte temporal foi interessante para diferenças de temperatura inseridas na faixa entre 2 e 3°C, observadas nas campanhas de Inverno (1), Verão e Outono (2). Tal observação foi confirmada a partir da utilização do segundo teste Z, conforme proposto por Yao et al. (2015). Para estações com diferenças de temperatura não inclusas nesta faixa, sugere-se a alteração do limiar de temperatura. Para diferenças superiores à 3°C, sugere-se a utilização de um limiar de rejeição de 100%, semelhante ao utilizado para a campanha de Inverno (2). Para diferenças inferiores à 2°C, sugere-se o uso de limiares próximos a 55%, como utilizado para a campanha de Outono (2).
- Zonas que apresentam rejeições inferiores ao limiar estabelecido são menos persistentes e podem ser indicativas de fluxos de zona hiporreica, com as anomalias de temperatura variando de condição ao longo do intervalo de tempo considerado na aplicação do teste. Zonas de baixa interação ou zonas com tendência influente, às quais não são indicadas por Yao et al. (2015), mas são visualizadas em outras abordagens presentes nesta tese, podem ser caracterizadas por baixas contagens de rejeição da hipótese nula, o que indica a ausência de anomalias de temperatura entre os pontos vizinhos e a menor interação com meio subterrâneo.

As indicações propostas ao Teste Z são feitas considerando os resultados observados em outras metodologias presentes nesta tese, que auxiliam na caracterização dos diferentes comportamentos das zonas de interação e a consequente estimativa da origem dos fluxos de água subterrânea, em função dos dados de temperatura. Além disso, a intenção principal é aprimorar a metodologia inicialmente proposta por Yao et al. (2015), considerando as diferentes campanhas de monitoramento e as condições ambientais de uma zona tropical, em conjunto com um teste estatístico de fácil utilização.

6.1.3 Conclusões

A partir dos resultados apresentados, é possível concluir que o Teste Z é útil para a classificação dos fluxos de descarga de água subterrânea, em termos espaciais, observados na interação rio-aquífero. Considerando a abordagem inicial proposta por Yao et al. (2015), foi possível sugerir aprimoramentos à aplicação do teste estatístico aos dados de temperatura, visando distinguir as zonas com diferentes comportamentos, levando em conta múltiplas campanhas de monitoramento, em diferentes estações do ano. A partir de um recorte amostral de dados no período de maior diferença entre as temperaturas das águas superficiais e subterrâneas, a aplicação de um único teste e a análise da persistência na rejeição da hipótese nula, indicativa de diferença de médias entre o ponto avaliado e os pontos imediatamente a montante, foi suficiente para separação das zonas de interação. O estabelecimento de um limiar de rejeição flexível, considerando as variações nas condições de temperatura, é importante para evitar a dependência dos resultados do teste em relação ao nível de contraste entre as temperaturas da água superficial e subterrânea. Para períodos de maior contraste (a exemplo da campanha de Inverno (2)) devem ter o limiar elevado, enquanto períodos de menor contraste (a exemplo dos dados de Primavera), devem ter o limiar reduzido. Valores de referência foram sugeridos para tais limiares, considerando a diferença de temperatura entre as anomalias e a temperatura média da água superficial. Tais ajustes resultaram em uma caracterização semelhante das zonas de interação nas diferentes estações do ano, especialmente às zonas de descarga de águas profundas, concordando com os resultados apresentados em outras metodologias descritas neste texto. Estima-se que a aplicação do Teste Z e a definição do limiar de rejeição estabelecido possa ser aprimorado em aplicações futuras, considerando outros parâmetros estatísticos dos dados de temperatura da água monitorados com o uso da fibra ótica.

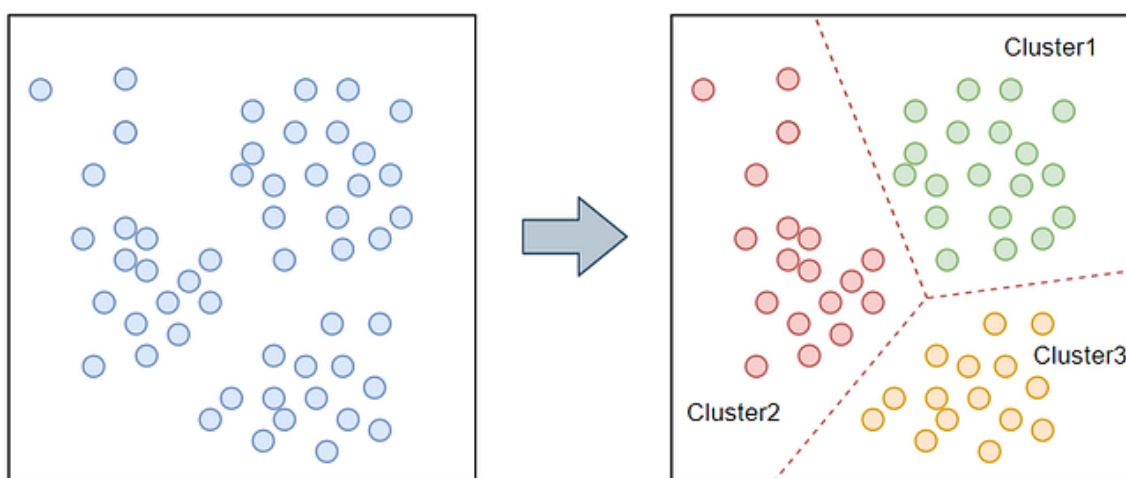
6.2 Algoritmos de clusterização

6.2.1 Introdução

O termo clusterização é derivado do inglês *clustering* e significa agrupar, categorizar, classificar. Em análise e mineração de dados, a clusterização consiste no processo de organizar, agrupar, categorizar objetos e/ou dados em grupos, cujos membros são similares em alguma característica. Tal processo é realizado por meio algoritmos computacionais automáticos e tem por objetivo principal auxiliar na tomada de decisão, em diferentes áreas do conhecimento e com diferentes tipos de dados, com um caráter essencialmente descritivo, ressaltando relações já existentes. A divisão em grupos permite a segmentação e a extração de padrões de comportamento, a identificação de dados não semelhantes a outros (*outliers*) e a criação de filtros automáticos.

A clusterização é incluída junto aos processos de aprendizagem não-supervisionada. Como o próprio nome já indica, as rotinas computacionais de *clustering* separam os dados em grupos, a partir da observação dos dados propriamente ditos, sem que estes tenham recebido algum rótulo de classificação prévio (Figura 33). A aprendizagem não-supervisionada se diferencia da aprendizagem supervisionada, uma vez que esta última recebe informações prévias de características esperadas para que um objeto ou dado se encaixe em um grupo, durante o agrupamento dos dados. Considerando esta divisão das rotinas computacionais, o uso do termo *clustering* é intrínseco à aprendizagem não-supervisionada, enquanto o termo classificação indica o uso de processos de aprendizagem supervisionada.

Figura 33 - Processo de clusterização ilustrado



Fonte: eCloud Valley (2023)

Os algoritmos de clusterização podem ser agrupados em quatro grandes grupos, a depender do modo como os clusters são definidos. São eles:

- Clusterização baseada em centroides: a partir de uma quantidade de grupos definida pelo usuário, o algoritmo busca encontrar os centros geométricos representativos de cada um dos clusters. Em seguida, busca-se identificar a qual grupo cada um dos elementos pertence, com base na sua distância em relação ao centroide. O algoritmo é iterativo e busca reduzir o somatório das distâncias dos pontos aos centroides definidos, até encontrar o valor mínimo possível. Exemplos de algoritmos incluídos neste grupo são o K-Means, o K-Medoids, o Mini-Batch K-Means e o CLARANS (*Clustering Large Applications based on RANdomized Search*).
- Clusterização baseada em distribuições: buscam definir os grupos a partir de ajustes de distribuições estatísticas conhecidas, como a distribuição normal, de Poisson ou Pearson. Desta forma, é possível estabelecer uma probabilidade de cada ponto pertencer àquele grupo, considerando a distribuição estatística presente nos dados. A maior dificuldade de uso destes algoritmos está em conhecer esta distribuição, uma vez que nem sempre todos os dados vão conseguir ser inseridos em clusters definidos por um mesmo tipo de função de probabilidade. Um exemplo de um algoritmo dessa categoria é o *Gaussian Mixture*.
- Clusterização baseada em densidades: se baseiam na identificação da alta concentração dos pontos em determinada região para realizar os agrupamentos. Um valor de raio de análise é inserido pelo usuário e é utilizado como referência para indicar a proximidade ou afastamento entre os elementos e entre os grupos formados. Seu uso é mais interessante quando os dados apresentam elevada densidade dos pontos, próximos entre si, formando regiões. Exemplos de algoritmos com esta abordagem são o DBSCAN (*Density Based Spatial Clustering of Applications with Noise*) e o OPTICS (*Ordering Points to Identify the Clustering Structure*).
- Clusterização hierárquica: resulta na criação de uma árvore de clusters, no qual um dado pertence a grupos menores (considerando o elemento individualmente e os elementos mais próximos) e maiores (considerando todo o conjunto de dados) ao mesmo tempo, criando assim uma hierarquia. Comumente a representação dos

grupos é feita utilizando o dendrograma, que organiza os grupos e apresenta suas relações. Os exemplos mais conhecidos desta classe são o *Agglomerative clustering*, o *Divisive clustering* e o BIRCH

Cada uma das abordagens de clusterização apresentam vantagens e desvantagens, que variam em função do tipo de dado avaliado, do tamanho do conjunto de dados e de sua complexidade, condições estas que devem ser levadas em conta na aplicação de cada algoritmo. De uma forma geral, os algoritmos de aprendizagem não-supervisionada apresentam elevada flexibilidade para a análise de diferentes problemas, dando condições para a descoberta de padrões nem sempre visíveis em análises iniciais. O fato de não ser necessário supervisionar o processo e nem indicar rótulos iniciais para o treinamento dos dados também facilita o seu uso. Por outro lado, a interpretação dos grupos obtidos é um trabalho posterior a ser realizado pelo usuário, assim como a verificação de como a qualidade dos dados iniciais comprometem a sensibilidade dos algoritmos em estabelecerem os grupos.

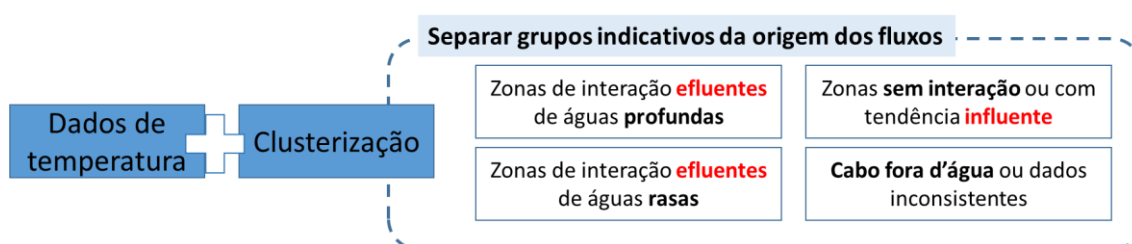
Ao se avaliar o uso de técnicas de clusterização em aplicações de recursos hídricos e águas subterrâneas, Dogulu (2019) aponta, a partir de uma revisão sistemática dos trabalhos envolvendo hidrologia e algoritmos de clusterização, publicados entre 1999 e 2019, que 57% dos trabalhos buscou utilizar tais abordagens de classificação para identificação de bacias similares. O mesmo trabalho indica um crescimento de publicações com tais metodologias a partir do ano de 2018, porém sem indicar possíveis trabalhos com aplicações em águas subterrâneas. Ghobadi e Kang (2023) apresentaram recentemente uma revisão sistemática do uso de aprendizagem de máquina em recursos hídricos, que também aborda o uso dos algoritmos de clusterização neste contexto. Tais autores apontam que, no contexto das águas subterrâneas, o uso destas abordagens prevalece para a modelagem do escoamento subterrâneo e para a previsão dos níveis de água em aquíferos (AHMADI et al., 2022; NOURANI et al., 2022; SHARGHI et al., 2022; YIN et al., 2022). Estudos de interação rio-aquífero, com a temperatura ou com outros traçadores naturais, não são indicados na revisão de tais autores.

Considerando este contexto de separação de dados em grupos e a necessidade de classificação dos tipos de fluxos da zona hiporreica, a partir de dados de temperatura da água, o uso de algoritmos de clusterização pode ser interessante para auxiliar na identificação de diferentes zonas de interação. Ao que se tem conhecimento, o uso de tais algoritmos ainda não foi visualizado na literatura para esta finalidade, no contexto do

estudo da interação rio-aquífero e do uso da temperatura como traçador, o que reforçou a motivação em analisar os dados monitorados com tais abordagens.

Neste sentido, o objetivo principal da clusterização foi observar se os grupos definidos pelos algoritmos permitem a diferenciação em quatro categorias básicas (Figura 34): zonas de interação efluentes com águas profundas (*groundwater signature*), zonas de interação efluentes com águas rasas (*shallow signature*), zonas de sem interação ou com tendência influente (*atmospheric signature*) e zonas de exposição do cabo de fibra ótica ao ar. A definição desta quantidade de grupos é dado de entrada para os algoritmos utilizados e foi assim definida, considerando tanto as classificações já indicadas na literatura (HARE et al., 2021), como também a observação dos dados monitorados no contexto desta tese, a partir dos mapas de calor e gráficos de linha das diferentes campanhas realizadas. O uso dos algoritmos e a análise de dados realizada é apresentada no item a seguir.

Figura 34 - Grupos esperados, com a aplicação dos algoritmos de clusterização aos dados de temperatura



Fonte: Autor (2023)

6.2.2 Metodologia utilizada

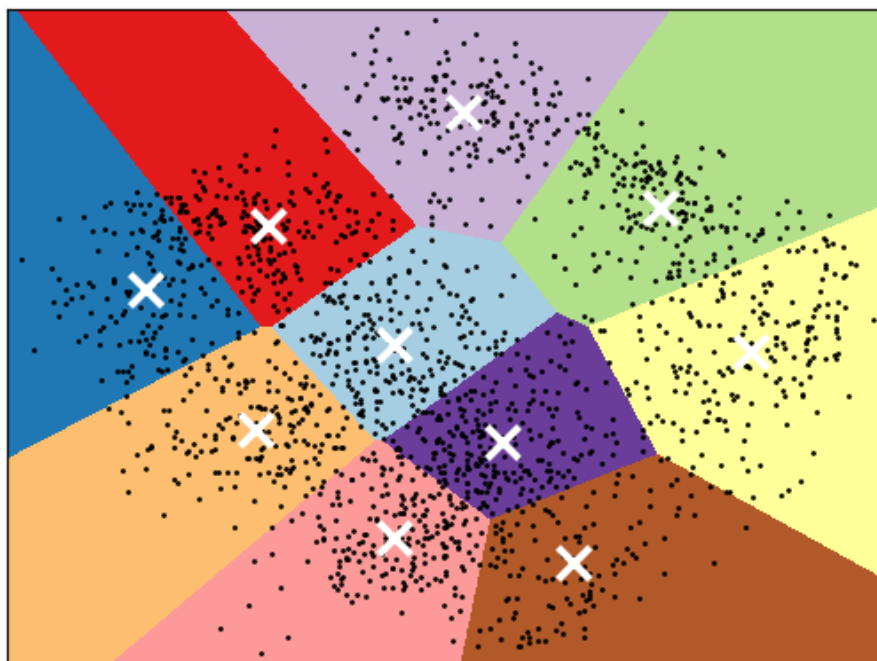
Considerando o contexto apresentado, os dados de temperatura da água monitorados com o dispositivo DTS foram avaliados com o uso de dois algoritmos de clusterização, inseridos em diferentes grupos de aprendizagem não supervisionada: o algoritmo *K-means*, representando o agrupamento baseado em centroides; e o algoritmo *agglomerative clustering*, representando o agrupamento hierárquico. Os dois algoritmos foram escolhidos considerando sua facilidade de implementação, assim como a facilidade interpretação de resultados obtidos. Outros algoritmos foram testados com os dados de temperatura, mas não apresentaram resultados satisfatórios, no que diz respeito aos clusters resultantes.

O algoritmo *K-means* é um dos mais simples e um dos mais utilizados algoritmos de clusterização. Sua autoria é atribuída a MacQueen (1967), sendo que tal rotina

computacional pode ser implementada para objetos inseridos em um espaço contínuo de n -dimensões. Como dado de entrada, o usuário deve informar o número de grupos no qual os dados deverão ser divididos (geralmente indicado pela letra K , inserida no nome do algoritmo). O objetivo é obter K centroides representativos dos dados, a partir da minimização da soma da distância entre cada elemento do conjunto de dados e o centroide mais próximo. Como o centroide corresponde em geral ao ponto médio de um grupo de pontos, o termo *means* complementa o nome do algoritmo.

O processo de determinação da posição dos centroides é iterativo. Inicialmente, K centroides são escolhidos em meio aos elementos que compõem o conjunto de dados avaliado. Em seguida, dois passos são feitos repetidamente, até a obtenção do resultado final: primeiramente, cada elemento é atribuído ao centroide mais próximo, por meio do cálculo da distância euclidiana entre o elemento e os centroides. Define-se então os clusters. Posteriormente, calcula-se a posição dos novos centroides, considerando os elementos inseridos nos clusters criados. O processo é repetido até a posição dos centroides não seja alterada, ou seja, pela minimização da soma das distâncias entre os centroides e os elementos (SCIKIT-LEARN, 2023a). Para melhor entendimento deste processo, recomenda-se ao leitor verificar as animações produzidas por Sheehan (2023).

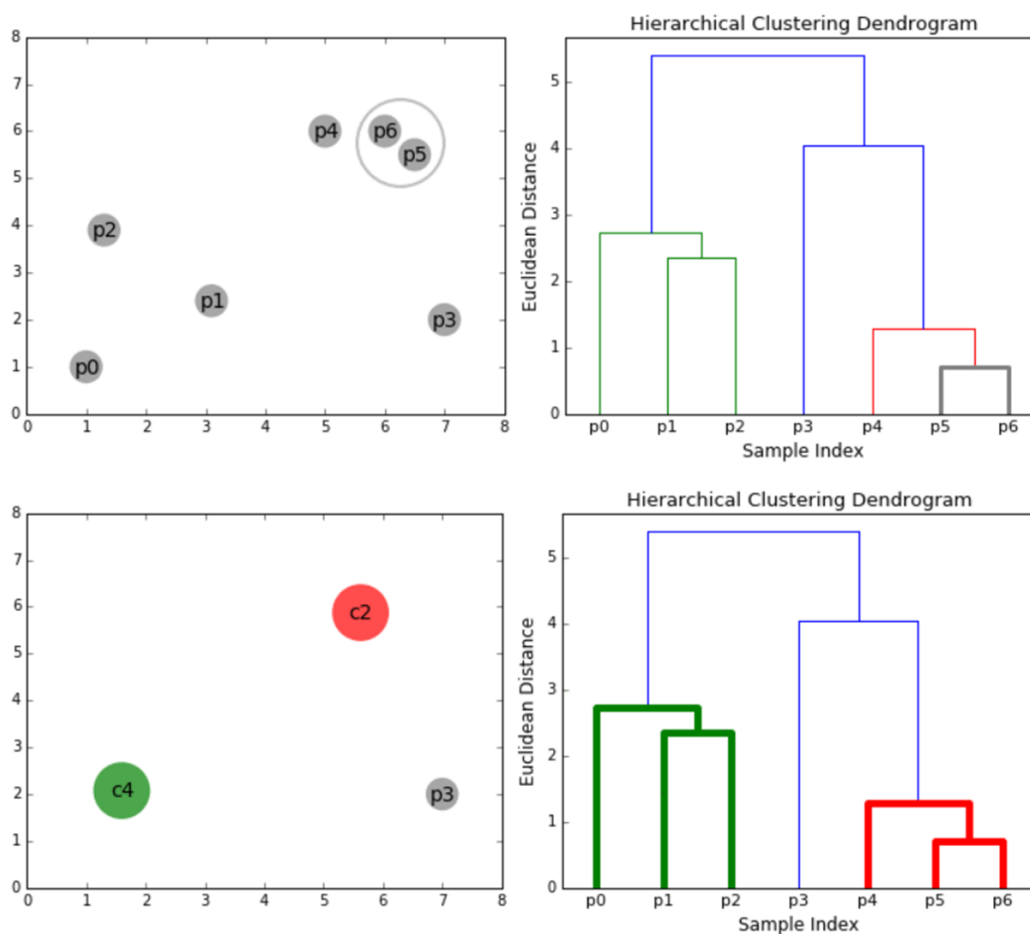
Figura 35 - Clusterização resultante da aplicação do algoritmo k-means, a um conjunto de dados bi-dimensional. Os ícones em X representam os centróides definidos, enquanto as faixas coloridas indicam as áreas de cada cluster



Fonte: Sheehan (2023)

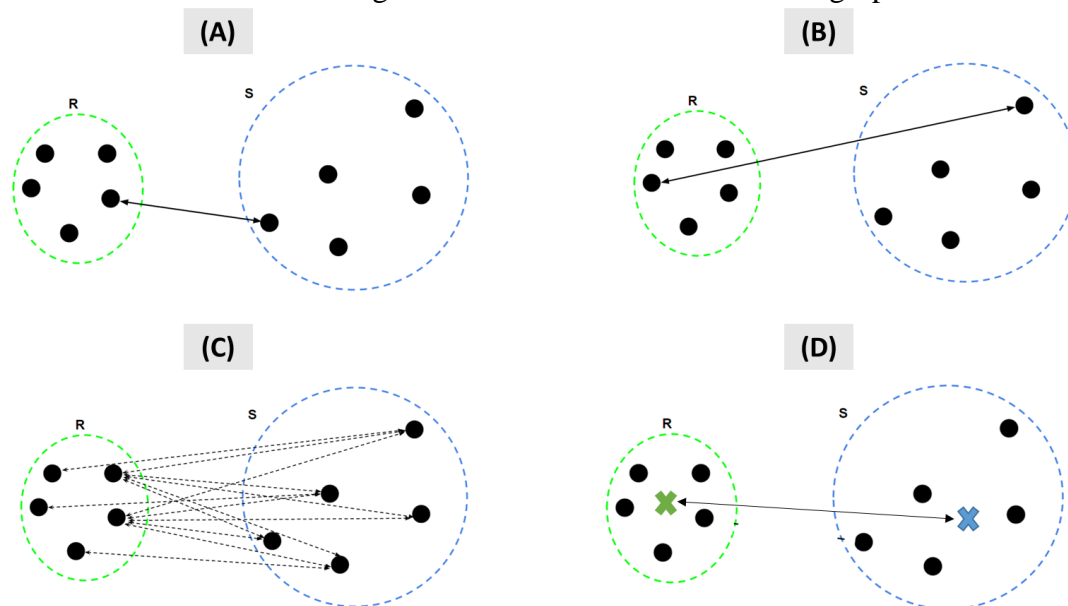
O segundo algoritmo utilizado para análise dos dados de temperatura foi o *agglomerative clustering*. O termo *agglomerative* (em tradução livre, aglomerativo) indica que o algoritmo utiliza uma abordagem do tipo *bottom up* (de baixo para cima), onde, inicialmente, cada elemento do conjunto de dados inicia formando seu próprio cluster. Sucessivamente, cada um dos grupos inicialmente formados vai sendo unido (Figura 36), por meio de um critério de acoplamento estabelecido pelo usuário, geralmente ligado ao cálculo de distância (Figura 37). Tal processo é repetido até que o conjunto de dados completo seja reunido em único cluster. Dessa forma, os grupos maiores possuem sub-grupos menores, estabelecendo uma hierarquia entre eles (SCIKIT-LEARN, 2023b). Para melhor entendimento deste processo, também se recomenda ao leitor verificar as animações produzidas por Sheehan (2023).

Figura 36 - Exemplo de aplicação do algoritmo *agglomerative clustering* a um conjunto de sete elementos. A imagem ilustra o andamento das iterações: a primeira linha da imagem indica a interação inicial, com a união dos dois elementos mais próximos, formando o primeiro grupo. A segunda linha da imagem já demonstra iterações intermediárias, onde vários elementos já foram unidos em grupos maiores. Os dendrogramas (lado direito) exibem a hierarquia entre os grupos.



Fonte: Sheehan (2023)

Figura 37 - Critérios de acoplamento entre os grupos formados pelo algoritmos de clusterização hierárquica: (a) Single-Linkage: distância entre os pontos mais próximos dos grupos; (b) Complete-Linkage: distância entre os pontos mais distantes dos grupos; (c) Average-Linkage: distância média entre todos os pontos pertencentes ao grupo; (d) Centroid-Linkage: distância entre os centroides do grupo.



Fonte: Adaptado de Alind Gupta (2023)

Para uso de tais algoritmos, utilizou-se a biblioteca Scikit Learn, da linguagem computacional Python, que já possui tais rotinas devidamente implementadas e documentadas (SCIKIT-LEARN, 2023a; SCIKIT-LEARN, 2023b). Trechos adicionais de código também foram implementados para leitura e organização dos dados de temperatura para uso com os algoritmos. Além dos dados de temperatura, a execução dos algoritmos demanda os seguintes dados de entrada ao usuário:

- K-means: número de clusters a serem formados;
- Agglomerative clustering: número de clusters a serem formados; critério de acoplamento entre os grupos (*'linkage'*), fixado na opção "Centroid-Linkage" (vide Figura 31); e o critério de cálculo da distância entre os grupos, no qual se adotou sempre a distância euclidiana.

Por se tratar de uma primeira abordagem que utiliza a tais algoritmos para separação dos grupos representativos dos fluxos da zona hiporreica, buscou-se avaliar duas situações distintas:

- o número adequado de clusters para a separação das áreas com diferentes fluxos. Os resultados dos algoritmos foram avaliados, considerando cenários de divisão dos dados em 3, 4, 5 ou 6 grupos. O número inicial de grupos foi definido levando

em conta a diferenciação de grupos já comentada: áreas de fluxo de água profunda, áreas de fluxo de área rasa, áreas de tendência influente e áreas de cabo fora d'água. O aumento do número de grupos foi verificado a fim de observar se os algoritmos possibilitam alguma melhora na classificação das áreas, mesmo que dois grupos ou mais representassem o mesmo tipo de fluxo, mas estivessem devidamente separados dos demais. Esta avaliação foi realizada para as temperaturas médias de cada um dos períodos de medição contínua de temperatura. Considerando a extensão dos dados, serão exibidos recortes específicos na exibição dos resultados.

- Verificação do comportamento dos grupos gerados em diferentes horários do dia: a partir da análise anterior e com um número fixo de grupos definido, a formação dos grupos pelos algoritmos foi avaliada para dados monitorados em diferentes horários do dia a fim de averiguar possíveis alterações nas zonas de interação definidas e auxiliar na tomada de decisão para a classificação entre as quatro categorias definidas. Esta avaliação foi realizada para dados contínuos que contemplassem ao menos quatro horários diferentes, a depender da disponibilidade de dados na campanha analisada.

A partir de tais verificações, buscou-se definir se é possível utilizar uma quantidade fixa ou variável de clusters para a separação das zonas de interação, tendo como base a temperatura ou se as variações sazonais do comportamento deste traçador natural demanda uma abordagem diferenciada para cada estação do ano. Adicionalmente, buscou-se analisar se o aumento no número de clusters contribui para a melhor separação dos tipos de fluxos ou se uma menor quantidade já é suficiente.

A comparação dos resultados de agrupamento, utilizando dados de diferentes campanhas, também possibilita confirmar se os algoritmos atendem satisfatoriamente o objetivo de separar as regiões, sem mudanças bruscas na sua classificação. Buscou-se também avaliar como o surgimento de novas regiões de interação, especialmente nas estações chuvosas, foram identificadas e agrupadas pelos algoritmos, considerando sua ocorrência em período específico e sua tendência de representar um fluxo com águas rasas.

A observação do comportamento dos grupos ao longo de diferentes horários de monitoramento visa confirmar quais as faixas de horário podem ser devidamente utilizadas para a classificação dos fluxos, nas diferentes estações do ano. Além disso, buscou-se analisar a variação na classificação dos pontos monitorados e possíveis

alternâncias de estado em cada zona. Por fim, observou-se também as faixas de temperatura indicativas de cada uma das classificações indicadas pelos grupos formados pelos algoritmos.

6.2.3 Resultados

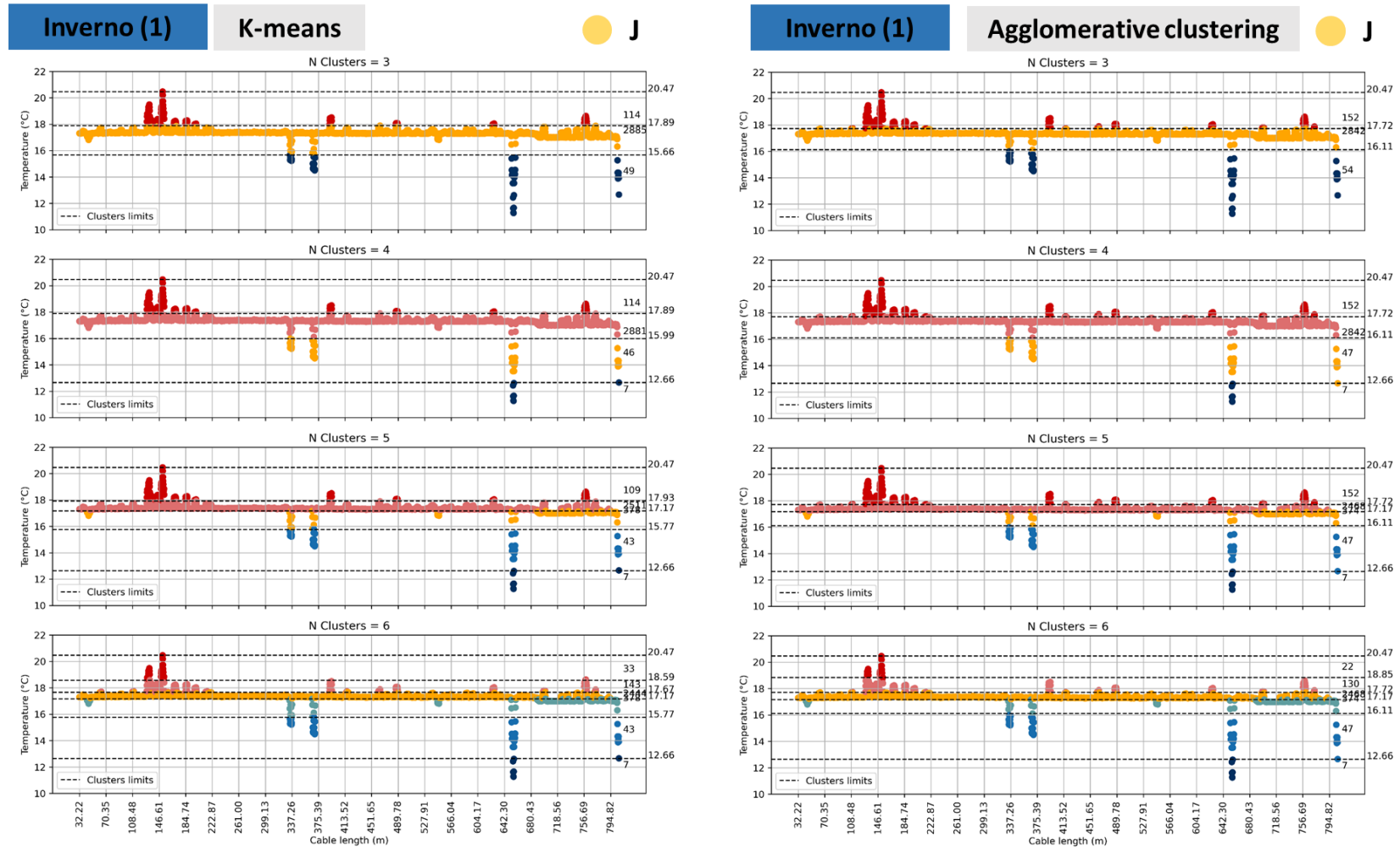
A seguir, são apresentados os resultados obtidos a partir da aplicação dos algoritmos de clusterização. Priorizou-se, neste trecho do texto, a apresentação conjunta dos resultados de ambos os algoritmos, para os dados monitorados no trecho de jusante. As discussões e conclusões obtidas a partir de tais resultados também são válidas para o trecho de montante, que tem seus resultados apresentados no Apêndice D deste trabalho.

6.2.3.1 Avaliação do número de clusters versus a capacidade de separação da origem dos fluxos

Este subtópico apresenta os resultados relativos à avaliação da quantidade de clusters inseridos como dado de entrada aos algoritmos e a respectiva capacidade de separação da origem dos fluxos de interação entre água superficial e subterrânea. Para ambos os algoritmos utilizados, avaliou-se o uso de três, quatro, cinco ou seis grupos criados para separação das zonas de interação, a partir dos dados de temperatura monitorados. Tais quantidades foram elencadas por se assemelharem ao número de zonas comumente caracterizadas em trabalhos precedentes da literatura (YAO et al., 2015; HARE et al., 2021).

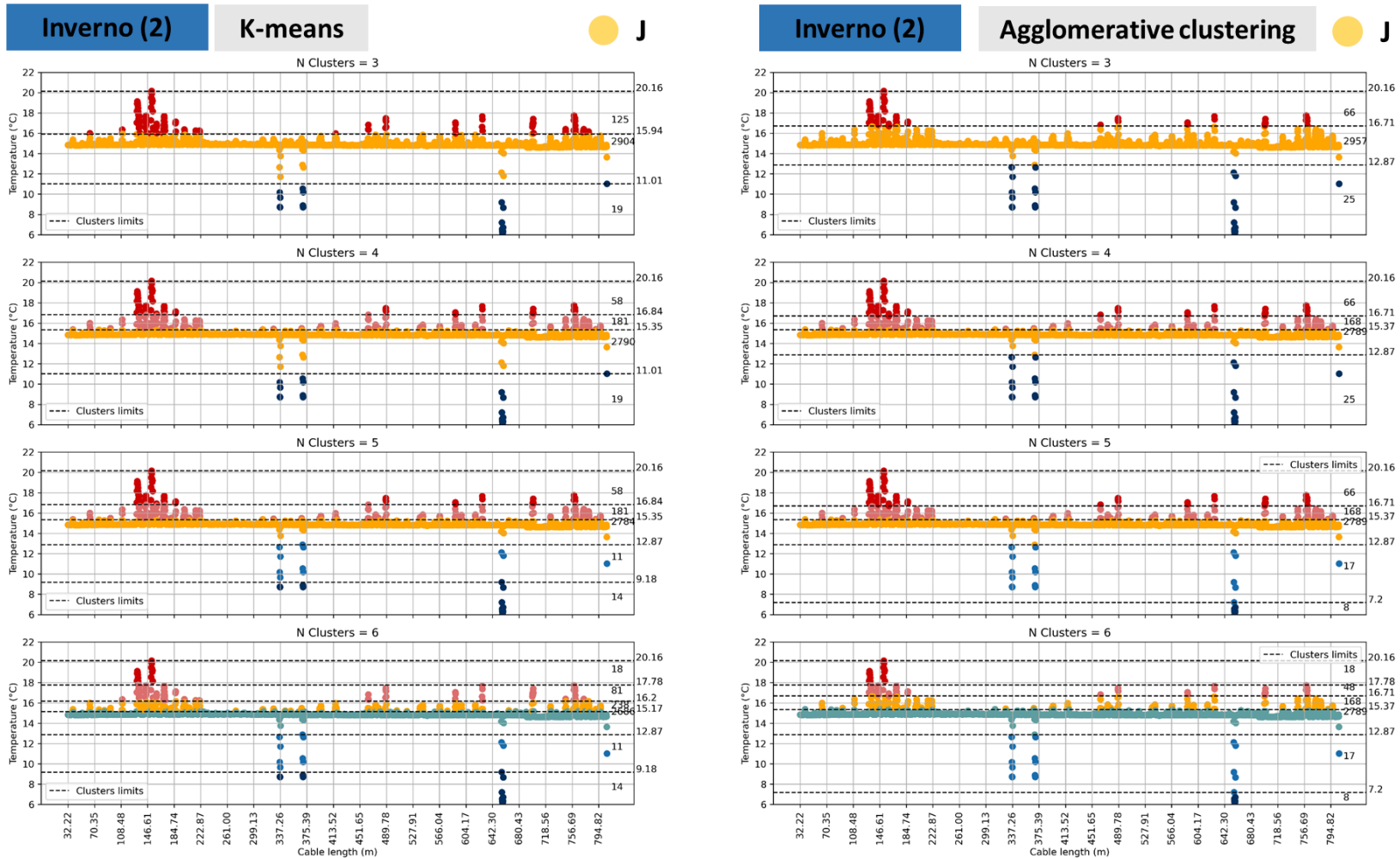
A Figura 38, a Figura 39 e a Figura 40 apresentam esta avaliação para as campanhas de Inverno (1), Inverno (2) e Outono (2), respectivamente. Tais campanhas foram inicialmente apresentadas, considerando a semelhança observada em seus comportamentos, no que se refere a quantidade de clusters e a delimitação das zonas de interação. Para estas campanhas, nota-se que o uso de três ou quatro clusters é suficiente, tanto para o algoritmo *K-means* quanto para o algoritmo *agglomerative clustering*, para definição das diferentes zonas de interação. O uso de três clusters permitiu a definição de zonas de interação (em vermelho), zonas de baixa interação (temperaturas próximas à temperatura média da campanha, indicadas em amarelo) e zonas de cabo exposto ao ar (indicadas pelos vales, com pontos em azul escuro). Um quarto grupo permite a melhor distinção, especialmente nas campanhas de Inverno (2) (Figura 39) e Outono (2) (Figura 40) dividindo as áreas de de fluxo de água profunda (maiores picos de temperatura,

Figura 38 - Verificação do número de clusters, para os dados de Inverno (1), usando ambos os algoritmos



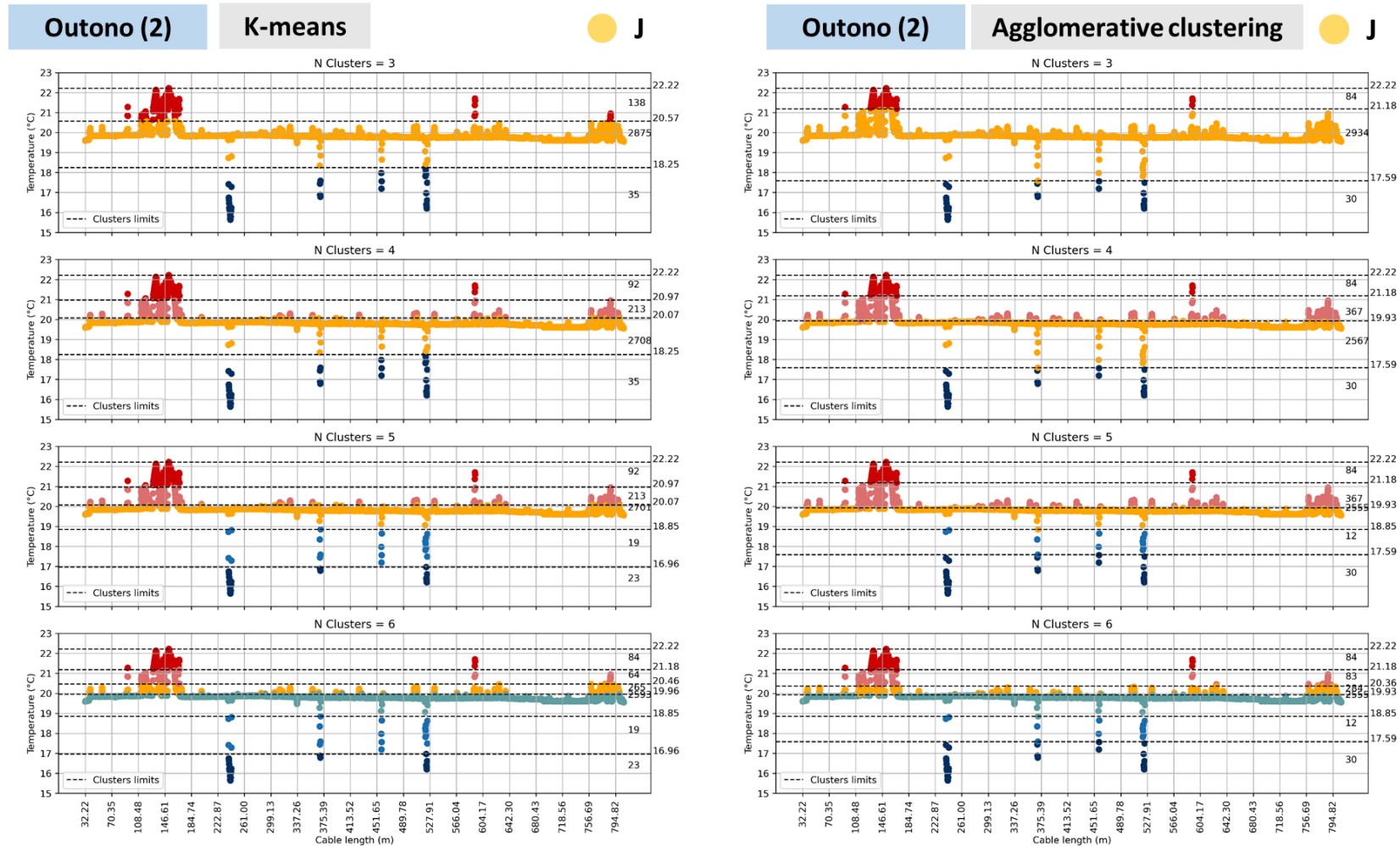
Fonte: Autor (2023)

Figura 39 - Verificação do número de clusters, para os dados de Inverno (2), usando ambos os algoritmos



Fonte: Autor (2023)

Figura 40 - Verificação do número de clusters, para os dados de Outono (2), usando ambos os algoritmos



Fonte: Autor (2023)

indicados pelos pontos em vermelho escuro) e zonas de fluxo de água rasa (picos de temperatura em menor grau, indicados pelos pontos em vermelho claro).

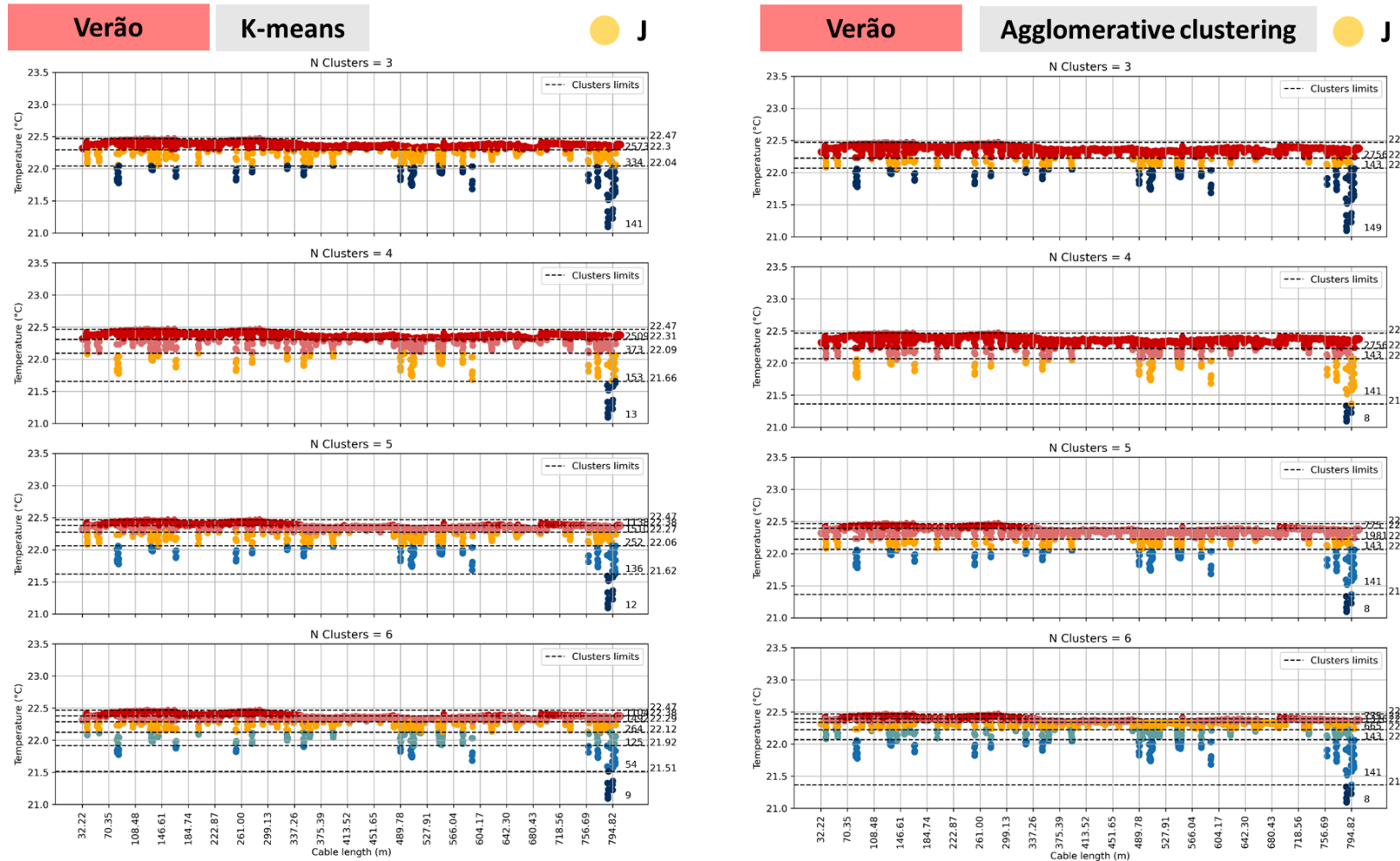
As Figuras ainda exibem as faixas de valores de temperatura em cada um dos grupos resultantes da aplicação dos algoritmos está inserida (eixo y secundário em conjunto com as linhas tracejadas), além da quantidade de pontos monitorados que se encaixam em cada grupo (valores numéricos na parte interna esquerda dos gráficos). Tanto a quantidade de pontos quanto as faixas de valores observadas são semelhantes, ao compararmos os dois algoritmos aplicados, para dados relativos a uma mesma campanha. Considerando a alta resolução de levantamento dos dados, em termos de intervalo de amostragem (1 dado de temperatura a cada 25 cm de cabo) e de resolução de temperatura ($0,01^{\circ}\text{C}$), a variação de valores observados pode ser considerada normal.

A variação de valores limites de cada intervalo que caracteriza as zonas de interação varia, em função da sazonalidade das temperaturas do ar nas diferentes estações do ano e da sua influência na temperatura da água nos diferentes monitoramentos realizados, resultando em uma variação no contraste entre a temperatura da água das diferentes origens. Apesar disso, nota-se uma permanência na classificação obtida pelas zonas de interação, nas diferentes campanhas monitoradas, a partir do uso dos algoritmos não supervisionados. Tal fato estimula o uso deste tipo de abordagem como ferramenta de compreensão e análise das áreas de interação, permitindo a sua delimitação adequada, a partir do uso de dados de temperatura. O uso de abordagens complementares, como os mapas de calor e os gráficos de linha (vide capítulo 5 deste trabalho), além da análise estatística (vide tópico 7.2), é útil para a confirmação das delimitações realizadas

O uso de cinco ou seis grupos para o agrupamento dos dados das campanhas de Inverno (1), Inverno (2) e Outono (2), não foi efetivo para a melhor separação dos grupos de interesse. Nota-se que o aumento dos grupos apenas leva a uma subdivisão das zonas já definidas, especialmente de áreas de exposição do cabo ao ar (quando o número de clusters é igual a cinco) e de zonas de baixa interação ou tendência influente (quando o número de clusters é igual a seis). Neste sentido, considerando as condições de temperatura média da água observadas nestas campanhas, conclui-se que o número de clusters igual a quatro é adequado para a delimitação das zonas de interação rio-aquífero.

A Figura 41 exibe a mesma análise de número de clusters, para ambos os algoritmos, utilizando os dados de temperatura média da água, monitorados na campanha de Verão. Mesmo com a mudança na forma de identificação das zonas de interação, desta-

Figura 41 - Verificação do número de clusters, para os dados de Verão, usando ambos os algoritmos



Fonte: Autor (2023)

cadadas por regiões mais frias que a temperatura média da medição, é possível notar que ambos os algoritmos de clusterização permitem a boa distinção das zonas de fluxos de diferentes origens.

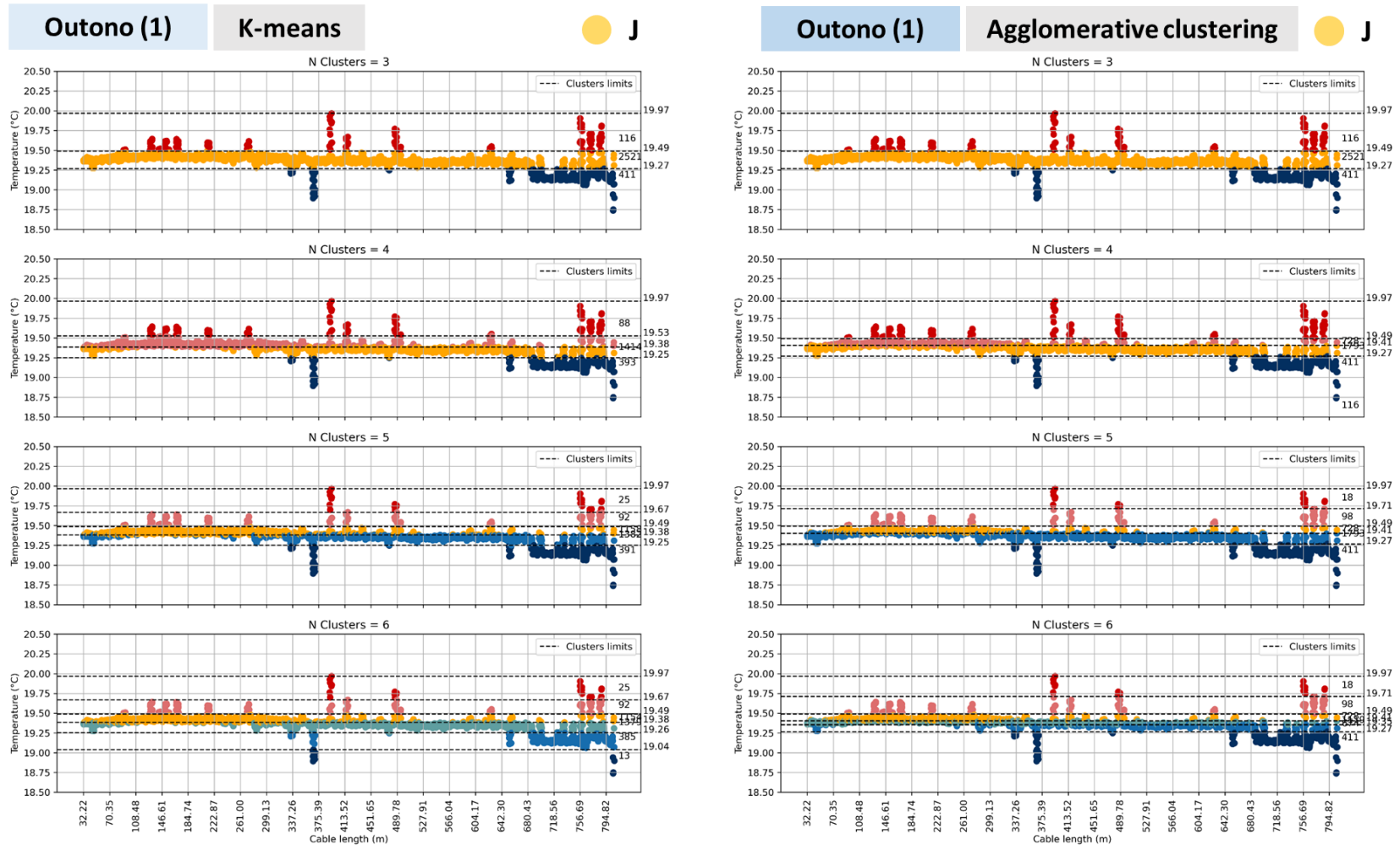
Para esta estação do ano, observa-se que as zonas de cabo exposto podem ser confundidas com áreas de interação. Diferentemente do visto nas campanhas realizadas nas estações mais frias do ano, em que as zonas em que o cabo estava fora d'água ficavam evidentes e em contraposição com as zonas de interação rio-aquífero, na campanha de Verão, tal diferenciação não é evidente, uma vez que as zonas expostas apresentam temperaturas próximas das observadas às temperaturas das zonas de interação. Tal fato pode facilitar a diferenciação das zonas, a partir do uso de apenas três clusters: zonas de baixa interação ou tendência influente (pontos em vermelho escuro), zonas de fluxo de águas rasas (pontos em amarelo) e zonas de fluxo de águas profunda (pontos em azul escuro). A redução na quantidade grupos também se justifica pela redução no contraste entre as temperaturas ambiente e temperatura da água, que leva a menores variações de valores observados e menor distanciamento entre os dados. O aumento do número de grupos para quatro, cinco ou seis não apresentou melhora significativa nesta diferenciação.

Considerando a proximidade entre as temperaturas das zonas de cabo exposto ao ar e zonas de interação, reforça-se a necessidade de uso de metodologias adicionais para separação destas regiões. Os mapas de calor e os gráficos de linha, como ferramentas qualitativas, são úteis para esta finalidade, assim como a análise da estatística descritiva dos dados (vide item 7.2 deste trabalho). Uma vez que os algoritmos utilizados analisam apenas os valores numéricos de temperatura observados em cada ponto monitorado, o agrupamento inevitavelmente colocará dados semelhantes no mesmo grupo, sem diferenciar tais zonas nesta estação.

Ainda no que se refere à campanha de Verão, nota-se que mesmo com o aumento do número de regiões de interação, em decorrência da estação chuvosa e de seus efeitos no nível freático da bacia em estudo, o desempenho dos algoritmos foi satisfatório. Nota-se que as áreas de interação efêmeras, que estavam ou não visíveis em outras campanhas de monitoramento, foram definidas zonas de interação de águas rasas, indicativas da contribuição de escoamento subsuperficial, de baixas profundidades, o que condiz com a contribuição esperada ao curso superficial neste período do ano em que tal monitoramento foi realizado.

A Figura 42 exibe a verificação do número de clusters para a campanha de Outono

Figura 42 - Verificação do número de clusters, para os dados de Outono (1), usando ambos os algoritmos



Fonte: Autor (2023)

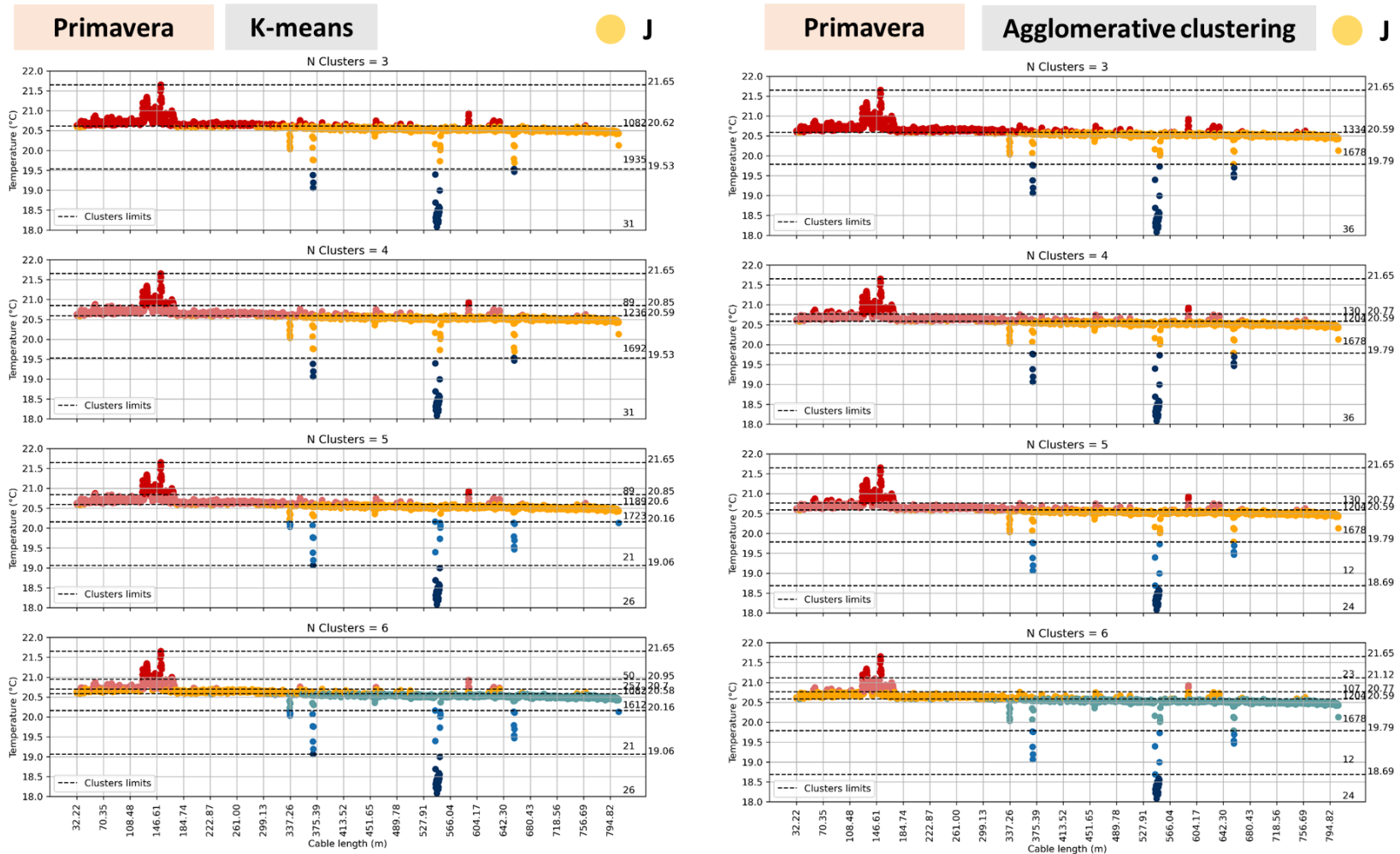
(1). Para esta campanha, destaca-se nos resultados dos algoritmos, a influência do afluente presente no trecho avaliado (próximo ao $x = 700$ m) na temperatura média dos pontos a jusante da confluência. Tal fato leva ao agrupamento dos pontos a jusante de $x = 700$ m, os quais apresentam característica de baixa interação ou tendência influente, no mesmo grupo de pontos em que o cabo está exposto ao ar (pontos em azul escuro), no processo de separação com três ou quatro clusters (quadros superiores da Figura 42).

É importante lembrar que, para esta campanha, os dados foram monitorados apenas no período diurno e os resultados apresentados na Figura 42 se referem ao dia 05 de maio de 2021. Isso contribui para a verificação desta variação brusca de temperatura, partir do ponto de confluência com o afluente principal, enquanto em outras campanhas, tal variação é vista com menor intensidade e não prejudica o agrupamento dos dados de temperatura realizados pelos algoritmos. Porém, as zonas de interação com águas profundas, mesmo em pontos a jusante da confluência, continuam a ser identificadas adequadamente pelos algoritmos, considerando o maior contraste das temperaturas entre a temperatura média da água superficial e a temperatura nas áreas de descarga de águas profundas.

Tais observações chamam a atenção para a necessidade da análise dos grupos formados *a posteriori* da utilização dos algoritmos, a fim de evitar equívocos na separação das zonas de interação. Tal tarefa é intrínseca ao uso de rotinas computacionais não-supervisionadas, considerando que os dados não apresentam nenhum tipo de classificação prévia à realização do agrupamento e não possuem condições de distinção de tais áreas sem esta análise posterior.

A variação longitudinal da temperatura da água, ao longo do comprimento da fibra ótica, também pode levar a problemas no agrupamento realizado pelos algoritmos de clusterização. Esta situação pode ser observada tanto para os dados da campanha de Outono (1) (Figura 42), considerando o aumento do número de clusters utilizados, quanto para os dados de Primavera (Figura 43), na qual os dados médios das diferentes zonas de interação apresentam baixo contraste. Nestas condições, mesmo a utilização dos algoritmos com indicação de um baixo número de clusters leva a divisão de zonas de mesmo comportamento, em termos de interação rio-aquífero (vide dados de Primavera - Figura 43 - com três ou quatro clusters). Apesar disso, as rotinas computacionais não supervisionadas continuam úteis para a separação das zonas, desde que a avaliação *a posteriori* observe possíveis divisões de grupos em áreas de mesmo comportamento, trabalhando em conjunto com outras metodologias de análise sugeridas neste trabalho.

Figura 43 - Verificação do número de clusters, para os dados de Primavera, usando ambos os algoritmos



Fonte: Autor (2023)

A partir das verificações dos números de clusters, foi possível notar que os algoritmos *K-means* e *agglomerative clustering* são boas ferramentas para a separação das zonas de interação rio-aquífero, com base em dados médios de temperatura da água, monitorados em diferentes estações do ano. O uso de três a quatro clusters foi considerado suficiente para a separação de zonas de fluxo de água, zonas de fluxo de água rasa, zonas de baixa interação ou zonas de exposição do cabo ao ar, sendo que tais quantidades de grupos podem ser consideradas referências iniciais para uso em outros monitoramentos, concordando com a quantidade de zonas de interação comumente identificadas a partir de dados de temperatura (YAO et al., 2015; HARE et al., 2021)

É importante salientar que os algoritmos citados foram sem nenhum tipo de filtragem prévia, visando verificar a aplicação independente destas rotinas aos dados monitorados, como ferramenta de separação das zonas de interação rio-aquífero. Igualmente, buscou-se manter o caráter não-supervisionado deste agrupamento. Desta forma, ações de exclusão de dados extremos como os observados em zonas de cabo exposto ao ar ou a separação de trechos do curso superficial que sofrem alterações na temperatura média da água (montante versus jusante da confluência de afluentes) não foram realizadas. Mesmo com tais condições, foi possível notar um bom desempenho dos algoritmos na separação das zonas, a partir da quantidade de clusters testada. Como já destacado, uma análise dos grupos formados, após a aplicação das rotinas computacionais, é fundamental para apoiar tal conclusão.

Acredita-se que, a partir da caracterização das zonas de interação rio-aquífero nas diferentes estações do ano, em conjunto com o uso de diferentes metodologias de análise dos dados, pode auxiliar na definição de filtros para auxiliar em um melhor desempenho das rotinas computacionais. Tais filtros poderiam levar em conta a retirada de pontos com medição de temperatura fora d'água e particularidades de cada bacia estudada, como a existência de afluentes e obras hidráulicas (barramentos ou dispositivos de medição de vazão superficial), que possam alterar o comportamento da temperatura da água. Recomenda-se cautela nesta filtragem, considerando o aspecto dinâmico das medições de temperatura com o uso de cabos de fibra ótica, que podem ter sua posição alterada pelo fluxo de água ou ação de outros agentes, podendo levar a alterações nas medições observadas entre campanhas diferentes e a respectiva alteração na classificação daquela zona. Por outro lado, o uso de filtros pode levar a mudança do caráter não-supervisionado do uso dos algoritmos, demandando uma etapa adicional de análise dos dados, previamente ao agrupamento nos diferentes tipos de interação observados.

6.2.3.2 Avaliação do comportamento dos clusters em diferentes horários do dia

Os algoritmos *K-means* e *Agglomerative Clustering* também foram aplicados aos dados de temperatura levantados em diferentes horários do dia, como forma de avaliação das zonas de interação identificadas pelos grupos formados pelas rotinas computacionais. Nesta análise, foram feitos recortes de datas específicas, em cada uma das campanhas de monitoramento, a saber:

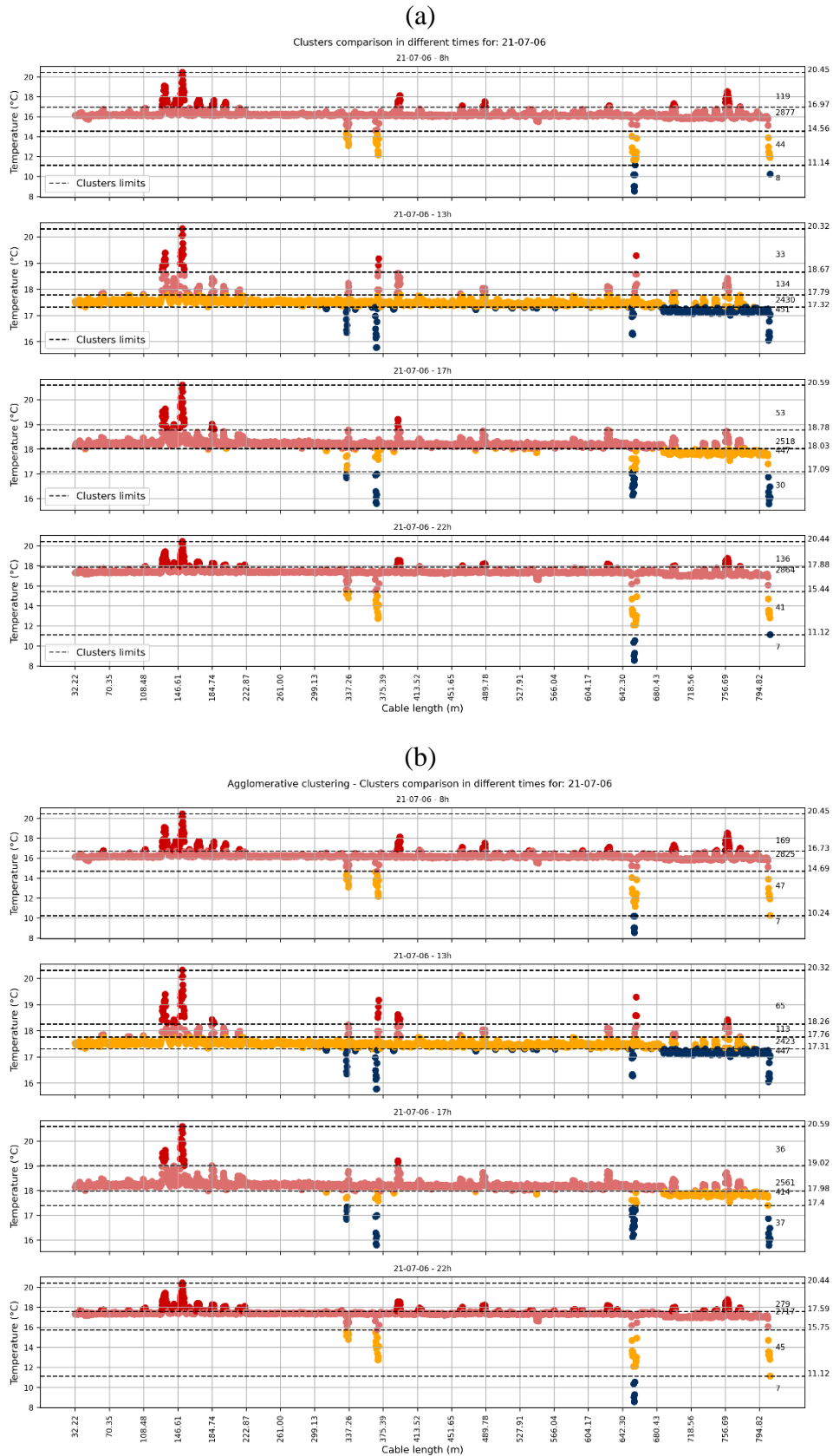
- Inverno (1) – 06/07/21
- Inverno (2) – 29/07/21
- Primavera – 08/12/21
- Verão – 25/01/22
- Outono (2) - 05/05/22

Para tais datas, foram avaliados dados levantados às 8h, às 13h, às 17h e às 22h. A campanha de Outono (1) não foi incluída nesta análise, por não dispor de dados noturnos. Fixou-se um número de quatro clusters para ambos os algoritmos, considerando a adequação desta quantidade de grupos, conforme a análise realizada no tópico anterior. Serão observadas as particularidades de cada estação monitorada, em termos de comportamento das temperaturas da água e dos resultados observados na formação dos grupos representativos das zonas de interação pelas rotinas computacionais utilizadas. Analogamente ao feito no tópico anterior, serão apresentados, neste item do texto, resultados de ambos os algoritmos para o trecho de jusante. As conclusões observadas são semelhantes para o trecho de montante, cujos resultados gráficos são apresentados no Apêndice D.

A Figura 44 e a Figura 45 apresentam os resultados observados para as campanhas de Inverno (1) e Inverno (2), respectivamente. Esta estação é aquela em que se observa o maior contraste entre as temperaturas ambientes e as temperaturas da água subterrânea, o que resulta em picos de temperatura em destaque nas zonas de interação com águas profundas, que são facilmente identificadas pelos algoritmos (pontos em vermelho escuro) em qualquer um dos quatro horários em que os dados foram observados.

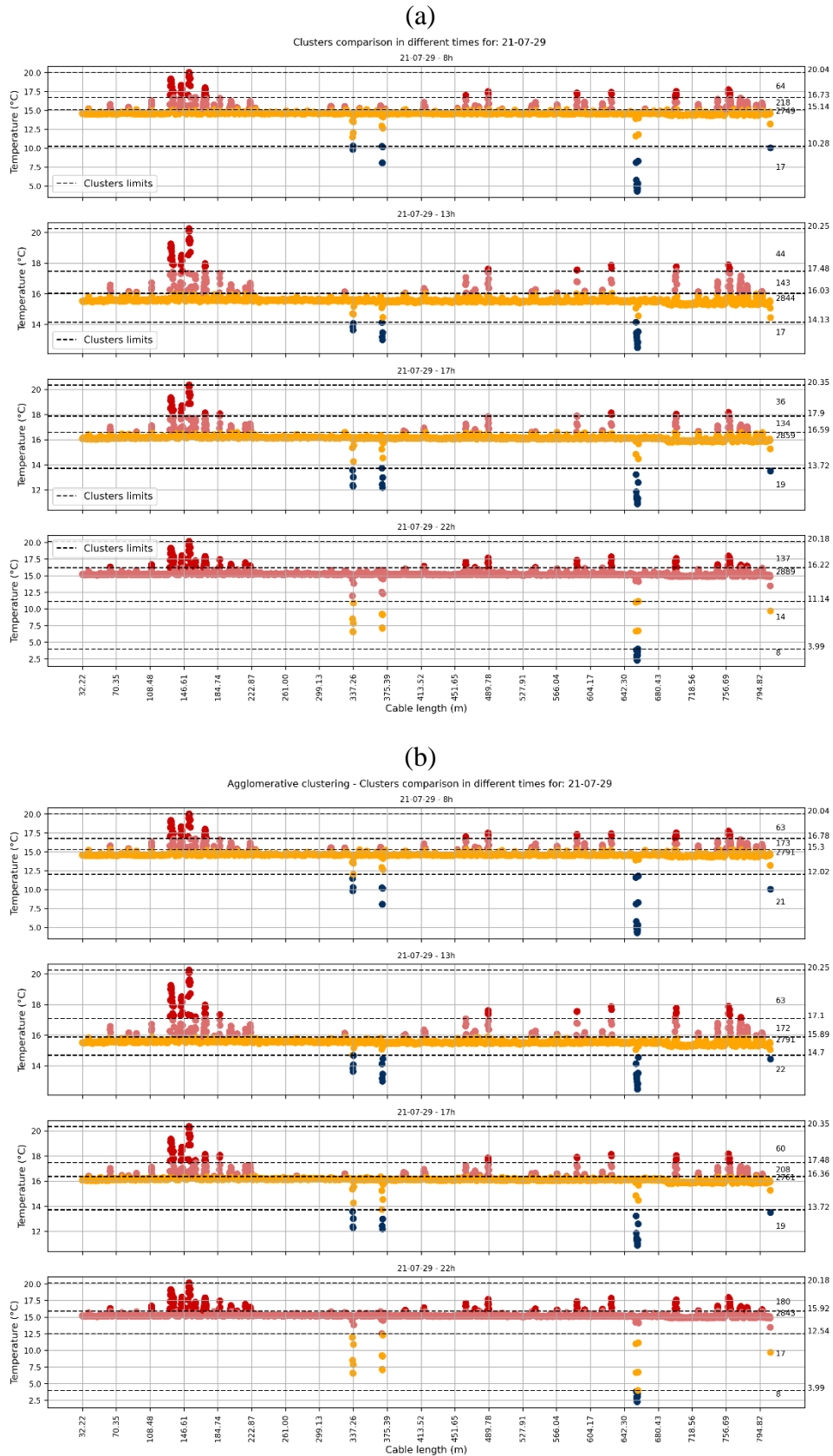
Durante o período diurno, a separação das quatro zonas de interação é mais evidente, com os locais de fluxo de zona hiporreica bem diferenciados em relação às zonas de água profunda e zonas de baixa interação. Nota-se, neste período do dia, a influência do afluente na temperatura média dos pontos a jusante da confluência, fato este que já havia sido observado para os dados de Outono (1), analisados no item anterior. Tal

Figura 44 - Comparação da formação de clusters pelos algoritmos (a) *K-means* e (b) *Agglomerative clustering*, para os dados da campanha de Inverno (1), monitorados em diferentes horários do dia 06-07-2021, no trecho de jusante



Fonte: Autor (2023)

Figura 45 - Comparação da formação de clusters pelos algoritmos (a) *K-means* e (b) *Agglomerative clustering*, para os dados da campanha de Inverno (2), monitorados em diferentes horários do dia 29-07-2021, no trecho de jusante



Fonte: Autor (2023)

situação reforça o indício de que o monitoramento da temperatura da água, em escala subdiária, pode sofrer tais efeitos, indicando a importância de se conhecer a região monitorada e as possíveis origens de fatores causadores de mudança nas temperaturas observadas.

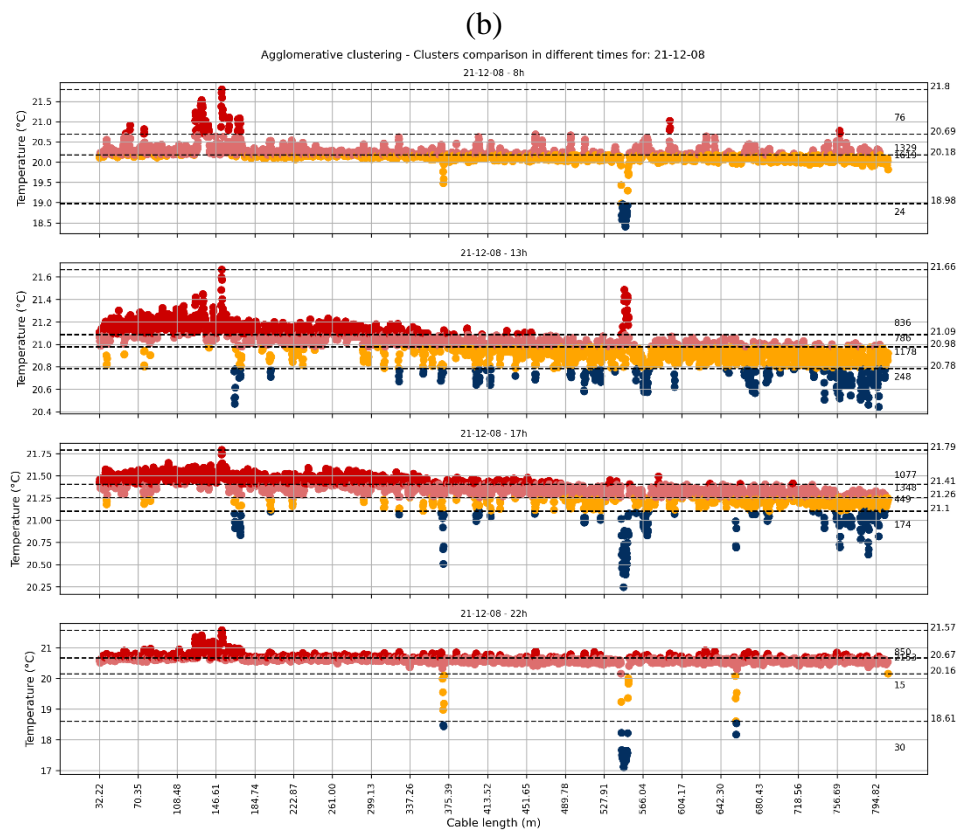
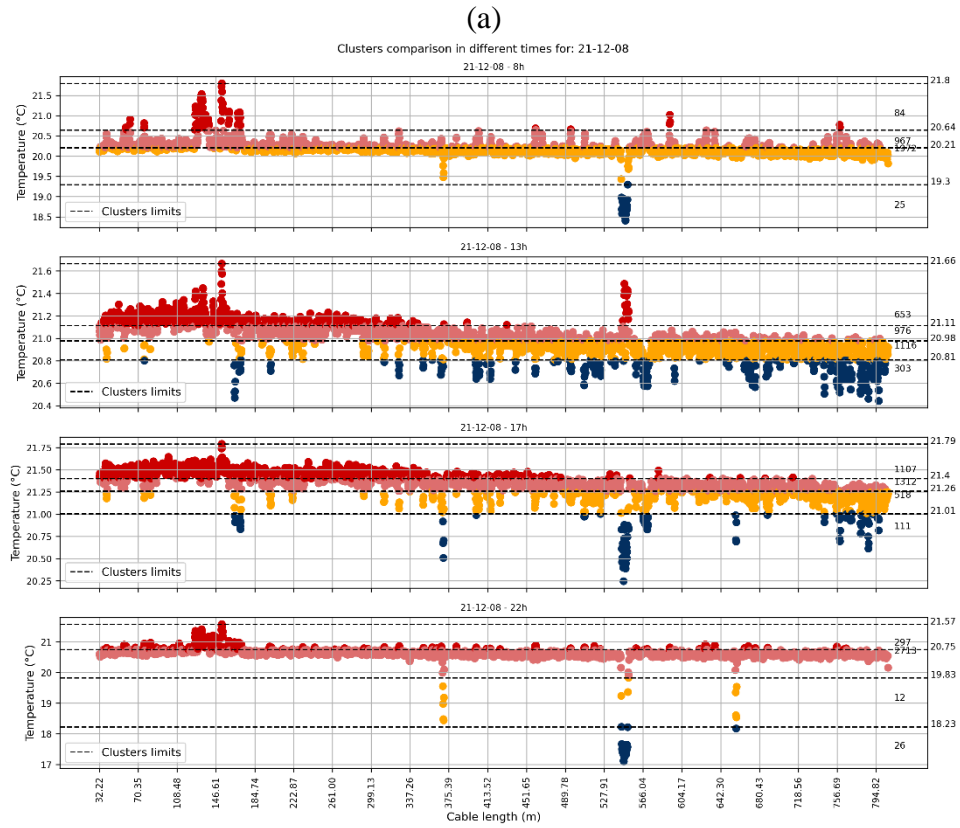
Outro fato que chama a atenção nos dados monitorados em diferentes horários nas campanhas de Inverno (1) e Inverno (2) é a influência dos dados extremos inferiores de temperatura na separação dos grupos pelos algoritmos. Em ambas as figuras (Figura 44 e Figura 45), ao se observar os dados levantados às 22h, nota-se que o uso de quatro clusters não é suficiente para segmentar as zonas de águas rasas em relação as regiões de baixa interação ou tendência influente, que são colocadas no mesmo grupo (pontos em vermelho claro). Por outro lado, os pontos pertencentes às zonas de cabo exposto ao ar apresentam maior variação de temperatura neste momento do dia, o que resultam na divisão em dois grupos, com maiores faixas de temperatura, para um mesmo comportamento. Considerando a ocorrência das temperaturas mais baixas do ano nesta estação, tais zonas estão expostas a tais variações. Especialmente, a campanha de Inverno (2), tal fato é intensificado pela ocorrência da intensa frente fria neste período de monitoramento.

Em se tratando de análise dos dados de temperatura, a observação de temperaturas extremas é interessante para definição das áreas de interação, considerando sua identificação e caracterização a partir das anomalias de temperatura, ao longo do comprimento da fibra ótica utilizada no monitoramento. Por outro lado, considerando que os algoritmos *K-means* e *Agglomerative clustering* utilizam parâmetros baseados no cálculo da distância euclidiana entre os elementos e entre os centroides dos grupos formados, a existência de valores extremos aumenta complexidade da análise dos grupos formados.

Neste sentido, indica-se como ações iniciais para dados de temperatura em escala sub-diária ou sub-horária, o uso de um maior número de clusters, que sejam posteriormente indicados como comportamento semelhante; ou mesmo a filtragem prévia dos dados. A análise posterior à formação dos grupos também continua válida. Para campanhas mais longas, o uso da temperatura média reduz a influência destes valores extremos na classificação dos fluxos e no agrupamento realizado pelas rotinas computacionais.

A Figura 46 apresenta os resultados observados para a campanha de Primavera. Como já observado a partir dos mapas de calor e gráficos de linha, esta campanha foi a

Figura 46 - Comparação da formação de clusters pelos algoritmos (a) *K-means* e (b) *Agglomerative clustering*, para os dados da campanha de Primavera, monitorados em diferentes horários do dia 08-12-2021, no trecho de jusante



Fonte: Autor (2023)

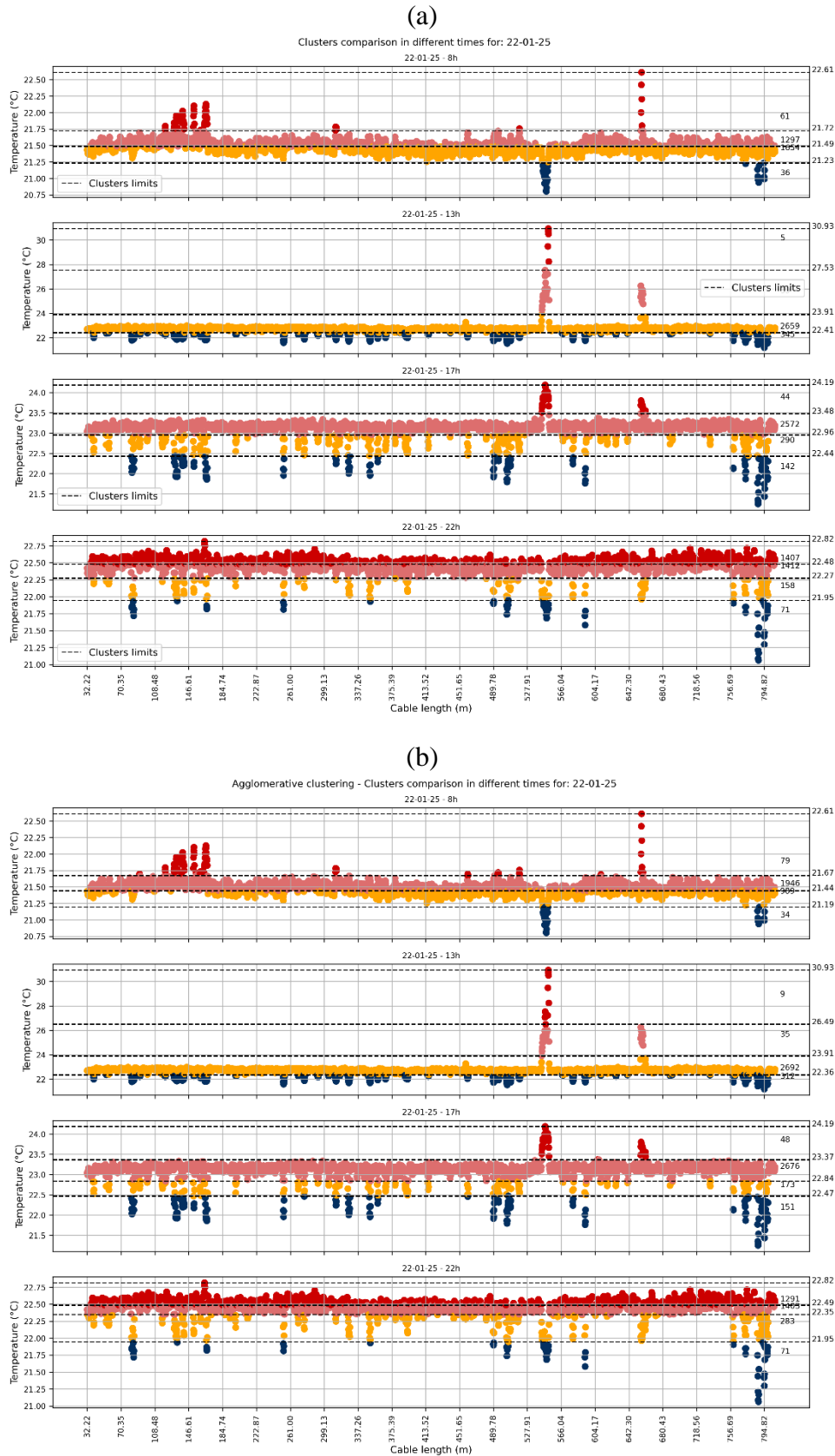
que apresentou o menor contraste entre as temperaturas da água superficial e da água subterrânea, uma vez que a temperatura média da água se aproximou do limiar de 21°C, a partir do qual se observa a transição na forma de identificação da interação rio-aquífero, entre zonas quentes e zonas frias. A partir da Figura 46, nota-se a concentração dos dados de temperatura monitorados em cada um dos pontos em torno deste limiar, especialmente nos dados das 13h e 17h. Adicionalmente, a variação da temperatura ao longo do comprimento do rio, em termos longitudinais, também dificulta a boa separação das zonas de interação nestes horários e causa intensa alteração no número de elementos em cada um dos quatro grupos formados.

Por outro lado, ao se observar os dados de 8h e 22h, há uma melhor tendência de separação das zonas de interação, incluindo águas profundas e águas rasas em um mesmo grupo (pontos vermelhos escuros), zonas de baixa interação ou tendência influente e zonas de exposição de cabo ao ar. Esta observação reforça a indicação de que, para campanhas curtas, em escala horária ou sub diária, durante a estação de Primavera, a observação de dados vespertinos e noturnos é mais interessante para a delimitação das zonas de interação e suas variações de comportamento.

Outro comportamento observado durante a campanha de Primavera e que também se repete para os dados monitorados na campanha de Verão (Figura 47) é alternância das temperaturas observadas em zonas de cabo exposto ao ar, que podem levar a classificação equivocada da zona de interação, a partir da observação isolada dos resultados de agrupamento pelos algoritmos utilizados. Por exemplo, para a região localizada em $x = 550$ m, é possível notar temperaturas baixas nos dados de 8h e 22h, enquanto observa-se temperaturas altas nos dados de 13h e 17h. Como nestas duas estações, podem ocorrer alternância ou mudança na forma de identificação das zonas de interação, é importante dispor de formas adicionais de observação dos dados, de forma a classificar corretamente tais zonas.

Para os dados de Verão avaliados (Figura 47), o comportamento dos clusters é satisfatório para a separação das diferentes zonas de interação, especialmente nos períodos vespertinos e noturnos, em que a mudança na característica de identificação das regiões de descarga de água subterrânea por zonas frias. O aumento do contraste nas temperaturas, da tarde para a noite, permite que uma transição na formação dos grupos realizada pelos algoritmos, que indicam as zonas de interação em um grupo único às 13h e permitem o delineamento dos grupos de águas rasas (pontos em amarelo) e profundas (pontos em azul escuro) com os dados observados às 17h e às 22h.

Figura 47 - Comparação da formação de clusters pelos algoritmos (a) *K-means* e (b) *Agglomerative clustering*, para os dados da campanha de Verão, monitorados em diferentes horários do dia 25-01-2022, no trecho de jusante



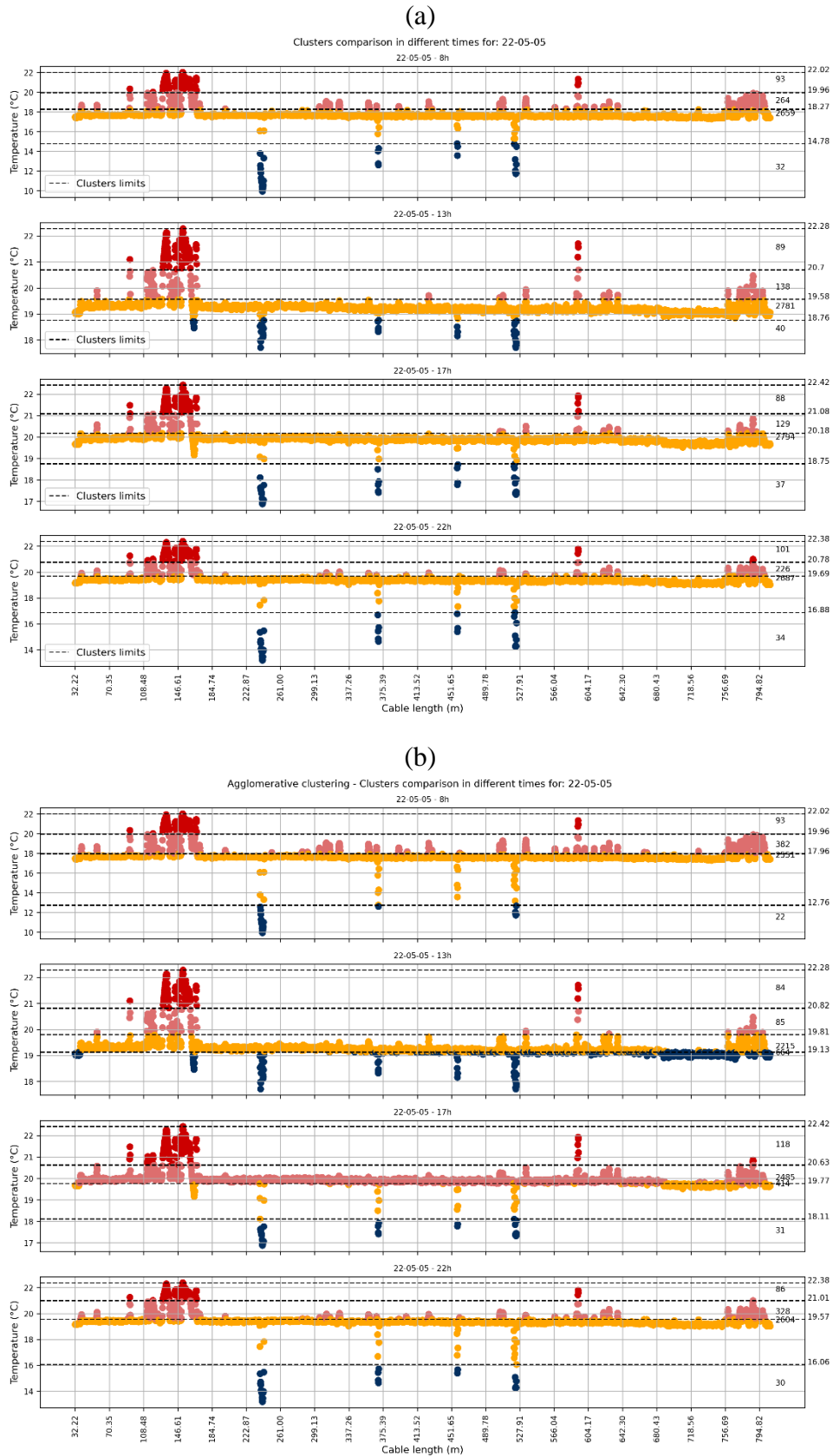
Fonte: Autor (2023)

Já a Figura 48 apresenta os resultados observados para a campanha de Outono (2). Ao se observar os grupos formados nos diferentes horários destacados, nota-se que a aplicação do algoritmo *K-means* resultou em zonas bem definidas, sem grandes variações nas observações diurnas e noturnas. As variações de temperatura facilitam o melhor delineamento das zonas de interação de águas rasas (ponto em vermelho claro) com as zonas de baixa interação ou tendência influente (pontos em amarelo), que se distinguem melhor nos horários de temperatura do ar mais baixas (8h e 22h).

Ao se comparar o algoritmo *K-means* e o algoritmo *Agglomerative Clustering*, nota-se que, para esta análise comparativa de horários, os agrupamentos indicados apresentam maiores discrepâncias, em especial aos dados monitorados às 13h e às 17h. Nestes horários, o algoritmo hierárquico foi menos eficiente para a separação das zonas de água rasa, de baixa interação e de zonas de cabo exposto ao ar, que apresentam comportamentos bem definidos nesta estação do ano e foram melhor separados com o uso do algoritmo baseado nos centroides. Tal fato reforça as diferenças existentes entre os algoritmos e sua sensibilidade a dados próximos e dados extremos, sendo papel importante a observação e interpretação dos grupos formados após a sua aplicação.

Em suma, a avaliação do uso dos algoritmos de clusterização aplicados a dados em diferentes horários permite observar o quanto a variação dos dados de temperatura pode modificar os agrupamentos obtidos pelas rotinas computacionais não supervisionadas, além de permitir observar as particularidades de cada estação em dados medidos em escala sub-diária. Destacam-se a influência de temperatura extremas inferiores nas campanhas de Inverno; nas variações de temperatura da água em pontos dos rios a jusante da confluência de afluentes, observadas em dados de diferentes estações do ano; a variação longitudinal da temperatura média da água, ao longo do comprimento monitorado e a variação na forma de detecção das zonas de interação, em termos de zonas quentes e zonas frias. Alguns destes aspectos não haviam sido visualizados durante as análises de número de clusters, em torno das temperaturas médias de cada campanha, e são importantes para futuros levantamentos curtos de dados de temperatura, em escalas horárias, que visem caracterizar as zonas de interação com o uso dos algoritmos de clusterização. A observação de tais particularidades demanda o uso de metodologias complementares de análise dos dados de temperatura, como as abordadas ao longo do texto desta tese, assim como o devido conhecimento das características da bacia hidrográfica na qual o estudo vem sendo desenvolvido, de forma a identificar possíveis fontes de alteração das temperaturas da água, que afetem a separação dos grupos.

Figura 48 - Comparação da formação de clusters pelos algoritmos (a) *K-means* e (b) *Agglomerative clustering*, para os dados da campanha de Outono (2), monitorados em diferentes horários do dia 05-05-2022, no trecho de jusante



Fonte: Autor (2023)

6.2.4 Conclusões

Este tópico apresentou o uso de algoritmos de clusterização *K-means* e *Agglomerative Clustering* para o agrupamento de dados de temperatura e ferramenta de delineamento das zonas de interação rio-aquífero. Foi possível observar, a partir dos dados monitorados em campanhas realizadas em diferentes estações do ano, que tais rotinas computacionais podem ser úteis para a indicação de áreas de descarga de águas profundas, de águas rasas, zonas de baixa interação ou tendência influente, além de áreas de exposição do cabo ao ar. A indicação de uma quantidade igual a três ou quatro clusters é suficiente para este delineamento, sendo que o aumento neste número pouco contribui para a melhor separação das zonas, quando avaliadas a partir das temperaturas médias de uma campanha de medição.

A partir da definição desta quantidade de clusters, foram realizadas análises do comportamento dos grupos para dados monitorados em diferentes horários do dia, em cada uma das campanhas. Tal observação buscou trazer indicações de cuidados para futuros monitoramentos de temperatura, realizados nesta área de estudo ou em outras áreas tropicais, que contemplem levantamentos curtos em escala horária ou inferior a um dia. Neste sentido, foi possível observar algumas particularidades que possam influenciar os resultados dos grupos formados e sua respectiva interpretação. Destaca-se a influência de temperaturas extremas inferiores, a variação longitudinal da temperatura do curso superficial, variações do comportamento na identificação das zonas de interação entre as estações e as variações de temperatura causada pela confluência de afluentes.

Por fim, é importante destacar que os algoritmos utilizados neste trabalho foram aplicados sem nenhum tipo de tratamento ou filtragem prévia dos dados, com o objetivo de manter o caráter não-supervisionado e simplificado das rotinas computacionais. Como consequência, torna-se essencial avaliar os grupos formados em conjunto com outras metodologias de caracterização das zonas de interação rio-aquífero, assim como observar as características específicas de cada área de estudo, garantindo assim uma classificação coerente com o comportamento da interação rio-aquífero. Considerando a natureza sazonal das temperaturas e o comportamento das zonas de interação, trabalhos futuros poderão implementar estratégias de filtragem inicial dos dados, a fim de aprimorar os grupos gerados pelos algoritmos e fornecer um delineamento mais preciso das zonas de interação.

7 RELAÇÕES ENTRE TEMPERATURA DA ÁGUA E TEMPERATURA DO AR COMO ESTRATÉGIA DE CLASSIFICAÇÃO DE FLUXOS

7.1 Introdução

Como pode ser observado nos resultados apresentados nos capítulos anteriores, existe uma influência direta da temperatura do ar na temperatura da água superficial, mensurada pela medição distribuída de temperatura. De forma qualitativa, porém, foi possível observar que as temperaturas nas zonas de interação rio-aquífero se diferenciam com relação esta influência, apresentando características persistentes, se comportando como regiões mais quentes ou mais frias, em relação a zonas vizinhas.

Estabelecer uma relação quantitativa entre os sinais de temperatura da água e do ar auxiliar na diferenciação da origem dos fluxos de água subterrânea que descarregam nos rios. As águas subterrâneas mais rasas podem apresentar características de temperatura semelhantes ou mais próximas da temperatura do ar, por estarem em camadas mais próximas ao meio atmosférico e por responderem rapidamente a perturbações de curto prazo, como os eventos chuvosos de verão, além de estarem expostas à troca constante com o meio superficial, ao longo do comprimento longitudinal do rio (fluxo de zona hiporreica). Já as águas subterrâneas mais profundas apresentam sinais de temperatura com menores variações, sendo influenciados apenas por fenômenos climáticos de médio ou longo prazo, na escala de décadas ou séculos. (BRIGGS et al., 2018; HARE et al., 2021; HARE et al., 2023).

Apesar da ideia bem consolidada do comportamento da temperatura das águas subterrâneas, as análises geralmente são realizadas com dados de longo prazo, com séries temporais de temperatura da água dos rios e de temperatura da água em poços de vários anos. Tal disponibilidade de dados é rara em países como o Brasil. Adicionalmente, nota-se na literatura uma ausência de análise conjunta entre tais séries temporais, utilizando dados de medição de temperatura distribuída e séries temporais curtas, no contexto de campanhas de monitoramento. Desta forma, buscou-se contribuir a esta lacuna, adicionando a especificidade do levantamento de dados realizado em uma área tropical.

Neste sentido, este capítulo da tese visa apresentar algumas abordagens de análise conjunta entre as séries temporais de temperatura do ar (consultar o capítulo 4 para mais detalhes nestas séries) e as séries temporais de temperatura da água, monitoradas com o dispositivo DTS implementado na Bacia do Ribeirão da Onça (BRO), nas diferentes campanhas de monitoramento realizadas. A aplicação de tais metodologias visa

diferenciar, em termos quantitativos, o comportamento diferenciado das zonas de interação rio-aquífero e das águas de diferentes origens,

Serão utilizadas quatro abordagens desta categoria:

- No item 7.2, serão realizadas observações dos valores de amplitudes, médias, medianas e desvios padrões da temperatura da água e suas relações com a temperatura do ar;
- No item 7.3, aplica-se a correlação cruzada entre as séries temporais de temperaturas da água e do ar, a fim de observar a sua similaridade ou não.
- No item 7.4, utiliza-se dois parâmetros de análise de sinais de temperatura para observação das zonas de interação rio-aquífero: a razão entre as amplitudes da água e do ar e o tempo de retardamento (lag-time) entre estes sinais de temperatura.
- No item 7.5, recorre-se ao teste de causalidade de Granger, como forma de identificar zonas onde a relação causa-efeito entre as temperaturas seja forte ou fraca, indicando diferenças nas origens dos fluxos.

7.2 Observação das amplitudes, médias e desvios padrões

7.2.1 Metodologia

Os dados estatísticos principais foram utilizados para descrição e avaliação do comportamento das temperaturas, em cada um dos pontos monitorados, ao longo do tempo. Neste sentido, o valor médio das temperaturas e os respectivos desvios padrões, foram levantados, para cada um dos segmentos de dados contínuos monitorados nas campanhas realizadas em cada estação do ano. Analisou-se também as amplitudes térmicas das temperaturas, dadas pela diferença entre a temperatura máxima e a temperatura mínima observadas no ponto monitorado, em determinado intervalo de tempo. Foram avaliadas as amplitudes em escala diária e também em escala de campanha, reunindo os segmentos de tempo monitorados.

A Figura 49 apresenta um resumo das análises realizadas com estes dados estatísticos e os respectivos resultados esperados. Inicialmente, a temperatura média em cada ponto monitorado foi comparada à mediana de todo o conjunto de pontos, ao longo do comprimento do trecho avaliado. Esta comparação buscou separar as zonas de alta interação, zonas de baixa interação e regiões de exposição do cabo ao ar. As zonas de alta interação são identificadas com valores de temperatura média distantes (superiores ou inferiores) à mediana, a depender da estação em que o monitoramento foi realizado e da condição na qual as zonas de interação se apresentam (regiões quentes ou regiões frias). Para as zonas de baixa interação, nota-se temperaturas médias próximas da mediana. Já as zonas de cabo exposto ao ar são bem caracterizadas por desvios, que também dependem da estação do ano avaliada.

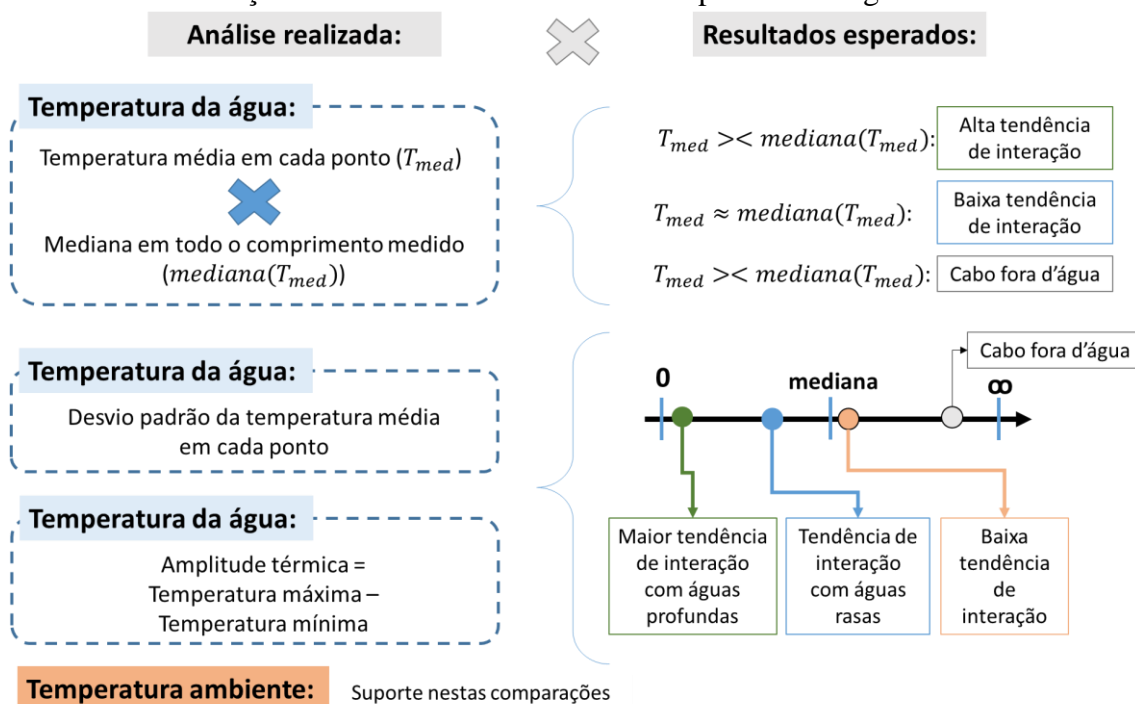
Complementarmente a esta análise, a verificação dos desvios padrão das temperaturas observadas permite uma melhor diferenciação entre as zonas de interação com águas mais profundas e zonas de águas mais rasas. Busca-se tal classificação a partir da separação de faixas de valores de variação da temperatura média, em cada uma das regiões de interação previamente identificadas. Os menores valores devem indicar zonas de interação com águas subterrâneas profundas, enquanto valores intermediários devem indicar fluxos de zona hiporreica. Locais de baixa interação e trechos de cabo exposto ao ar devem apresentar os maiores valores de desvio.

As amplitudes térmicas nos pontos monitorados também tendem a seguir o mesmo comportamento dos desvios, uma vez que as zonas de interação com águas profundas terão seus valores máximos e mínimos de temperatura atenuados, em virtude da descarga de água, por consequência, de um sinal de temperatura mais estável, na zona de mistura.

Já as zonas de interação com águas rasas tendem a apresentar amplitudes com menor atenuação.

Valores importantes relativos à temperatura do ar, tais como as médias, desvios e amplitudes, também serão utilizados nestas análises, como suporte para as conclusões. Como já comentado, os dados de temperatura considerados foram obtidos na Estação Monte Alegre, localizada na área central da bacia. Tais dados foram apresentados e comentados no Capítulo 4 deste trabalho.

Figura 49 - Resumo das análises realizadas e dos resultados esperados, a partir das observações dos valores estatísticos da temperatura da água e do ar

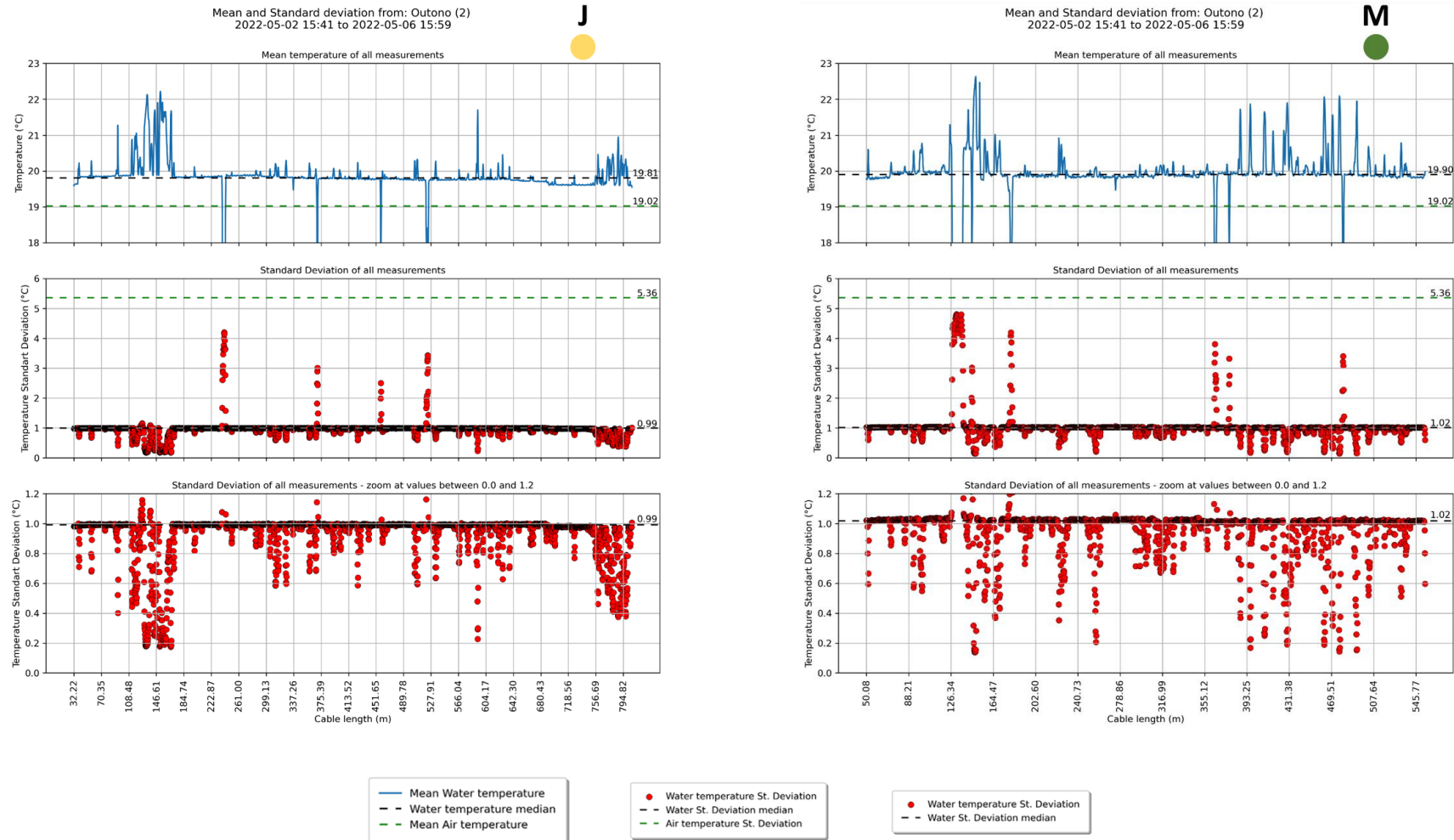


Fonte: Autor (2023)

7.2.2 Resultados

A Figura 50 exibe os resultados de média e desvio padrão das temperaturas monitoradas na campanha de Outono (2). A imagem da esquerda exibe os resultados para o trecho de jusante enquanto a imagem da direita exibe os resultados para o trecho de montante. Ambas são divididas em 3 quadros, que apresentam o comprimento do trecho como eixo das abcissas comum: o quadro superior exibe a temperatura média, ao longo de toda a campanha, de cada um dos pontos monitorados; o quadro central exibe uma visão geral dos valores de desvio padrão de cada um dos pontos monitorados, considerando os dados monitorados em toda a campanha; enquanto o quadro inferior exibe os mesmos valores de desvio padrão, restringindo ao intervalo entre 0 e 1,2 °C, de

Figura 50 - Média e desvio padrão das temperaturas monitoradas na campanha de Outono (2), para o trecho de jusante (à esquerda) e montante (à direita)



Fonte: Autor (2023)

forma a destacar as regiões com maior concentração de pontos deste parâmetro. Linhas tracejadas complementam os gráficos com a informação da temperatura média do ar e da mediana das temperaturas da água (para o quadro superior), com a mediana dos desvios padrão da temperatura da água e o desvio padrão da temperatura do ar (para o quadro central e inferior). Figuras semelhantes foram construídas para as outras campanhas de monitoramento e são apresentadas no Apêndice E deste trabalho (Figuras E-1 a E6), a fim de evitar o prolongamento deste tópico e permitir que o leitor visualize o comportamento de todo o conjunto de dados, a partir dos gráficos.

A partir de tais resultados, pode-se observar que:

(1) *Uso da mediana das temperaturas médias como parâmetro de isolamento de dados*: o uso da mediana das temperaturas médias de uma campanha de monitoramento é um bom parâmetro para isolamento das zonas de interação e das áreas de exposição do cabo ao ar. Como pode ser observado nos quadros superiores da Figura 50, a linha tracejada preta divide as zonas mais quentes, relativas as áreas de descarga de água subterrânea rasa e/ou profunda das áreas com temperaturas médias mais baixas, correspondentes às zonas de exposição do cabo ao ar. Apesar desta figura apresentar apenas resultados da campanha de Outono (2), tal fato se repete para as campanhas de Inverno e Primavera, como pode ser observado nas imagens do Apêndice E. Para a campanha de Verão, como as zonas de interação passam a ser identificadas também como zonas frias, recomenda-se a observação conjunta da mediana em conjunto com os desvios padrão, que permitem o isolamento das duas áreas. Adicionalmente, recomenda-se a observação nas regiões próximas a afluentes, que possam causar modificação nas temperaturas médias da água a jusante do ponto de encontro entre os cursos superficiais.

(2) *Zonas de cabo exposto ao ar - anomalias nas temperaturas médias em conjunto com elevados valores de desvio padrão*: como já indicado na Figura 49, a análise conjunta das anomalias de temperatura, em termos de valores médios, e dos desvios padrão definidos em cada ponto permitem a separação das zonas de interação e de exposição do cabo ao ar. Neste sentido, destacam-se os pontos de exposição do cabo ao ar, que sofrem variações elevadas de temperatura, próximas das variações observadas na temperatura do ar. Ao se observar a Figura 50, nota-se que as zonas temperaturas médias mais baixas, em ambos os trechos monitorados, correspondem aos pontos com maiores desvio padrão, superiores ao valor da mediana dos desvios padrão. Adicionalmente, tais zonas apresentam tendência de temperatura média próxima à temperatura média do ar ao longo da campanha, assim como tendência de aproximação dos desvios padrão ao desvio

da temperatura do ar. Tal tendência se repete nas demais campanhas de monitoramento, para ambos os trechos, conforme pode ser visto nas imagens disponíveis no Apêndice E. Para a campanha de Verão, é importante observar o comportamento do desvio padrão da zona, uma vez que a temperatura média das zonas expostas ao ar ficam semelhantes às zonas de interação.

(3) *Zonas de interação com águas profundas - anomalias nas temperaturas médias em conjunto com baixos valores de desvio padrão*: ao se observar as temperaturas médias da campanha de Outono (2) (quadros superiores na Figura 50), nota-se que as zonas mais quentes, com picos de temperatura tendendo aos 21 °C e que apresentam comportamento persistente, como observado nos mapas de calor, com dados contínuos; correspondem às zonas com valores baixos de desvio padrão (quadros inferiores da Figura 50). Para a referida campanha, os valores de desvio padrão destas áreas foram inferiores à 0,4 °C. Tais zonas podem ser identificadas como áreas de interação com águas mais profundas, ao carregarem a característica térmica do aquífero e apresentarem baixas variações de temperatura ao longo do tempo, considerando os diferentes monitoramentos. Tal padrão se repete para tais zonas nas diferentes campanhas realizadas, mesmo com a inversão na forma de detecção das zonas de interação, observada nas temperaturas médias da campanha de Verão (consultar imagens do Apêndice E) e com a variação das temperaturas monitoradas, em virtude da sazonalidade. A observação dos valores de desvio padrão permite o estabelecimento de uma métrica para isolamento destas zonas.

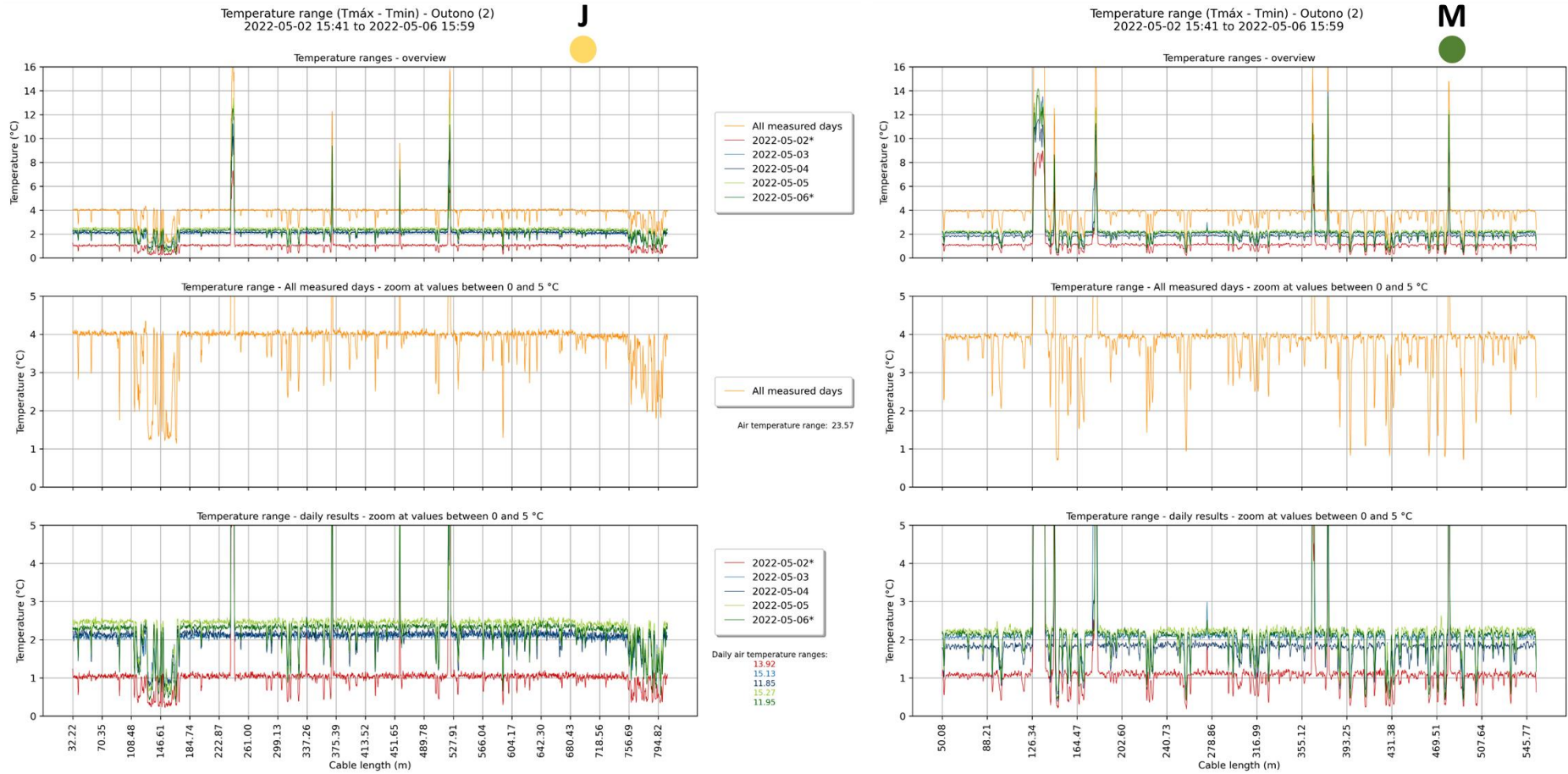
(4) *Zonas de interação com águas rasas - anomalias nas temperaturas médias em conjunto com valores intermediários de desvio padrão*: ao se observar as temperaturas médias da campanha de Outono (2) (quadros superiores na Figura 50), é possível observar anomalias de temperatura menos intensas, ligeiramente superiores à 20 °C, e que correspondem à zonas com valores intermediários de desvio padrão (quadros inferiores da Figura 50), inseridos entre o valor de mediana e os valores mais baixos deste parâmetro. Para a referida campanha, o desvio padrão se encaixa na faixa entre 0,4 e 1,0 °C. Tais zonas caracterizam áreas de interação com águas rasas, uma vez que apresentam maiores variações de temperatura, quando comparadas às zonas de interação com águas profundas, em conjunto com picos de temperatura média inferiores aos observados, decorrentes da mistura da água superficial e da água subterrânea na zona hiporreica e da sua descarga metros a jusante. Tal comportamento também se repete nas demais campanhas, mesmo com a variação nas condições de temperatura do ar e de identificação da interação (vide Apêndice E).

(5) *Zonas de interação influente ou de baixa interação – ausência de anomalias nas temperaturas médias em conjunto com valores de desvio padrão próximos à mediana dos desvios*: novamente, ao se observar as temperaturas médias da campanha de Outono (2) (quadros superiores na Figura 50), é possível notar que zonas com temperaturas médias próximas do valor da mediana, sem a ocorrência de picos locais, coincidentes com valores de desvios padrão próximos aos valor da mediana dos desvios (quadros inferiores na Figura 50). Para a campanha de Outono (2), as temperaturas nestas zonas permaneceram próximas aos 19,8 °C e os desvios padrões próximos de 1,0 °C. A ausência de anomalias de temperatura e a tendência mais elevada dos valores de desvio padrão configura a ocorrência de zonas influentes ou de baixa interação, indicativas da infiltração da água superficial no meio subterrâneo, para formação de fluxos de zona hiporreica e respectiva descarga metros a jusante. A variação nas temperaturas destas zonas é decorrente da exposição à temperatura do ar, atenuada pelo fluxo superficial da água e pelas propriedades térmicas deste fluido.

Este comportamento é repetido pontualmente nas demais campanhas realizadas (vide Apêndice E). Porém, nos monitoramentos de estações mais chuvosas, tais como a Primavera e o Verão, é possível observar a mudança no comportamento em tais zonas, com a ocorrência momentânea de fluxos de descarga de águas rasas, com o aparecimento de anomalias pouco intensas nas temperaturas médias em conjunto com uma redução nos valores de desvio padrão. Tal situação é revertida posteriormente, na estação seca seguinte. Destaca-se ainda o efeito dos afluentes na temperatura média a jusante do ponto de encontro, que pode resultar em valores de temperatura inferiores à mediana (trecho de jusante na Figura 50), mas que continuam a não apresentar picos locais de temperatura e desvios padrão próximos à mediana dos desvios, configurando assim zonas de baixa interação ou de tendência influente.

De forma semelhante, a Figura 51 apresenta as amplitudes térmicas da água, em escala diária e em escala de campanha, para o monitoramento de Outono (2). Analogamente à figura anterior, a imagem da esquerda apresenta os resultados para o trecho de jusante enquanto a imagem da direita apresenta os dados do trecho de montante. Novamente as imagens são divididas em três quadros: o quadro superior apresenta uma visão geral de todas as amplitudes térmicas calculadas, tanto na escala de campanha (“*all measured values*”) quanto na escala diária, cuja data é indicada na legenda. Os quadros central e inferior apresentam, respectivamente, apenas o resultado da amplitude de campanha e das amplitudes diárias, restringindo a exibição do resultado a um intervalo

Figura 51- Amplitudes térmicas da água, em escala diária e em escala de campanha, para o monitoramento de Outono (2), para o trecho de jusante (à esquerda) e montante (à direita)



Fonte: Autor (2023)

entre 0 e 5 °C, a fim de se identificar as zonas com diferentes comportamentos. Complementarmente são indicados junto à legenda os valores de amplitude térmica do ar, durante todo o período de monitoramento e em escala diária (em cores semelhantes às linhas referentes àquele dia). Datas com asterisco indicam dias em que o monitoramento de temperaturas não completou às 24 horas da escala diária, em virtude do início/término do monitoramento ou em virtude de descontinuidade no levantamento de dados. Figuras semelhantes foram produzidas para as demais campanhas e são apresentados no Apêndice E deste trabalho (Figuras E-7 a E-12), permitindo o leitor a visualização de todo o conjunto de dados.

Ao se observar os resultados exibidos na Figura 51, é possível notar um comportamento semelhante do parâmetro estatístico com o observado com os desvios padrão avaliados previamente, em ambas as escalas temporais avaliadas (diária e por campanha). Zonas de exposição do cabo ao ar apresentam elevadas amplitudes térmicas, uma vez que tais zonas tendem a apresentar comportamentos semelhantes ao da temperatura do ar. Valores de amplitude térmica inferiores aos da mediana deste parâmetro tendem a indicar zonas de interação com águas subterrâneas profundas e rasas. As águas profundas tendem a atenuar as variações de temperatura observadas na água superficial, resultando em amplitudes mais baixas. Já as águas rasas sofrem influência da temperatura do ar e carregam este sinal de temperatura para as misturas que ocorrem na zona hiporreica, o resulta em amplitudes ligeiramente mais altas das observadas em zonas de descarga de águas profundas. Zonas de baixa interação ou com tendência influente apresentam valores de amplitude próximos a média ou mediana das amostras apresentadas.

Considerando tais condições, a amplitude térmica dos pontos monitorados também pode ser utilizada como ferramenta para diferenciação das zonas de interação rio-aquífero, a partir da definição de faixas de variação de seus valores e da análise conjunta com os dados de temperatura média do período monitorado e dos desvios padrões observados. Observando a Figura 51, que apresenta os dados da campanha de Outono (2), nota-se que amplitudes térmicas, em escala diária, inferiores a 1°C configuram zonas de interação com águas profundas, enquanto zonas de interação com águas rasas apresentam amplitudes térmicas diárias entre 1 e 2 °C. Zonas com amplitudes diárias superiores à 2,5 °C indicaram zonas expostas ao ar. Em termos de campanha, amplitudes inferiores à 2,0 °C indicam zonas de água profunda, enquanto zonas de água rasa são encontradas no intervalo de 2,5 a 4,0 °C. Amplitudes superiores a 4,0 °C indicam

zonas de cabo exposto ao ar. Faixas semelhantes podem ser determinadas para as demais campanhas realizadas, a partir das imagens exibidas no Apêndice E e que serão discutidas em breve, ainda neste tópico.

Como comentado, algumas das amplitudes térmicas diárias apresentadas estão indicadas com asterisco, tanto na Figura 51 quanto nas demais imagens do Apêndice E, que apresentam tais resultados. Tais datas correspondem a períodos em que o monitoramento da temperatura não completou as 24 horas do referido dia, seja por se tratar de datas de início e término de campanhas de monitoramento, seja pela descontinuidade dos levantamentos, em virtude de falhas operacionais. Desta forma, em tais datas, é possível que os dados não tenham monitorado tanto os horários mais frios ou mais quentes do referido dia quanto os horários próximos, que permitam observar a resposta da temperatura do ar na temperatura da água. Assim, os valores de amplitude térmica podem apresentar resultados menores, em termos de valores médios, em relação a datas próximas. Um exemplo disto é o observado no dia 02 de maio de 2022 (Figura 51), no dia 28 de julho de 2021 (Figura E-9 – Apêndice E) ou no dia 29 de janeiro de 2021 (Figura E-11 – Apêndice E), em que os valores amplitude térmica diária apresentam valores inferiores aos demais dias da mesma campanha. Apesar de tal fato, é possível observar que a determinação da amplitude pode contribuir para a separação de zonas de interação rio-aquífero, em conjunto com a média das temperaturas em cada ponto monitorado e mesmo uma série de dados mais curta pode ser útil para este parâmetro.

Ao se avaliar as amplitudes térmicas em ambas as escalas temporais avaliadas, é possível avaliar uma relação direta entre as variações de temperatura da água e do ar, a partir da comparação dos dias monitorados ao longo das 24 horas. Dias com maiores amplitudes térmicas resultaram em maiores em maiores amplitudes térmicas nos pontos de monitoramento da temperatura da água, considerando o observado nos dias de monitoramento contínuo. Para datas com monitoramento descontínuo, tal conclusão não pode ser considerada, levando em conta a possível ausência de dados nos períodos mais quentes ou mais frios daquela data.

A partir de tais análises, é possível verificar que a amplitude térmica, tanto em escala diária quanto em escala campanha, é um parâmetro interessante para a identificação das zonas de interação rio-aquífero e para a diferenciação da origem dos fluxos. A observação das amplitudes, em conjunto com os valores de temperatura média e desvio padrão nos pontos monitorados ao longo da extensão da fibra ótica, favorece o melhor entendimento de como se comportam as zonas de interação, observadas a partir

do uso da temperatura como traçador. Adicionalmente, a comparação de valores de amplitude térmica deve considerar a continuidade no levantamento de dados, uma vez que os horários extremos de temperatura podem não ter sido monitorados, levando a diferenças nos resultados das amplitudes térmicas.

Por fim, a Tabela 3 e a Tabela 4 resumem, para os trechos de jusante e de montante respectivamente, os valores estatísticos importantes observados nas campanhas de monitoramento realizadas. Tais dados podem ser confirmados a partir da observação das imagens disponíveis no Apêndice E deste trabalho. São listados os valores de mediana, desvio padrão, amplitude térmica diária e amplitude térmica da campanha. Para os três últimos parâmetros, buscou-se indicar faixas de valores representativas das diferentes zonas identificadas: zonas de água profunda (ZAP ou GIZ: *groundwater inflow zones*), zonas de água rasa (ZAR ou HIZ: *hyporreic inflow zones*) e zonas de cabo exposto ao ar (CAE). Desta forma, é possível obter métricas iniciais de identificação da origem dos fluxos, a partir destes valores estatísticos.

Tabela 3 - Faixas de valores de desvio padrão e de amplitude térmica que separam as zonas de interação, a partir dos dados monitorados no trecho de jusante

Parâmetro Avaliado	Zona	Campanha de monitoramento					
		Outono (1) – mai/21	Inverno (1) – jul/21	Inverno (2) – jul/21	Primavera – dez/21	Verão – jan/22	Outono (2) – mai/22
Mediana (°C)	---	18,30	17,55	16,81	19,93	22,36	19,81
Desvio Padrão (°C)	ZAP	< 0,35	< 0,20	< 0,45	< 0,20	< 0,10	< 0,40
	ZAR	0,35 – 0,50	0,20 – 0,50	0,45 – 0,60	0,20 – 0,75	0,10 – 0,40	0,40 – 1,0
	CEA	> 0,50	> 0,55	> 0,60	> 0,75	> 0,40	> 1,0
Amplitude térmica diária (°C)	ZAP	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0
	ZAR	1,0 – 2,0	1,0 – 2,0	1,0 – 2,5	1,0 – 2,5	1,0 – 1,5	1,0 – 2,0
	CEA	> 2,0	> 2,0	> 3,0	> 3,0	> 2,0	> 2,5
Amplitude térmica da campanha (°C)	ZAP	< 1,5	< 2,0	< 6,0	< 2,0	< 1,0	< 2,0
	ZAR	2,0 – 2,5	2,0 – 3,0	6,5 – 8,0	2,0 – 3,0	1,0 – 2,0	2,5 – 4,0
	CEA	> 2,5	> 3,0	> 8,0	> 3,0	> 2,0	> 4,0

*zonas de água profunda (ZAP ou GIZ: *groundwater inflow zones*), zonas de água rasa (ZAR ou HIZ: *hyporreic inflow zones*) e zonas de cabo exposto ao ar (CAE)

Fonte: Autor (2023)

Tabela 4 - Faixas de valores de desvio padrão e de amplitude térmica que separam as zonas de interação, a partir dos dados monitorados no trecho de jusante

Parâmetro Avaliado	Zona	Campanha de monitoramento				
		Inverno (1) – jul/21	Inverno (2) – jul/21	Primavera – dez/21	Verão – jan/22	Outono (2) – mai/22
Mediana (°C)	---	17,72	17,09	20,76	22,35	19,90
Desvio Padrão (°C)	ZAP	< 0,20	< 0,45	< 0,20	< 0,10	< 0,40
	ZAR	0,20 – 0,50	0,45 – 0,60	0,20 – 0,75	0,10 – 0,40	0,40 – 1,0
	CEA	> 0,55	> 0,70	> 0,75	> 0,40	> 1,0
Amplitude térmica diária (°C)	ZAP	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0
	ZAR	1,0 – 2,0	1,0 – 2,5	1,0 – 2,5	1,0 – 1,5	1,0 – 2,0
	CEA	> 2,0	> 3,0	> 3,0	> 2,0	> 2,0
Amplitude térmica da campanha (°C)	ZAP	< 2,0	< 6,5	< 2,0	< 1,0	< 2,0
	ZAR	2,0 – 2,5	7,0 – 8,0	2,0 – 3,0	1,0 – 2,0	2,5 – 4,0
	CEA	> 2,5	> 8,5	> 3,5	> 2,0	> 4,0

*zonas de água profunda (ZAP ou GIZ: *groundwater inflow zones*), zonas de água rasa (ZAR ou HIZ: *hyporreic inflow zones*) e zonas de cabo exposto ao ar (CAE)

Fonte: Autor (2023)

Ao se observar os valores de mediana de ambos os trechos, nota-se que estes se encontram em uma mesma ordem de grandeza, mas apresentam pequenas diferenças em seus valores. A diferença no comprimento de fibra ótica de cada trecho e, por consequência, na quantidade de pontos amostrados; em conjunto com a influência de pontos expostos ao ar podem explicar estas diferenças.

Para os demais parâmetros, as diferenças nos valores obtidos em cada um dos trechos foram mínimas. Para o desvio padrão, é possível observar que as faixas de determinação das diferentes zonas caracterizadas apresentam variação de valores em cada uma das estações do ano, em virtude da sazonalidade das temperaturas do ar, e da sua influência na temperatura da água superficial. É importante reforçar que a temperatura da água monitorada pela fibra ótica é resultante da mistura entre as águas superficiais e água subterrânea, nos locais de interação definidos. Assim, mesmo em zonas de troca com águas profundas, é possível observar variação sazonal das temperaturas e por consequência dos parâmetros estatísticos. Valores de desvio padrão estabelecidos entre 0,20 e 0,40 °C podem ser considerados indicativos de zonas de interação com águas profundas, enquanto a faixa entre 0,40 e 1,0 °C são sugestivos de zonas de interação com águas rasas.

Para as amplitudes térmicas diárias, foi possível observar uma maior constância nos resultados, ao se comparar as diferentes estações do ano e as diferentes campanhas de monitoramento realizadas. Tal fato realça a possibilidade de uso deste parâmetro numérico como ferramenta de diferenciação da origem dos fluxos, podendo ser confrontado em estudos futuros, realizados em áreas tropicais. As zonas de interação com águas profundas foram caracterizadas por amplitudes térmicas diárias inferiores à 1,0 °C, enquanto às zonas de contato com águas rasas foram identificadas com amplitudes diárias variando entre 1,0 e 3,0 °C, com valores superiores da faixa variando em função da estação.

Ao se avaliar as amplitudes térmicas de campanha, foi possível notar que valores inferiores a 2,0° C podem indicar a ocorrência de zonas de águas profundas, enquanto a faixa entre 1,0 e 3,0 °C sugerem áreas de interação com águas rasas. É importante ressaltar que a determinação da amplitude térmica da campanha leva em conta os valores máximos e mínimos de temperatura observados em cada ponto monitorado, ao longo de todo o período da campanha. Tais valores não necessariamente ocorrem em um mesmo dia, o que leva a resultados de amplitude diferentes dos observados na escala diária. Além disso, é possível observar uma maior variabilidade destes valores nas campanhas realizadas durante a ocorrência de frente frias na área de estudo. Nas campanhas de Inverno (2) e Outono (2), foi possível observar faixas de valores de amplitude térmica de campanha mais elevados que as demais campanhas, em virtude da queda brusca de temperatura do ar, resultante do fenômeno meteorológico, que causou efeitos na temperatura da água.

7.2.3 Conclusões

A partir da observação das temperaturas médias, dos desvios padrão e das amplitudes térmicas em cada um dos pontos monitorados ao longo do comprimento longitudinal do rio, foi possível estabelecer a diferenciação da origem dos fluxos de água subterrânea, de áreas com tendência influente ou de baixa interação, assim como áreas de exposição do cabo ao ar. Os parâmetros estatísticos observados se mostraram consistentes ao longo das diferentes estações do ano, permitindo o bom aproveitamento da temperatura como traçador natural na identificação e caracterização da interação rio-aquífero, mesmo em períodos que o contraste entre a temperatura da água de diferentes origens é reduzido. Métricas iniciais para tais parâmetros, visando a classificação dos fluxos, foram definidas, e poderão ser confrontadas em estudos futuros, que utilizem a temperatura como traçador em áreas tropicais.

Considerando a mediana das temperaturas médias como parâmetro inicial de diferenciação entre as zonas de troca de águas subterrâneas e zonas de cabo exposto ao ar, chama-se a atenção para a influência da presença de afluentes na temperatura média dos cursos principais, que podem resultar em valores inferiores à mediana das temperaturas médias de todo o trecho monitorado. Neste caso, se apoiar nos resultados de desvio padrão é interessante para evitar possíveis erros na classificação das áreas. Adicionalmente, ressalta-se a influência de possíveis descontinuidades nos dados monitorados na determinação das amplitudes térmicas diárias, considerando possíveis faltas de dados de horários de temperatura extrema (máximas ou mínimas). Para campanhas realizadas durante a ocorrência de fenômenos meteorológicos pontuais, como a passagem de frentes frias, as amplitudes térmicas em escala de campanha podem apresentar valores mais elevados, em virtude das variações bruscas da temperatura do ar e seus efeitos na temperatura da água superficial. Apesar destas condições, a diferenciação das zonas de interação rio-aquífero continua consistente, favorecendo o uso destes parâmetros.

7.3 Correlação cruzada

7.3.1 Contextualização e metodologia

O termo correlação pode ser entendido como uma medida estatística que quantifica a relação e/ou associação entre duas ou mais variáveis. Seu resultado indica o quão as variáveis podem mudar ou variar juntas, fornecendo assim uma percepção de sua interdependência. É importante mencionar que a correlação não deve confundida com causalidade, ou seja, seu resultado não implica em uma relação causa-efeito, mostrando apenas uma associação entre as variáveis envolvidas.

A correlação cruzada é uma operação matemática que busca identificar a similaridade entre dois sinais ou sequências numéricas, em função de deslocamento relativo (*lag* ou *shift*) entre elas. Tal operação é comumente usada no processamento de sinais, processamento de imagens e em algoritmos de reconhecimento de padrões, como forma de analisar a relação entre variáveis, em que levar em conta a dependência temporal é importante.

Considerando duas sequências, representadas por $x(n)$ e $y(n)$, a correlação cruzada é calculada a partir do deslizamento de um sinal sobre o outro e do cálculo da soma dos produtos dos elementos que ocupam a mesma posição na sequência (Equação 2):

$$C(i) = \sum (x(j) \times y(j + i)) \quad (2)$$

Onde:

$C(i)$: é a correlação cruzada, para um deslocamento relativo (*lag*) i de posições da série $y(n)$ e $x(n)$.

$x(j)$ e $y(j + i)$: elementos das duas séries, nas posições j e $j + i$, respectivamente.

O resultado da Equação 2 é um valor numérico indicativo da similaridade entre os sinais avaliados, para o *lag* i definido. Valores positivos indicam uma correlação positiva ou similaridade, enquanto valores negativos indicam uma anti-correlação ou dissimilaridade. Já valores próximos a zero sugerem não haver correlação entre as séries. O cálculo de C para múltiplos deslocamentos relativos resulta em uma série de valores de correlação.

O número de deslocamentos relativos é dependente do tamanho das séries. O máximo *lag* é geralmente definido pelo tamanho da menor das duas séries analisadas, a fim de garantir cálculos válidos para os coeficientes. Por exemplo, se duas séries tem

comprimento igual a n , os deslocamentos relativos vão partir de $-n + 1$ a $n - 1$, cobrindo um número total de $2n - 1$ deslocamentos. Este número é distribuído de forma simétrica, em torno no *lag* igual a zero, que representa a análise da correlação entre as séries, sem que haja deslocamento relativo entre elas. Valores positivos de *lags* indicam que o uso de valores futuros da segunda série em relação a primeira, enquanto valores negativos indicam o uso de valores passados da segunda série em relação a primeira, no momento do cálculo da correlação.

O resultado da correlação cruzada também pode ser apresentado de forma normalizada (Equação 3), estabelecendo uma variação dos coeficientes de correlação entre -1 e +1 e facilitando as comparações entre diferentes séries e deslocamentos relativos.

$$\rho(i) = \frac{C(i)}{\sqrt{R_{xx} \times R_{yy}}} \quad (3)$$

Onde:

$\rho(i)$: coeficiente de correlação cruzada, para um deslocamento relativo i .

$C(i)$: valor da correlação cruzada, para um deslocamento relativo i .

R_{xx} : valor da autocorrelação para a primeira série de dados;

R_{yy} : valor da autocorrelação para a segunda série de dados.

Assim, valores de $\rho(i)$ próximos a +1 são indicativos de uma correlação positiva entre os sinais avaliados, indicando similaridade para aquele deslocamento relativo considerado. Valores próximos a -1 são indicativos de uma correlação negativa, indicando comportamento inverso entre as séries, no lag avaliado. Valores próximos a zero indicam não haver correlação significativa entre os sinais.

Considerando tais equações, os resultados de interesse, ao se utilizar a correlação cruzada, são os valores do coeficiente de correlação, já normalizados, em conjunto com os valores de deslocamento relativo que resultam nos maiores coeficientes. Desta forma, é possível analisar a correspondência entre as séries, de forma comparativa, levando em conta o aspecto temporal.

Ao se avaliar os dados de temperatura do ar e da água, a partir das metodologias já apresentadas nesta tese, é possível observar uma influência direta das condições ambientais no comportamento médio da temperatura do rio, o que gera uma expectativa de valores positivos para os coeficientes de correlação cruzada. Em outras palavras, a

temperatura da água apresenta similaridade à temperatura do ar, a partir de um deslocamento relativo da série temporal. Porém, em zonas de interação, esta correlação pode ser afetada, considerando a descarga de água subterrânea no meio superficial e o consequente transporte de calor por ela promovido. Assim, propõe-se a aplicação da correlação cruzada a fim de distinguir, em termos quantitativos, as zonas de interação em relação aos trechos de menor troca com a água subterrânea. Adicionalmente, busca-se classificar a origem dos fluxos (água profunda e água rasa), a partir da observação das faixas de valores observadas, tanto para os coeficientes de correlação quanto para os deslocamentos relativos obtidos nas comparações entre séries de temperatura da água e do ar.

Desta forma, foram calculados os coeficientes de correlação e os deslocamentos relativos para todos os pontos de temperatura da água, monitorados pela fibra ótica, em comparação com os dados de temperatura do ar, monitorados na Estação Monte Alegre (ver capítulo 3). Após este cálculo, foram observados os valores máximos dos coeficientes, em conjunto com o seu respectivo valor de *lag*. Tais valores serão utilizados para a comparação entre os pontos monitorados, ao longo do cabo de fibra ótica, visando distinguir o comportamento das diferentes zonas de interação rio-aquífero.

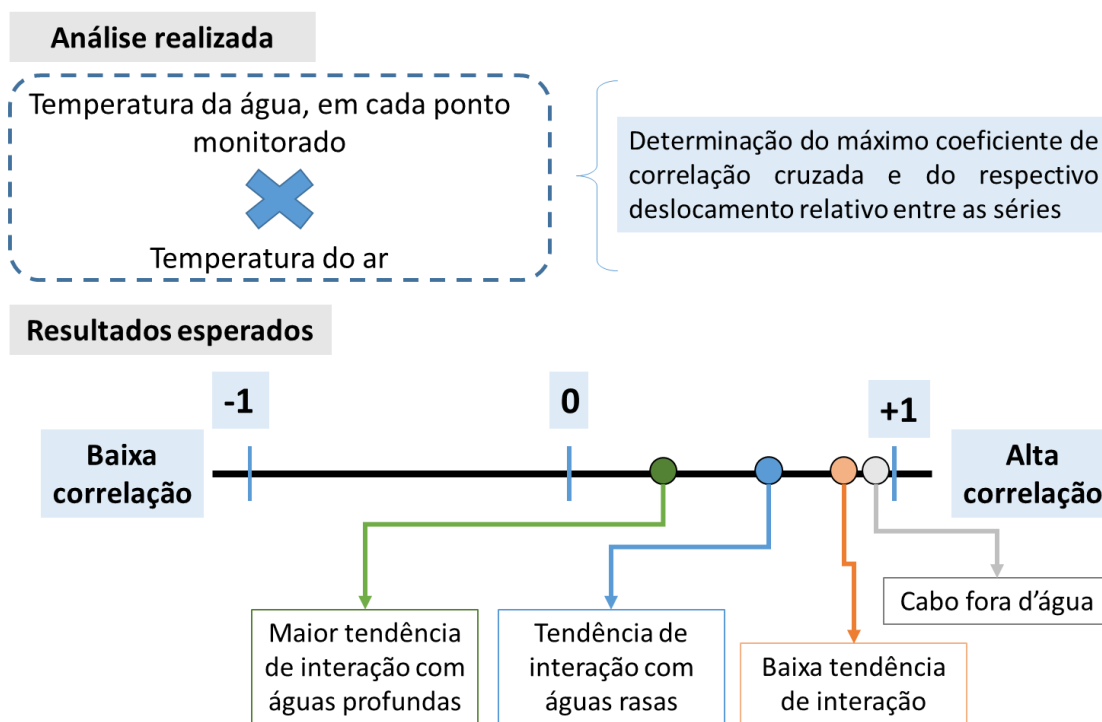
Para a determinação dos coeficientes de correlação, ambas as séries de temperatura da água e do ar foram colocadas no mesmo intervalo temporal, de 10 em 10 minutos, considerando o intervalo de amostragem da estação meteorológica. Os dados de temperatura da água foram aproximados a tal intervalo, por meio de métodos de preenchimento de dados, utilizando o dado mais próximo daquele horário, considerando que não há variações bruscas de temperatura na água.

Todas estas operações foram realizadas a partir da implementação de uma rotina computacional, em linguagem Python. A análise foi realizada para todas as campanhas de monitoramento realizadas, a exceção da campanha de Outono (1), em virtude da extensão curta dos dados de temperatura da água monitorados. Para as campanhas de Inverno (1) e Inverno (2), em que houveram descontinuidades na série de dados monitorada, a análise da correlação cruzada foi realizada para os períodos mais longos, entre 05 e 06 de julho de 2021 (31 horas de duração) e entre 29 e 30 de julho de 2021 (28 horas de duração), respectivamente. Já para as campanhas de Primavera, Verão e Outono (2), toda a extensão de dados monitorada foi utilizada.

A Figura 52 resume as análises realizadas e os resultados esperados, a partir do uso da correlação cruzada nas séries de temperatura da água e do ar. Estima-se que todas

as zonas de interação apresentem correlação positiva, ao se comparar as duas séries de temperatura. As zonas de cabo exposto ao ar (CAE) tendem a apresentar coeficientes de correlação elevados, próximos a 1, considerando que as temperaturas observadas nestas zonas são próximas a temperatura ambiente e tendem a acompanhar as suas variações. De forma intermediária, as zonas de baixa interação ou tendência influente tendem a apresentar valores elevados mais inferiores aos observados nas zonas fora d'água. Zonas de água rasa e zonas de água profunda devem apresentar menores valores de coeficiente de correlação, uma vez que a temperatura da água é afetada pela temperatura da água subterrânea descarregada.

Figura 52 - Resumo das análises realizadas e dos resultados esperados para a utilização da correlação cruzada, em dados de temperatura da água e do ar



Fonte: Autor (2023)

Adicionalmente à determinação dos coeficientes de correlação máximos e dos respectivos deslocamentos relativos (*lags*), a implementação desta metodologia permite a comparação de dados entre diferentes estações do ano, considerando a disponibilidade de dados monitorados no contexto desta pesquisa. Desta forma, é possível consolidar a aplicabilidade deste parâmetro numérico como ferramenta de separação das zonas de interação, em diferentes condições ambientais, com o suporte das demais metodologias de análise utilizadas.

7.3.2 Resultados

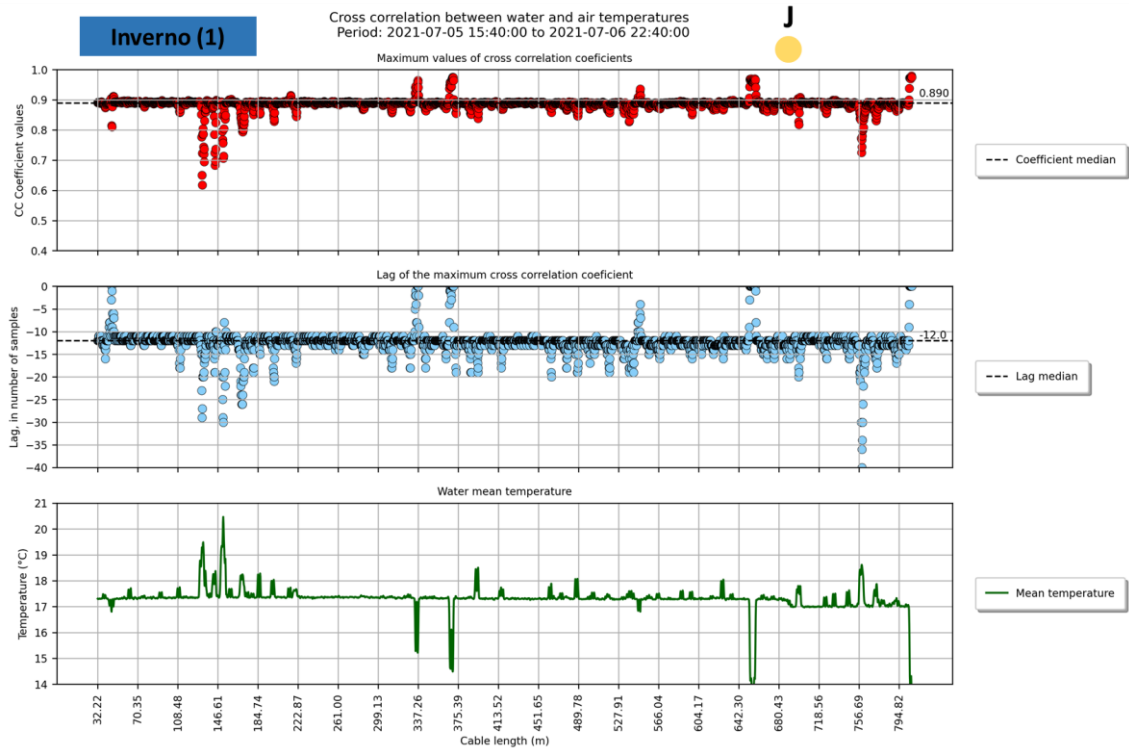
A Figura 53 apresenta os resultados da aplicação da correlação cruzada aos dados de temperatura monitorados nas campanhas de Inverno (1) e de Verão, apenas para o trecho de jusante. Figuras semelhantes foram produzidas para as demais campanhas analisadas, tanto para o trecho de montante quanto para o trecho de jusante, e são apresentadas no Apêndice F deste texto. Tais imagens são divididas em três quadros. O quadro superior apresenta os valores máximos dos coeficientes de correlação cruzada observados ao se comparar a temperatura da água e a temperatura do ar, no período de análise. Já o quadro central apresenta os valores de deslocamento relativo entre as amostras, correspondente ao maior coeficiente de correlação. Tais valores são exibidos em número de amostras e seus sinais negativos indicam a necessidade atraso dos sinais de temperatura da água para se alinharem à temperatura ambiente. O quadro inferior exibe a temperatura média da água, em cada um dos pontos avaliados, permitindo a observação direta das anomalias de temperatura indicativas das diferentes zonas de interação, em conjunto com os resultados da metodologia de avaliação proposta

Ao se observar a referida figura, é possível observar a correspondência entre os menores coeficientes de correlação cruzada com as regiões de maiores anomalias de temperatura, representadas pelos picos na estação de Inverno (1) e pelos vales na estação de Verão, considerando a alteração na forma de detecção das zonas de interação nestas estações. Tal fato confirma a expectativa de redução na correlação entre as temperaturas da água, nas zonas de interação com águas profundas (ZAP), onde ocorrem as maiores diferenças de temperatura; e a temperatura ambiente. Valores de coeficiente de correlação máxima inferiores à 0,70, na campanha de Inverno (1), e inferiores à 0,40, na campanha de Verão são observados nestas regiões.

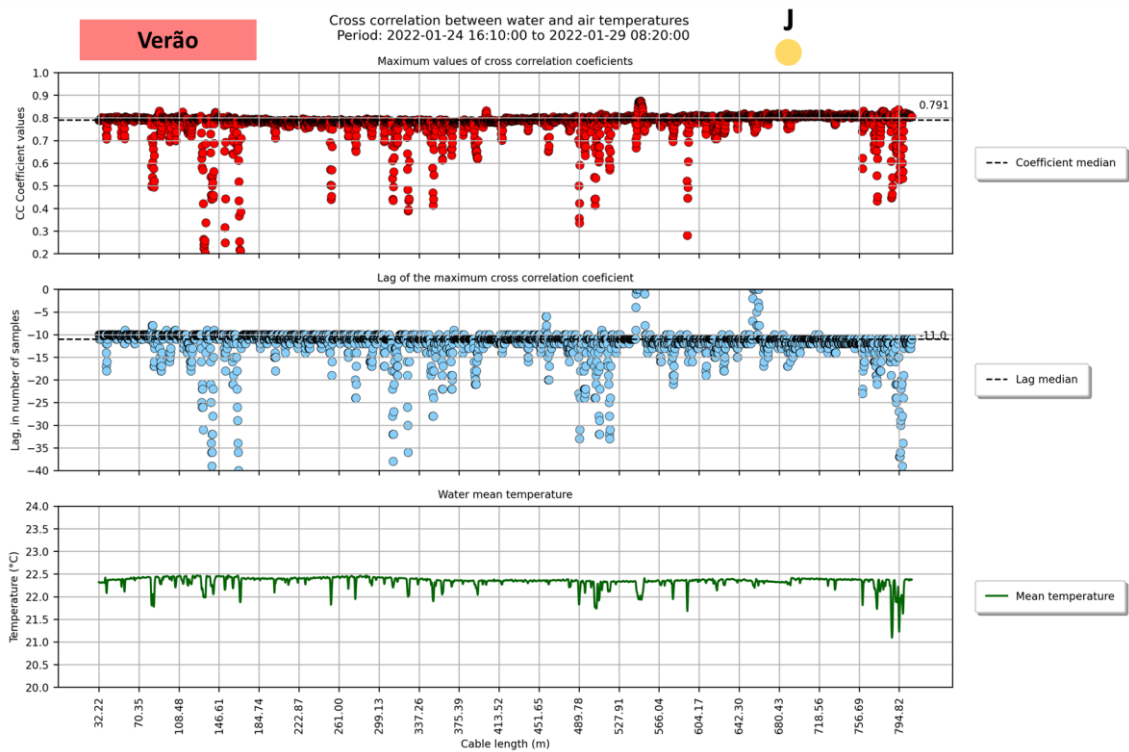
Concomitantemente, tais zonas (ZAPs) apresentam os maiores valores de deslocamento relativos, em módulo. Lembra-se que o sinal negativo é apenas indicativo da necessidade de atrasar o sinal de temperatura da água, para encontrar a maior correlação com o sinal de temperatura ambiente. Valores de atraso superiores a 20 amostras são necessários na campanha de Inverno (1), enquanto deslocamentos relativos superiores à 30 amostras são observadas na campanha de Verão, para obtenção dos maiores coeficientes de correlação entre estes sinais. Considerando o intervalo de amostragem de 10 minutos, o que resulta no levantamento de 6 dados de temperatura a cada hora, tais deslocamentos resultam em uma defasagem de aproximadamente 3,3 h e 5h, respectivamente.

Figura 53 - Correlação cruzada para a campanha de (a) Inverno (1) e (b) Verão, para o trecho de jusante

(a)



(b)



Fonte: Autor (2023)

As zonas de interação com as águas rasas (ZAR) são caracterizadas a partir da ocorrência de valores máximos de correlação cruzada inferiores à mediana do conjunto de valores observado ao longo do comprimento monitorado (Figura 53). Em tais zonas, também são observadas anomalias na temperatura média, de menor grau, com picos e vales menores em relação à temperatura média do rio. Para a campanha de Inverno (1), as ZAR apresentam valores de coeficiente de correlação entre 0,70 e 0,89, enquanto os a campanha de Verão apresenta valores entre 0,40 e 0,80. Ao se observar os deslocamentos relativos para obtenção da máxima correlação, também se observa a mesma tendência de ocorrência de valores intermediários entre a mediana e a os valores mais extremos deste parâmetro. Na estação invernal, deslocamentos entre 12 e 20 amostras (2 a 3,3h de defasagem) correspondem a tais zonas, enquanto a estação veranil, foram observados deslocamentos entre 11 e 30 amostras (1,8 a 5h de defasagem).

Zonas com temperatura média estável, sem a presença notável de anomalias, indicam regiões com baixa tendência de interação ou tendência influente e, quando avaliadas a partir dos resultados da análise de correlação cruzada, correspondem a pontos cujos valores de coeficiente se aproximam da mediana do conjunto de dados observados, em ambas as campanhas apresentadas na Figura 53. Enquanto a mediana dos dados monitorados na campanha de Inverno (1) resultou em 0,890, a mediana da campanha de Verão resultou em 0,791. Sistemáticamente, a aproximação dos resultados observados para os deslocamentos relativos também se aproxima das medianas dos conjuntos de dados avaliados. Nota-se que os valores observados em ambas as estações foram muito próximos, o que indica a similaridade praticamente estável entre a temperatura da água em tais zonas e a temperatura ambiente.

Zonas de cabo exposto ao ar (CAE) são caracterizadas por temperaturas baixas, inferiores à temperatura média da água, especialmente na campanha de Inverno (1). Por reproduzirem parcialmente o comportamento das temperaturas do ar, tais zonas apresentam elevados valores máximos de coeficiente de correlação cruzada, próximos a 1, confirmando a similaridade entre as temperaturas observadas pela fibra ótica fora d'água e pela estação meteorológica. Adicionalmente, tais zonas demandam um deslocamento relativo pequeno entre as amostras, inferior a 10, para a obtenção das maiores correlações. Considerando tais zonas, fica evidente pela Figura 53 a possibilidade de alteração no comportamento das zonas expostas ao ar, em virtude do aumento do nível d'água em estações chuvosas, o que resulta na alteração dos resultados observados para os parâmetros de correlação cruzada.

As observações realizadas para as estações de Inverno (1) e Verão (Figura 53) se repetem sistematicamente para as demais campanhas de monitoramento realizadas, assim como para os dados monitorados no trecho de montante. A visualização destas ocorrências pode ser feita nas figuras semelhantes apresentadas no Apêndice F. A partir da observação deste material suplementar, a Tabela 5 resume as faixas de valores observados para os máximos coeficientes de correlação cruzada e respectivos deslocamentos relativos, em cada uma das zonas de interação caracterizadas, em cada uma das campanhas e para cada um dos trechos de monitoramento.

Tabela 5 - Faixas de valores observados para o coeficiente de correlação relativa máxima e o respectivo deslocamento relativo das séries, em cada uma das zonas de interação, em cada uma das campanhas de monitoramento realizadas

(a) trecho de jusante

		Campanha de monitoramento				
Parâmetro Avaliado	Zona	Inverno (1) – jul/21	Inverno (2) – jul/21	Primavera – dez/21	Verão – jan/22	Outono (2) – mai/22
Coeficiente de correlação cruzada	Mediana	0,890	0,932	0,872	0,791	0,845
	ZAP	< 0,70	< 0,80	< 0,70	< 0,40	< 0,70
	ZAR	0,70 – 0,89	0,80 – 0,93	0,70 – 0,87	0,40 – 0,79	0,70 – 0,84
	CEA	> 0,890	> 0,932	> 0,872	> 0,791	> 0,845
Deslocamento relativo	Mediana	-12	-16	-11	-11	-16
	ZAP	< -20	< -25	< -25	< -30	< -30
	ZAR	-12 a -20	-16 a -25	-11 a -25	-11 a -30	-16 a -30
	CEA	0 a -12	0 a -16	0 a -11	0 a -11	0 a -16

(b) trecho de montante

		Campanha de monitoramento				
Parâmetro Avaliado	Zona	Inverno (1) – jul/21	Inverno (2) – jul/21	Primavera – dez/21	Verão – jan/22	Outono (2) – mai/22
Coeficiente de correlação cruzada	Mediana	0,894	0,932	0,879	0,833	0,853
	ZAP	< 0,75	< 0,80	< 0,60	< 0,40	< 0,70
	ZAR	0,75 – 0,89	0,80 – 0,93	0,60 – 0,87	0,40 – 0,83	0,70 – 0,85
	CEA	> 0,894	> 0,932	> 0,879	> 0,83	> 0,853
Deslocamento relativo	Mediana	-11	-15	-9	-11	-15
	ZAP	< -20	< -20	< -25	< -25	< -25
	ZAR	-11 a -20	-15 a -20	-9 a -25	-11 a -25	-15 a -25
	CEA	0 a -11	0 a -15	0 a -9	0 a -11	0 a -15

*zonas de água profunda (ZAP ou GIZ: *groundwater inflow zones*), zonas de água rasa (ZAR ou HIZ: *hyporreic inflow zones*) e zonas de cabo exposto ao ar (CAE)

Fonte: Autor (2023)

Considerando todas as campanhas de monitoramento realizadas, nota-se que os máximos coeficientes de correlação, em todo o comprimento de rio monitorado, apresentam valores superiores a 0,2, indicando uma correlação cruzada positiva entre as séries de temperatura da água e do ar, confirmando a associação entre estas variáveis. A descarga de água subterrânea e o conseqüente transporte de calor por advecção altera as temperaturas nas zonas de interação e afetam os valores resultantes dos coeficientes de correlação, permitindo a identificação e a separação das zonas de diferentes comportamentos.

Ao se observar os valores de mediana dos conjuntos de dados de máximos coeficientes de correlação (Tabela 5), observados em cada uma das campanhas de monitoramento, é possível notar valores superiores à 0,84 em quase todas as estações. A estação de Verão apresentou um valor inferior (0,79 para o trecho de jusante e 0,83 para o trecho de montante). Considerando o conjunto de dados desta estação, em contraponto aos dados inverniais (vide Figura 53), a ocorrência de um maior número de zonas de interação neste período, em virtude da ocorrência dos maiores volumes de chuva na área de estudo, o conseqüente aumento nos níveis freáticos da bacia e a descarga de águas subterrâneas rasas no meio superficial, leva ao aparecimento de áreas com coeficientes de correlação menores, o que resulta na redução da mediana observada. Complementarmente, a estação de Verão apresentou a maior dispersão dos valores de coeficientes de correlação. A definição das zonas de águas profundas é feita para valores inferiores à 0,40, enquanto nas demais estações, o limiar de separação destas zonas fica em torno de 0,60-0,70.

Para os deslocamentos relativos aplicados nas séries, nota-se que os resultados foram consistentes e semelhantes para todas as campanhas realizadas. De uma forma geral, deslocamentos relativos inferiores a 10 amostras foram indicativos de zonas de cabo exposto ao ar, enquanto deslocamentos entre 11 e 20 amostras foram indicativos de regiões de descarga de águas rasas. Deslocamentos relativos superiores à 20 amostras se correlacionaram com anomalias consistentes nas temperaturas médias da água, indicando o contato com águas profundas. Tais valores podem ser indicados como faixas de referência inicial deste parâmetro para delimitação das diferentes zonas de interação.

As campanhas de Inverno (2) e Outono (2) apresentaram maiores valores (em módulo) de mediana dos deslocamentos relativos, que os diferenciaram das observações deste parâmetro, em relação às demais estações. Lembra-se que tais campanhas têm em comum o fato de coincidirem com períodos de efeito de frentes frias sobre a área de

estudo, que levaram à queda brusca das temperaturas do ar nestes períodos. Considerando a capacidade térmica da água, de valor mais elevado do que a do meio atmosférico, a redução da sua temperatura é mais lenta da observada no ar, o que resulta em uma maior defasagem entre as séries e um maior valor de deslocamento relativo, para obtenção das maiores correlações cruzadas. Para os demais períodos avaliados, onde foi possível observar uma tendência estacionária nas temperaturas médias do ar, os deslocamentos relativos observados foram semelhantes nas diferentes estações.

Ainda observando os resultados exibidos na Tabela 5, nota-se uma pequena variação nos valores obtidos em cada um dos trechos monitorados. As maiores diferenças são observadas na campanha de Verão, enquanto nas demais campanhas, as diferenças são mínimas. A diferença na quantidade de pontos monitorado em cada um dos trechos, resultante da diferença no comprimento de fibra empregado; e a ocorrência de um maior número de zonas de interação, especialmente de descarga de águas rasas, levam a tais diferenças. Porém, a identificação e a separação do comportamento das zonas não é prejudicado, com as observações sendo coincidentes para ambos os trechos, em todas as campanhas de monitoramento realizadas.

É importante observar que foi preciso escolher os valores máximos dos coeficientes, obtidos a partir da correlação cruzada das séries, uma vez que para cada deslocamento relativo, um resultado de coeficiente pode ser calculado. Neste sentido, os valores dos coeficientes podem variar bastante, a depender da defasagem utilizada na análise. Considera-se aqui que a forma de análise escolhida se mostrou coerente com o comportamento observado das séries de temperatura, que apresentam qualitativamente associadas, com uma dependência temporal. Adicionalmente, a visualização das faixas de valores de coeficientes e deslocamentos permite a separação das zonas de interação, com o uso da temperatura como traçador, nas diferentes condições climáticas.

Adicionalmente, destaca-se que o tamanho das séries temporais de temperatura da água e do ar, utilizadas na aplicação da correlação cruzada, foi superior a 28 horas nas análises realizadas. A série de dados mais longa nesta análise corresponde à campanha de Verão, com cerca de 112 horas contínuas de monitoramento. A utilização de séries mais longas é interessante para a aplicação da correlação cruzada e a determinação do valor máximo de seu coeficiente, uma vez que é possível avaliar um maior número de cenários, a partir da variação do deslocamento relativo, que é diretamente dependente do tamanho das séries temporais a serem cruzadas. Neste sentido, recomenda-se a utilização de séries com mais de 24 horas de duração para esta metodologia.

7.3.3 Conclusões

A correlação cruzada é uma ferramenta matemática interessante para a identificação da similaridade e da associação entre duas séries temporais. Sua aplicação para análise conjunta das temperaturas da água e as temperaturas do ar se mostrou viável para auxiliar na identificação das diferentes zonas de interação rio-aquífero. A partir da determinação do coeficiente de correlação cruzada máximo e do respectivo deslocamento relativo aplicado a uma das séries, foi possível observar faixas de valores indicativas de diferentes comportamentos dos sinais de temperatura da água, em relação ao meio atmosférico, que permitem inferir a profundidade de origem da água subterrânea descarregada. Os resultados observados foram consistentes em todas as estações do ano monitoradas, mesmo com a variação sazonal das temperaturas em ambos os meios. Mesmo em períodos de pouco contraste entre as temperaturas da água superficial e da água subterrânea, ambos os parâmetros de análise permitem a detecção das diferentes zonas. Realça-se a possível influência de regiões de interação efêmeras, decorrentes da estação chuvosa; e o efeito das frentes frias na temperatura do ar e na sua associação com a temperatura da água; que podem levar alterações pontuais nas faixas de valores observadas. O uso de séries contínuas mais longas também é incentivado, ao possibilitar a verificação de diferentes cenários de correlação, a partir da variação dos deslocamentos relativos.

7.4 Razão entre as amplitudes e tempo de retardamento (*lag-time*) entre os sinais de temperatura

7.4.1 Contextualização e metodologia

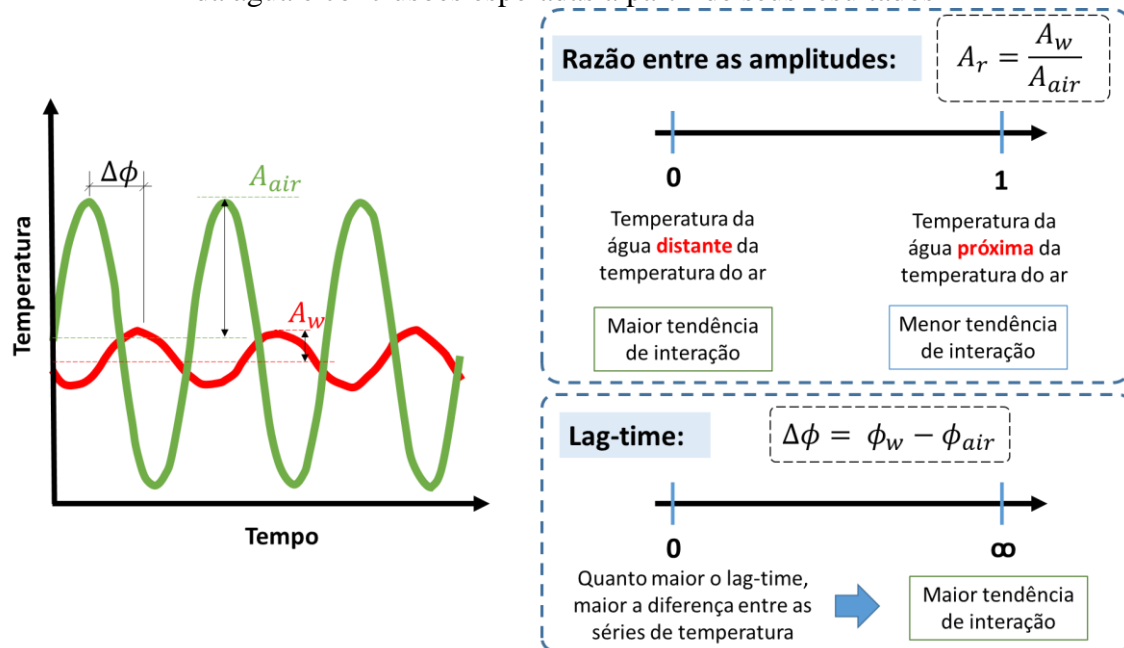
A análise conjunta das temperaturas da água e do ar é uma estratégia interessante para diferenciação dos fluxos de água subterrânea que contribuem aos rios, mas ainda pouco utilizada e sistematizada no contexto dos estudos de interação rio-aquífero, de fluxos na zona hiporreica e de caracterização da dinâmica da temperatura da água a nível de bacias hidrográficas (BRIGGS et al., 2018; JOHNSON et al., 2020). Como já comentado anteriormente, o sinal de temperatura de águas mais profundas sofre menor influência das variações de temperatura do ar, especialmente quando analisado em escalas de tempo de curto-prazo (escalas horárias, diárias, semanais ou mensais). Já nas regiões de fluxo de zona hiporreica, a mistura constante de águas superficiais e subterrâneas, que infiltram no meio subterrâneo e descarregam no meio superficial, resulta em sinais de temperatura com maiores variações, mesmo em curtos intervalos de tempo.

A fim de caracterizar tais variações, duas grandezas podem ser interessantes para a diferenciação deste comportamento: a razão entre as amplitudes dos sinais de temperatura do ar da água (*amplitude ratio*, A_r) e o tempo de retardamento entre os sinais (*lag-time* ou *phase-lag*, $\Delta\phi$). Tais grandezas são ilustradas na Figura 54 e são comumente obtidas a partir do ajuste das temperaturas a funções senoidais, levando em conta as variações sazonais da temperatura, a depender da escala temporal de análise (diária ou anual). A razão entre as amplitudes consiste na divisão entre a amplitude do sinal de temperatura da água e a amplitude do sinal de temperatura do ar. Tal relação é adimensional e indicativa da semelhança dos sinais de temperatura observados em cada ambiente. Geralmente, resulta em valores no intervalo entre 0 e 1, considerando que os picos de temperatura da água tendem a ser menores que os picos de temperatura do ar, em virtude das diferenças de capacidade térmica de ambos os meios. Já o *lag-time* é dado pelo intervalo de tempo de ocorrência entre os picos de temperatura de ambos os sinais de temperatura. Tal valor tende a ser positivo, ao se considerar que o pico de temperatura da água é posterior ao pico de temperatura ambiente. Quanto maior o *lag-time*, maior o atraso do sinal de temperatura da água em relação a temperatura ambiente.

Observando o comportamento de tais parâmetros e a ocorrência de fluxos na zona hiporreica, é possível estabelecer diferenças entre os diversos pontos de monitoramento de temperatura, ao longo do comprimento longitudinal do rio. Em zonas de descarga de água subterrânea (zonas efluentes), as frentes de transporte de calor, oriundas do ambiente

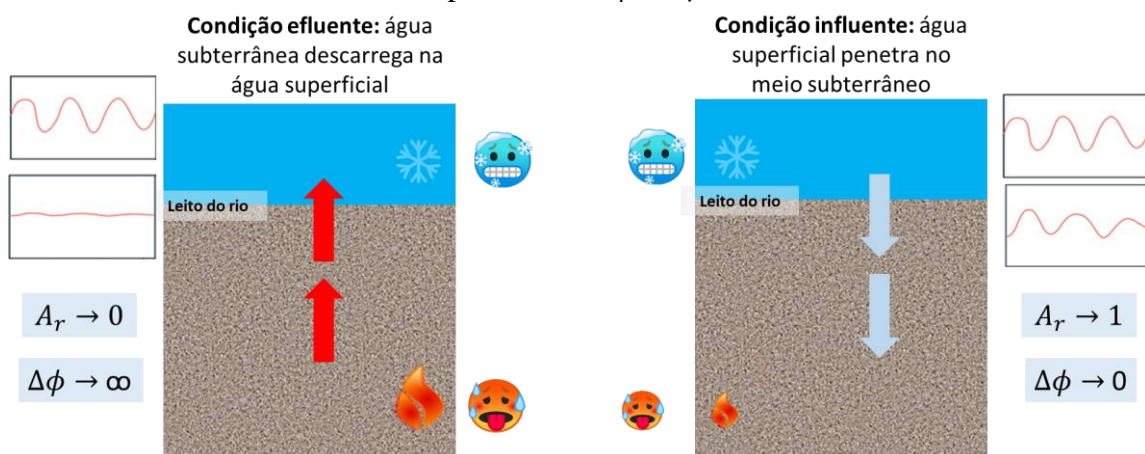
externo e do meio subterrâneo atuam em sentidos opostos. Enquanto o calor fornecido pelo ambiente tem uma tendência de penetração em profundidade, pelo mecanismo de condução, o calor transportado pela água subterrânea descarregada, pelo mecanismo de advecção, impede este avanço (Figura 55).

Figura 54 - Grandezas de interesse na análise conjunta dos sinais de temperatura do ar e da água e conclusões esperadas a partir de seus resultados



Fonte: Autor (2023)

Figura 55 - Relação entre a condição de interação rio-aquífero, sinais de temperatura e parâmetros A_r e $\Delta\phi$



Fonte: Autor (2023)

Desta forma, o sinal de temperatura da água é modificado nas zonas de interação, se diferenciando de outras zonas sem tal troca, alterando os valores da razão entre as amplitudes e de *lag-time*. Estima-se uma redução nos valores de A_r , em virtude da

redução da semelhança entre os sinais de temperatura do ar e da água, considerando a influência do calor transportado pela água subterrânea descarregada. Analogamente, os valores de $\Delta\phi$ tendem a aumentar, considerando a oposição entre os mecanismos de transporte de calor nas zonas de descarga. O uso conjunto de ambos os parâmetros e a análise da variação de seus valores podem ser indicativos do tipo de fluxo e da origem da água subterrânea descarregada.

Trabalhos recentes utilizaram a análise dos dois parâmetros para a classificação de bacias hidrográficas americanas (BRIGGS et al., 2018; JOHNSON et al., 2020; HARE et al., 2021; HARE et al., 2023), considerando que a variação da profundidade da água subterrânea tem influência direta na qualidade da água e no regime termal das águas superficiais. Tais trabalhos utilizaram dados médios diários de temperatura da água, medidos pontualmente, nos exutórios das bacias. Tais dados foram ajustados em curvas senoidais anuais, para determinação dos parâmetros A_r e $\Delta\phi$, em conjunto com os dados de temperatura do ar. Na maioria das bacias avaliadas pelos autores, a disponibilidade de dados era superior a 30 anos, característica favorável decorrente do monitoramento contínuo realizado nas bacias americanas.

As bacias foram classificadas em três terminologias, em função dos valores de A_r e $\Delta\phi$, determinantes da assinatura carregada pela água subterrânea e a sua influência no meio superficial (BRIGGS et al., 2018; JOHNSON et al., 2020; HARE et al., 2021; HARE et al., 2023):

- *deep signature*: profunda, indicativa de água oriundas de profundidades superiores a 6 metros, caracterizadas por $A_r < 0,65$ e $\Delta\phi < 10$ dias;
- *shallow signature*: águas rasas, oriundas de fluxo de zona hiporreica, caracterizadas por $\Delta\phi > 10$ dias;
- *atmospheric signature*: águas de locais com baixa interação rio-aquífero, caracterizadas por $A_r > 0,65$ e $\Delta\phi < 10$ dias;

Esta classificação foi cruzada com os valores de *base-flow index* (BFI) e outras propriedades das áreas de drenagem, a fim de confirmar a interação com as águas subterrâneas naquela bacia. Os autores realçam que a classificação entre fluxos de água profunda e rasa não é mutualmente exclusiva, uma vez que um espectro de fluxos de diferentes profundidades pode contribuir ao escoamento superficial e é interessante buscar qual é o fluxo predominante. Nota-se que para os valores de A_r , a tendência observada pelos autores é semelhante daquela esperada neste trabalho, com valores

baixos para fluxos profundos e valores elevados para fluxos rasos ou atmosféricos. Porém, ao se avaliar o *lag-time* a tendência observada foi diferente, com valores de $\Delta\phi$ baixos para águas profundas, indicando que os sinais de temperatura de água e ar estariam em fase nestas condições. O uso de dados médios diários e análise em escala anual levaram a ocorrência do alinhamento dos sinais de temperatura analisados (BRIGGS et al., 2018; JOHNSON et al., 2020; HARE et al., 2021; HARE et al., 2023).

Tais autores realçam a necessidade de estudos adicionais, utilizando dados de temperatura da água e do ar e determinando os parâmetros de relação entre tais sinais, considerando ambientes com diferentes características climáticas e também diferentes escalas temporais (BRIGGS et al., 2018; JOHNSON et al., 2020; HARE et al., 2021; HARE et al., 2023). O uso de tal metodologia, com dados de medição distribuída de temperatura, ainda não foi observado na literatura, ao que se tem conhecimento. Considerando tais indicações e a possibilidade de uso de tais parâmetros na classificação dos fluxos, objetivo central desta tese, o uso da razão entre as amplitudes e do *lag-time* se mostraram interessantes para contribuir ao melhor conhecimento da interação rio-aquífero, com o uso da temperatura como traçador.

Para esta análise, foram implementadas rotinas computacionais na linguagem Python, a fim de organizar e explorar os dados e gerar gráficos com os resultados. Inicialmente, os dados das campanhas de temperatura foram prioritariamente divididos em períodos de 24 horas de medição contínua. Por não dispor de dados com esta continuidade, a campanha de Outono (1) não foi considerada nesta análise. Para fins de exibição e discussão neste texto, foram selecionados períodos específicos em cada campanha, que são listados na Tabela 6 e que contemplam um ciclo diurno completo. Nas campanhas de Inverno, os horários de início e término não correspondem à 0h, considerando a descontinuidade das medições neste período.

Tabela 6 - Períodos representativos utilizados para a análise dos sinais de temperatura

Campanha	Período utilizado na análise
Inverno (1)	Das 22h de 05-07-21 às 22h de 06-07-21
Inverno (2)	Das 08h de 29-07-21 às 08h de 30-07-21
Primavera	Entre 0h de 08-12-21 às 0h de 09-12-21
Verão	Entre 0h de 27-01-22 às 0h de 28-01-22
Outono (2)	Entre 0h de 05-05-22 às 0h de 06-05-22

Fonte: Autor (2023)

A partir deste recorte em escala diária, os dados das séries de temperatura do ar e de temperatura da água, em cada ponto monitorado, foram sincronizados em intervalos de 10 minutos, seguindo o intervalo de coleta da estação meteorológica. Posteriormente, as séries foram reduzidas a valores médios horários, resultando em vinte e quatro valores, um para cada hora. A fim de facilitar a obtenção dos parâmetros A_r e $\Delta\phi$, todas as séries de temperatura, em valores médios horários, foram ajustadas a uma função trigonométrica dependente do tempo, no formato da Equação 4 (adaptada a partir de GOTO et al., 2005; HATCH et al., 2006), que se assemelha a forma de ondas exibidas na Figura 54.

$$T(t) = A \times \cos(2\pi ft + \phi) + c \quad (4)$$

Onde:

T : temperatura, em °C, em um dado tempo t ;

A : amplitude, indicando a variação vertical da temperatura;

f : frequência, que indica a taxa de oscilação da onda em um intervalo de tempo.

ϕ : ângulo de fase, que determina a posição inicial da onda, para o tempo $t = 0$.

c : offset de temperatura, em °C, indicando um deslocamento inicial da função, ao longo do eixo y ;

O ajuste da curva foi realizado com o uso da função *curve fit*, disponível na biblioteca SciPy, da linguagem computacional Python. A partir de tal ajuste, o cálculo da razão das amplitudes (Equação 5) e do tempo de retardamento, ou *lag-time* (Equação 6, para resultados em radianos e Equação 7, para resultados em unidades de tempo) foi facilitado, uma vez que os parâmetros de interesse são componentes da equação de ajuste utilizada.

$$A_r = \frac{A_w}{A_{air}} \quad (5)$$

Onde:

A_r : razão entre as amplitudes de temperatura;

A_w : amplitude da série de temperatura da água, em um dos pontos monitorados;

A_{air} : amplitude da temperatura do ar.

$$\Delta\phi = \phi_w - \phi_{air} \quad (6)$$

$$\Delta\phi = (\phi_w - \phi_{air}) \times \frac{24}{2\pi f} \quad (7)$$

Onde:

$\Delta\phi$: tempo de retardamento, ou *lag-time*, ou diferença de fase entre os sinais de temperatura, em radianos (Equação 6) ou em horas (Equação 7), que foi prioritariamente utilizado, a fim de facilitar a compressão do sentido de atraso/retardamento de um sinal em relação ao outro.

ϕ_w : ângulo de fase, para a função trigonométrica obtida a partir dos dados de temperatura da água, monitorados em determinado ponto.

ϕ_{air} : ângulo de fase, para a função trigonométrica obtida a partir dos dados de temperatura do ar.

Os valores de razão entre as amplitudes e do *lag-time* foram plotados em função da posição do ponto de monitoramento da temperatura da água, ao longo do comprimento de fibra ótica. Enquanto o primeiro parâmetro é adimensional, o segundo parâmetro será exibido em horas, em conjunto com a hora do dia em que se observa a ocorrência dos picos de temperatura, facilitando sua compreensão. Desta forma, foi possível visualizar as variações de comportamento destes parâmetros ao longo do comprimento longitudinal do rio e como estes se relacionam com as anomalias de temperatura da água, causadas pela interação com as águas subterrâneas. O uso das temperaturas médias da água, ao longo dos períodos delimitados para o cálculo de A_r e $\Delta\phi$, serviram de suporte nestas observações. A definição de faixas de variação nos valores de ambos os parâmetros, em conjunto com o suporte das demais metodologias utilizadas neste trabalho também auxiliaram nesta definição.

Além disso, serão apresentados gráficos comparativos do formato dos sinais de temperatura, nas diferentes estações do ano, para as quatro zonas de interação definidas neste trabalho (zonas de águas profundas, zonas de águas rasas, zonas de baixa interação ou tendência influente e zonas de cabo exposto ao ar). Tais gráficos são derivados do ajuste dos dados de temperatura à função trigonométrica indicada na Equação 4. Esta abordagem visual visa caracterizar preliminarmente o comportamento, no que tange à interação rio-aquífero, de uma região específica de um curso superficial. A repetição deste tipo de análise pode ser realizada para outros locais com monitoramento da temperatura da água, na interface com o meio subterrâneo, com dispositivos de medição distribuída

ou medição pontual, o que pode fomentar o uso desta abordagem para a compreensão deste fenômeno hidrológico, a partir desta propriedade física.

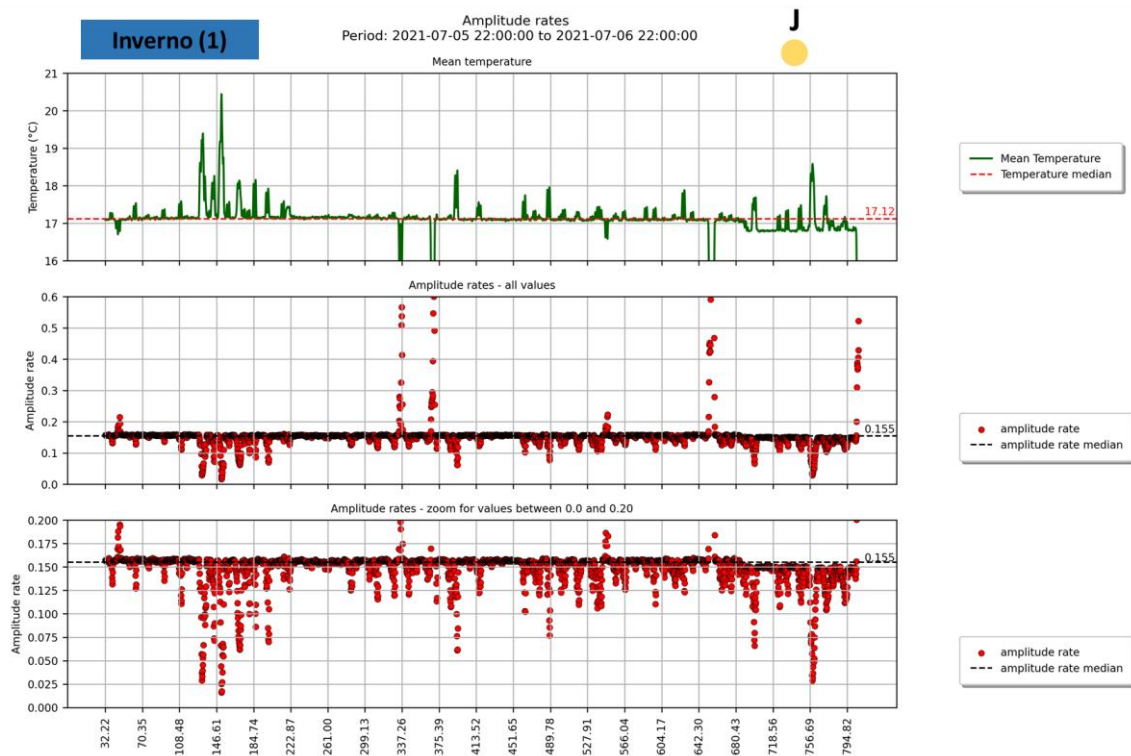
7.4.2 Resultados

A Figura 56 apresenta os resultados da razão entre as amplitudes, obtidos para cada um dos pontos monitorados ao longo do comprimento de fibra ótica do trecho de jusante, nos períodos avaliados das campanhas de Inverno (1) e Verão, respectivamente. Figuras semelhantes para as demais campanhas de monitoramento e para o trecho de jusante são apresentadas no Apêndice G deste texto (Figuras G-1 a G-5) e permitem a mesma avaliação realizada neste tópico. A Figura contempla três quadros: a temperatura média observada no período avaliado (24 h), uma visão geral dos resultados da razão entre as amplitudes e uma visão destes resultados para o intervalo entre 0 e 0,2, no qual é possível distinguir o comportamento das diferentes zonas de interação.

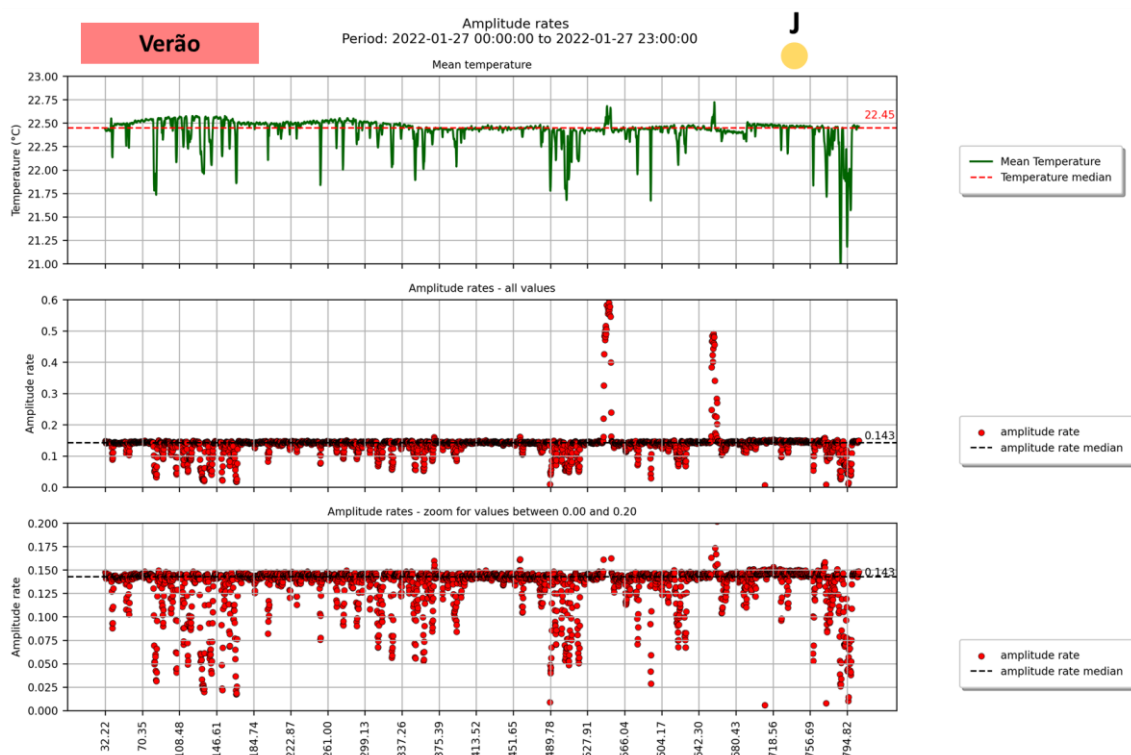
É possível observar um comportamento semelhante dos resultados de A_r apresentados nesta figura, obtidos nestas duas estações do ano. A mesma semelhança pode ser observada para as demais campanhas e também para o trecho de montante. Nota-se que as regiões com as maiores anomalias de temperatura, indicadas pelos picos de temperatura mais elevados nos dados médios da campanha de Inverno (1) e os vales mais profundos nos dados médios da campanha de Verão, indicativos da descarga de águas subterrâneas mais profundas, a razão entre as amplitudes das temperaturas da água e do ar apresentam os menores valores, inferiores à 0,075 na estação invernal e inferiores à 0,050 na estação estival. Considerando a formulação utilizada para a determinação de A_r , os valores reduzidos indicam que a temperatura da água em tais regiões de interação apresenta baixas amplitudes, quando comparada à temperatura do ar. A descarga de água subterrânea profunda nestas zonas influencia diretamente na ocorrência de tal característica, considerando a estabilidade de seu sinal de temperatura, que apresenta poucas variações ao longo do tempo (baixos desvios padrão).

Valores intermediários para a razão entre as amplitudes são observados em regiões com anomalias de temperatura menos expressivas e são indicativos da ocorrência de interação com águas subterrâneas, oriundas de fluxos da zona hiporreica. Intervalos entre 0,08 e 0,15 para a estação de Inverno (1) e 0,050 e para a estação de Verão caracterizam tais zonas, ao longo do comprimento longitudinal avaliado. Tais valores de A_r , são ligeiramente maiores do que aqueles observados em áreas de descarga de água subterrânea profunda, uma vez que os sinais de temperatura de águas rasas tendem a apresen-

Figura 56 – Razão entre as amplitudes dos sinais de temperatura da água e do ar, para o trecho de jusante, para dados da campanha de (a) Inverno (1) e (b) Verão



(b)



Fonte: Autor (2023)

tar uma maior influência da temperatura do ar, em virtude da mistura entre águas superficiais (que infiltram no meio subterrâneo, em zonas influentes) e águas já inseridas no meio subterrâneo. A modificação do sinal de temperatura na zona hiporreica causa então a modificação na razão entre as amplitudes e permite a distinção entre as duas zonas.

Assim como visto em outras metodologias apresentadas neste trabalho, a mediana do parâmetro avaliado condiz com a indicação das zonas de baixa interação ou tendência influente. Tal fato também é observado para a razão entre as amplitudes, no qual regiões sem anomalias de temperatura média evidentes correspondem a valores próximos a 0,14 e 0,15 para o parâmetro A_r . A tendência de elevação nos valores do parâmetro corresponde ao esperado, considerando que a ausência de interação rio-aquífero em tais pontos leva a uma maior proximidade entre os sinais de temperatura observados na água e no ar. A diferença nas propriedades térmicas entre os meios, em especial a capacidade térmica, permite indicar que as medições de temperatura com o cabo de fibra ótica ali observadas correspondem a pontos ainda submersos, distintos daqueles identificados como zonas de cabo exposto ao ar.

As zonas de cabo exposto ao ar são identificadas pelos maiores valores de razão entre as amplitudes e correspondem às regiões na qual as anomalias de temperatura apresentaram comportamento distinto, em relação às zonas de troca entre água superficial e água subterrânea. Valores de A_r superiores à mediana do conjunto de dados observado e com máximos próximos à 0,6 indicam a proximidade entre os sinais de temperatura capturados pela fibra ótica em tais regiões em relação à temperatura ambiente. Esta ocorrência comprova o sentido físico dos resultados da razão entre as amplitudes, considerando a proximidade ou afastamento entre os dois sinais de temperatura comparados.

De uma maneira geral, nota-se que os resultados obtidos para a razão entre as amplitudes coincidem com o esperado (vide Figura 54), com valores baixos de A_r para zonas com descarga de águas profundas, valores intermediários para zonas de águas rasas e valores mais elevados para zonas de baixa interação, com assinatura atmosférica. Tal tendência também foi observada por outros autores, em abordagens de análise da contribuição de águas subterrâneas em escala de bacia, considerando a comparação entre temperatura do ar e da água (BRIGGS et al., 2018; JOHNSON et al., 2020; HARE et al., 2021; HARE et al., 2023).

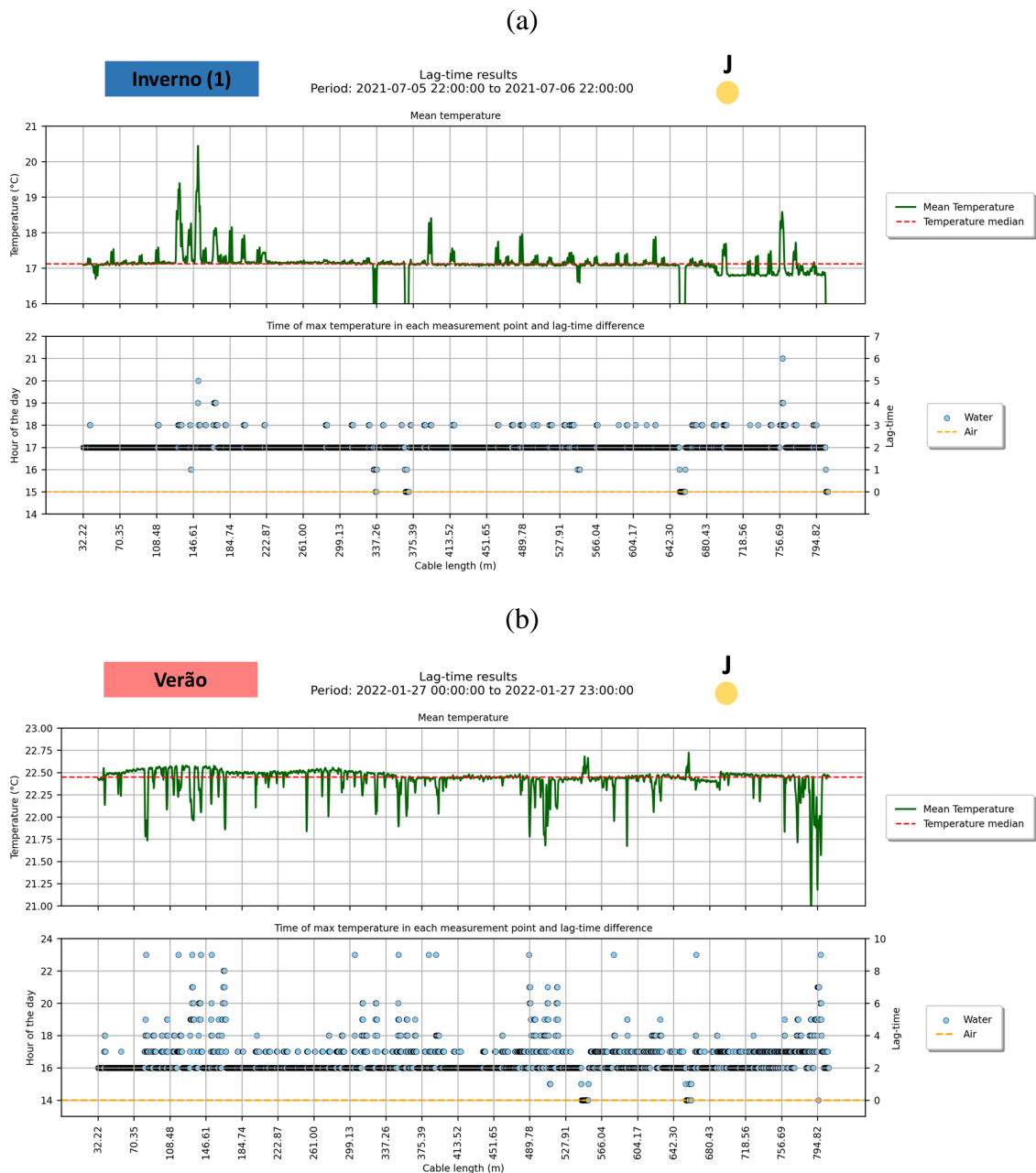
Ao se comparar as faixas de valores de A_r , característicos de cada zona de interação, nota-se uma diferença entre o que foi observado por outros autores (BRIGGS et al., 2018; JOHNSON et al., 2020; HARE et al., 2021; HARE et al., 2023), em virtude da diferença na escala temporal de determinação dos parâmetros. Neste trabalho, foram utilizados dados de um dia completo de medição, que permitem a observação da variação da temperatura neste período. Já os autores americanos realizaram a análise de dados em escala anual, a partir de valores médios diários de temperatura da água e do ar. Desta forma, a variação entre valores máximos e mínimos de temperatura, observados na curva trigonométrica ajustada, tendem a ser maiores, o que resulta em valores de razão entre as amplitudes também maiores. Adicionalmente, estima-se que as diferentes características de temperatura de água e do ar em zonas tropicais e temperadas também resultem em diferenças nos resultados de razão entre as amplitudes, mesmo que estes tivessem sido avaliados na mesma escala temporal.

Considerando o tempo de retardamento entre os sinais de temperatura comparados, a Figura 57 exhibe os resultados observados para as campanhas de Inverno (1) e Verão, respectivamente, para dados monitorados no trecho de jusante. Figuras semelhantes foram produzidas para as demais campanhas deste trecho, assim como para o trecho de montante, e são apresentados na Apêndice G (Figuras G-6 a G-10) deste texto, permitindo análises semelhantes às realizadas neste tópico. O quadro superior da figura apresenta a temperatura média da água, observada durante o período analisado. Já o quadro inferior apresenta os dados resultantes da análise do tempo de retardamento, que indicam a hora de ocorrência dos picos de temperatura (eixo y primário) da água, em cada ponto monitorado, e do ar (linha amarela tracejada). A diferença entre estes tempos resulta no tempo de retardamento estimado entre os sinais (eixo y secundário). Tais resultados resultam em valores inteiros, considerando o uso de temperaturas médias horárias (um dado para cada hora, totalizando 24 valores), para a obtenção da curva trigonométrica representativa dos sinais de temperatura.

É possível observar que os picos de temperatura do ar nas campanhas apresentadas ocorreram no início da tarde, às 14h (campanha de Verão) e às 15h (campanha de Inverno (1)), conforme indicado pelas linhas tracejadas amarelas presentes nos quadros inferiores da Figura 57a e Figura 57b. Tais ordenadas são então consideradas a origem dos valores de tempo de retardamento, observadas no eixo y secundário de tais quadros, uma vez que busca-se observar quanto tempo após o pico da temperatura do ar ocorre o pico da temperatura da água, em cada um dos pontos monitorados, o que permite a diferenciação

das zonas de interação. As zonas de cabo exposto ao ar (CAE) são aquelas que apresentam os menores tempos de retardamento, indicados por pontos próximos à linha indicativa da hora de máxima temperatura do ar. Nestas zonas, observa-se os picos de temperatura ocorrendo simultaneamente ou em até 2 horas depois da maior temperatura meteorológica do dia avaliado. Tal observação é coerente, uma vez que em tais regiões do cabo de fibra ótica, a temperatura medida pelo DTS tende a se aproximar daquela observada no ar.

Figura 57 - Hora de ocorrência das temperaturas máximas e tempo de retardamento (*lag-time*) entre os sinais de temperatura da água e do ar, para o trecho de jusante, com dados da campanha de (a) Inverno (1) e (b) Verão



Fonte: Autor (2023)

As zonas em que o cabo está submerso na água apresentam tempos de retardamento maiores, considerando a diferença nos sinais de temperatura da água e ar e as respectivas propriedades térmicas dos meios. As zonas de baixa interação ou tendência influente correspondem ao segundo grupo com menor *lag time* observado, com valores entre 2h e 3h nas duas campanhas de monitoramento apresentadas na Figura 57. Tais valores se aproximam da mediana do conjunto de dados de tempo de retardamento entre as temperaturas, servindo como referência para separação das zonas de cabo exposto ao ar (menores $\Delta\phi$) e zonas de descarga de água subterrânea de diferentes origens (maiores $\Delta\phi$), seja de origem hiporreica, seja de origem profunda. Tal fato também é observado em outras metodologias apresentadas neste texto.

Para as zonas de descarga de água subterrânea, a partir da observação das anomalias na temperatura média em conjunto com os tempos de retardamento obtidos, é possível diferenciar as zonas de fluxo hiporreico e as zonas de origem de água subterrânea. Nota-se que os maiores tempos de retardamento coincidem com os maiores picos de temperatura média na estação de Inverno (1) e os vales mais acentuados na estação de Verão. Nestas zonas, são observados valores de $\Delta\phi$ superiores à 4 horas no Inverno e à 5 horas no Verão, indicativos de regiões de descarga de água profunda. Zonas com anomalias de temperatura de menos acentuadas apresentam valores de *lag-time* entre 2 e 4 horas no Inverno (1) e entre 2 e 5 horas no Verão, e correspondem a zonas de águas rasas. A observação deste intervalo na campanha de Verão evidencia o maior número de zonas de descarga de água subterrânea na estação estival, em maior parte de origem rasa.

Considerando as zonas de descarga de água subterrânea, é possível notar, ao comparar os resultados das campanhas de Inverno (1) e Verão, que a amplitude de valores de tempo de retardamento nestas zonas é menor no período invernal (variando entre 3 e 6h) em relação ao período estival (variando entre 4 e 10h). Ao se relacionar o fenômeno hidráulico e o transporte de calor decorrente da descarga de água subterrânea, estima-se que os maiores níveis freáticos observados durante o Verão (COUTINHO, 2019; CALIXTO, 2020), resultantes da ocorrência das chuvas, aumentam os volumes de água subterrânea contribuindo à vazão total do rio. Tal fato resulta numa maior atuação da frente de calor advectiva nas áreas de descarga, que apresentam temperaturas inferiores à temperatura do ar, atuando em contraponto à frente de calor condutiva causada pela radiação solar. Esta contraposição de fontes e mecanismos de transporte de calor resultam em maiores tempos de retardamento nas zonas de interação nesta época do ano. No Inverno, a contraposição entre tais frentes de calor também ocorre, mas apresenta menor

amplitude, considerando as menores vazões descarregadas (menores níveis freáticos em relação ao Verão) e a menor incidência de radiação solar, com dias mais curtos, resultando em tempos de retardamento menores nas zonas de descarga.

Os resultados de tempo de retardamento observados neste tópico, a partir da análise dos sinais de temperatura, ajustados a uma curva trigonométrica, são semelhantes ao observado para os deslocamentos relativos, obtidos a partir do uso da correlação cruzada entre as duas séries temporais (vide tópico 7.3). Tais deslocamentos também podem ser convertidos a uma escala temporal, considerando o intervalo de amostragem utilizado para o monitoramento da temperatura da água e do ar (~ 10 minutos). Esta conversão pode resultar em valores não inteiros, diferente do observado no tempo de retardamento determinado neste tópico, que leva em conta o uso de dados médios horários para obtenção da equação trigonométrica e de seus parâmetros de interesse. Mesmo com tal diferença, os valores se mostram convergentes.

O uso da escala horária também leva a conclusões diferentes do observado por outros autores na literatura (BRIGGS et al., 2018; JOHNSON et al., 2020; HARE et al., 2021; HARE et al., 2023), que analisaram conjuntamente a temperatura da água e do ar, em escala anual, a partir dos valores médios diários, a nível de bacia hidrográfica. Nesta situação, os valores de tempo de retardamento entre os sinais de temperatura observados foram menores para bacias com contribuições de águas profundas e mais elevados para regiões com contribuições de águas de zona hiporreica. Tais autores indicam que para a escala temporal que utilizaram, é possível observar uma sincronia entre os sinais de temperatura do ar e de águas profundas, que resultam nas conclusões por eles obtidas.

Os resultados obtidos neste trabalho, observando o comportamento das temperaturas em uma menor escala de tempo, são plausíveis com os mecanismos de transporte de calor e o fenômeno hidráulico envolvido na interação entre águas superficiais e subterrâneas. A contraposição entre as frentes de calor de diferentes origens, nas zonas de descarga de água subterrânea, afeta os tempos de retardamento observados e, em conjunto com as anomalias nas temperaturas médias, permitem satisfatoriamente a distinção do comportamento das diferentes regiões do curso superficial. Estima-se que tal metodologia pode ser implementada para bacias que não disponham da medição distribuída de temperatura, a partir da seleção de pontos de monitoramento da temperatura por sensores pontuais, inseridos na interface entre o meio superficial e subterrâneo, que podem então ser analisadas em conjunto com a série de temperatura do ar.

Considerando todos os períodos avaliados, a Tabela 7 apresenta as faixas de valores observados para a razão entre as amplitudes (A_r) e o tempo de retardamento ($\Delta\phi$) entre os sinais de temperatura, para cada uma das zonas de interação definidas neste trabalho e para cada um dos trechos de rio monitorados. Tais valores foram definidos a partir da observação das figuras disponíveis no Apêndice G deste texto, que permitem averiguar o comportamento dos parâmetros de interesse nos diferentes monitoramentos realizados.

Tabela 7 - Faixas de valores observados para a razão entre as amplitudes e o tempo de retardamento dos sinais de temperatura, em cada uma das zonas de interação, em cada uma das campanhas de monitoramento realizadas

(a) trecho de montante

Parâmetro Avaliado	Zona	Campanha de monitoramento				
		Inverno (1) – jul/21	Inverno (2) – jul/21	Primavera – dez/21	Verão – jan/22	Outono (2) – mai/22
Razão entre as amplitudes (A_r)	Mediana	0,155	0,171	0,156	0,143	0,174
	ZAP	$\leq 0,075$	$\leq 0,075$	$\leq 0,075$	$\leq 0,05$	$\leq 0,05$
	ZAR	0,08 – 0,15	0,08 – 0,15	0,08 – 0,15	0,05 – 0,14	0,05 – 0,17
	CEA	$> 0,155$	$> 0,171$	$> 0,156$	$> 0,143$	$> 0,174$
Tempo de retardamento ($\Delta\phi$), em horas	Mediana	2	2	2	2	2
	ZAP	≥ 4	≥ 4	≥ 5	≥ 5	≥ 4
	ZAR	$2 < \Delta\phi < 4$	$2 < \Delta\phi < 4$	$2 < \Delta\phi < 5$	$2 < \Delta\phi < 5$	$2 < \Delta\phi < 4$
	CEA	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2

(b) trecho de montante

Parâmetro Avaliado	Zona	Campanha de monitoramento				
		Inverno (1) – jul/21	Inverno (2) – jul/21	Primavera – dez/21	Verão – jan/22	Outono (2) – mai/22
Razão entre as amplitudes (A_r)	Mediana	0,158	0,177	0,159	0,150	0,154
	ZAP	$\leq 0,075$	$\leq 0,075$	$\leq 0,05$	$\leq 0,05$	$\leq 0,05$
	ZAR	0,08 – 0,15	0,08 – 0,15	0,05 – 0,15	0,05 – 0,15	0,05 – 0,15
	CEA	$> 0,158$	$> 0,177$	$> 0,159$	$> 0,150$	$> 0,154$
Tempo de retardamento ($\Delta\phi$), em horas	Mediana	2	2	2	2	3
	ZAP	≥ 4	$= 4$	≥ 4	≥ 5	≥ 4
	ZAR	$2 < \Delta\phi < 4$	$2 < \Delta\phi < 4$	$2 < \Delta\phi < 4$	$2 < \Delta\phi < 5$	$3 < \Delta\phi < 4$
	CEA	< 2	< 2	< 2	< 2	< 3

Fonte: Autor (2023)

Os resultados apresentados indicam uma regularidade nos parâmetros avaliados nos sinais de temperatura, mesmo com as distintas condições meteorológicas e hidrogeológicas das diferentes estações do ano. Isso confirma as conclusões observadas

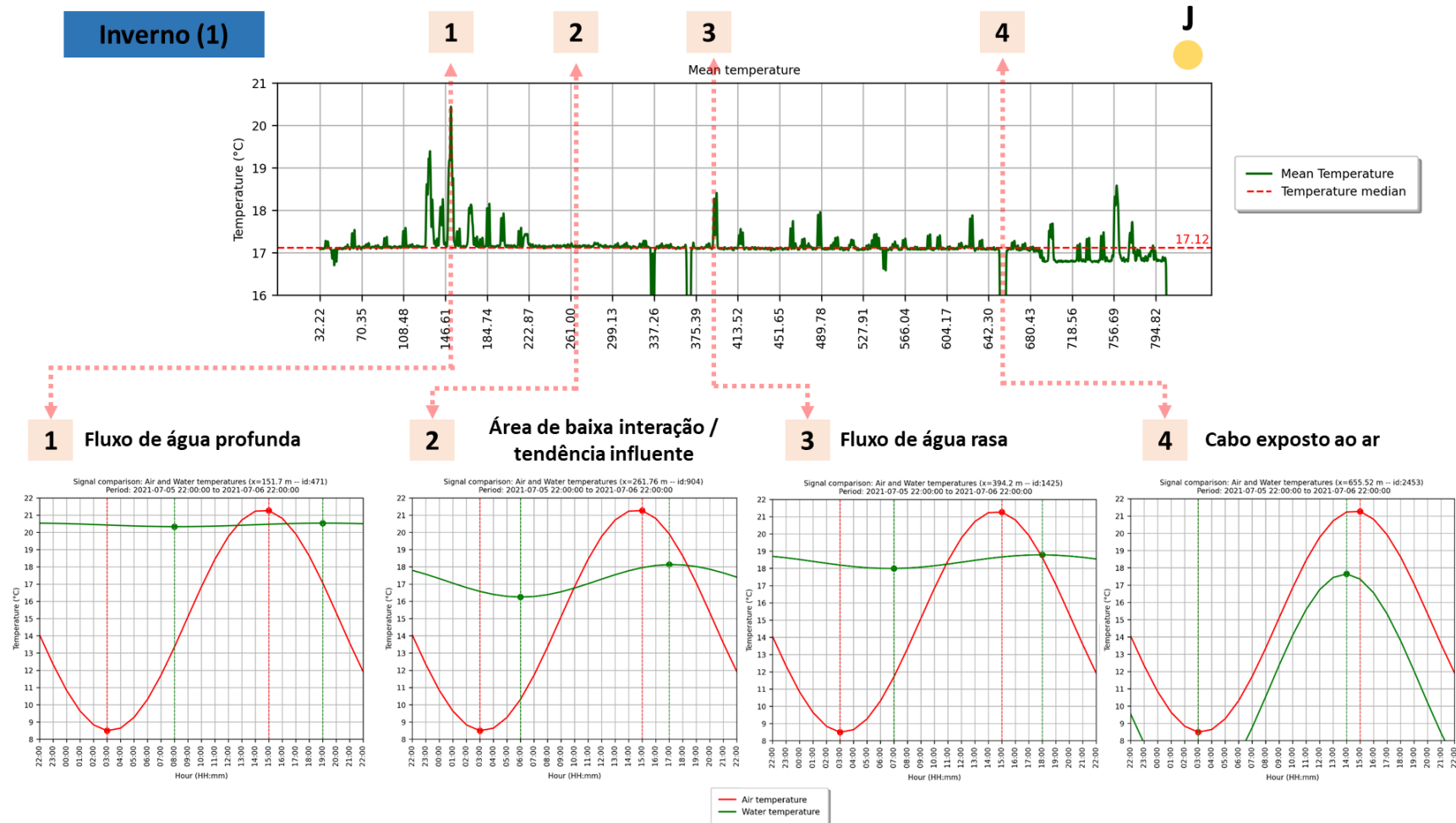
a partir das análises realizadas com os dados de Inverno (1) e Verão, apresentados na Figura 56 e na Figura 57, reafirmando o potencial de utilização da razão entre as amplitudes e do tempo de retardamento como métrica de classificação de fluxos de interação rio-aquífero. De uma forma geral, a partir dos resultados das diferentes estações do ano, as diferentes zonas de interação podem ser definidas a partir dos seguintes intervalos:

- Zonas de Águas Profundas (ZAP): $A_r \leq 0,075$ e $\Delta\phi \geq 4$;
- Zonas de Águas Rasas (ZAR): $0,080 \leq A_r \leq 0,150$ e $2 < \Delta\phi < 4$;
- Zonas de baixa interação ou tendência influente: $A_r \approx 0,150$ e $\Delta\phi \approx 2$;
- Zonas de Cabo Exposto ao Ar (CAE): $A_r > 0,150$ e $\Delta\phi < 2$;

Considerando todos os períodos avaliados, nota-se desvios nos valores dos dois parâmetros avaliados, que não comprometem a utilização destes como ferramenta para distinção das zonas de interação. Realça-se a tendência de observação de maiores tempos de retardamento nas estações mais quentes (Primavera e Verão), considerando o aumento das vazões descarregadas, decorrentes do aumento dos níveis freáticos nestes períodos. Adicionalmente, nos períodos monitorados de Inverno (2) e Outono (2), em que foram observadas a atuação de frente frias sobre a área de estudo, os valores de mediana das razões entre as amplitudes apresentaram valores mais elevados, especialmente no trecho de jusante. O impacto da variação brusca da temperatura ambiente nestes períodos afetou o resultado central deste parâmetro, ampliando a faixa de valores observados para as zonas de descarga de água subterrânea.

A Figura 58 apresenta uma comparação visual entre os sinais de temperatura da água e do ar, em quatro pontos do trecho de jusante, selecionados a partir do seu diferente comportamento com relação à interação rio-aquífero. Apresenta-se aqui os dados referentes à campanha de Inverno (1), sendo que as demais campanhas podem ser visualizadas no Apêndice G (Figuras G-11 a G-15), para verificação do comportamento dos mesmos pontos selecionados. A figura destaca na parte superior a temperatura média do período avaliado, para percepção de quanto a observação da anomalia de temperatura já é um indicativo inicial da ocorrência de descarga de água subterrânea. Na parte inferior, exibe-se um comparativo dos sinais de temperatura da água (linha verde) e do ar (linha vermelha).

Figura 58 - Comparação do comportamento dos sinais de temperatura da água e do ar, em diferentes zonas de interação rio-aquífero, para os dados para a campanha de Inverno (1), levantados entre 05 e 06 de julho de 2021 para o trecho de jusante



Fonte: Autor (2023)

O comparativo dos sinais de temperatura realça como a temperatura em cada zona de interação apresenta comportamentos distintos, em função da profundidade de origem da água descarregada. Sinais mais estáveis são observados nas zonas de interação com águas profundas (zona 1 - Figura 58) enquanto zonas de descarga de águas rasas (zona 3 - Figura 58) e zonas de tendência influente ou baixa interação (zona 2 - Figura 58) tendem a apresentar sinais com maiores amplitudes e com influência da temperatura ambiente. Zonas de cabo exposto ao ar (zona 4 - Figura 58) replicam os sinais de temperatura do ar.

A plotagem dos sinais de temperatura em conjunto também permite a observação direta do tempo de retardamento entre eles, a partir dos pontos de ocorrência de máximos e mínimos de temperatura. Assim como observado para a variação dos sinais, em termos de amplitude, o atraso do sinal de temperatura da água também apresenta comportamento distinto a depender da profundidade da água subterrânea descarregada naquela zona, confirmando os valores previamente observados e discutidos. Considerando que as curvas trigonométricas dos sinais de temperatura foram construídas a partir do ajuste de dados medidos, é possível notar que a diferença entre os valores máximos (período da tarde) e entre os valores mínimos (período da madrugada) sofrem variações de um dado para mais ou para menos, decorrentes do referido ajuste, sem prejuízo para interpretação do fenômeno físico.

Como já comentado, a abordagem visual dos sinais de temperatura é interessante para a detecção rápida do tipo de zona de interação observada em determinado ponto de monitoramento em um curso superficial e pode ser replicado em outras bacias hidrográficas, que não disponham de dispositivos de medição distribuída. A partir de campanhas curtas, com duração superior a 24 horas, é possível obter dados que permitam o ajuste das curvas trigonométricas e a respectiva observação em conjunto com dados de temperatura do ar. A determinação da razão entre as amplitudes e do tempo de retardamento entre os sinais também é facilitado a partir de tal observação visual.

7.4.3 Conclusões

Considerando os resultados apresentados, é possível concluir que o uso da razão das amplitudes e do tempo de retardamento entre os sinais de temperatura é uma ferramenta interessante para a diferenciação do comportamento de diferentes zonas de interação rio-aquífero. A utilização desta abordagem para dados de temperatura em escala diária, monitorados a partir do uso de um dispositivo de medição distribuída de temperatura (DTS) é, até o que se conhece, inédita na literatura, e permite entender a

dinâmica das águas superficiais e subterrâneas, ao longo do comprimento longitudinal de um curso superficial.

Foi possível observar que as zonas de interação com águas profundas apresentam temperatura mais estáveis, que resultam em valores baixos (inferiores a 0,075) de razão entre as amplitudes e tempos de retardamento entre os sinais mais elevados (superiores a 4 horas). Zonas de interação com águas rasas apresentaram valores de A_r intermediários, entre 0,008 e 0,015, enquanto os valores de $\Delta\phi$ permaneceram entre 2 e 4 horas. Tais resultados foram consistentes nas diferentes campanhas de monitoramento realizadas, realçando como tais parâmetro podem ser efetivos como métricas de definição das diferentes zonas de interação. Adicionalmente, os sinais de temperatura de alguns pontos foram apresentados com o uso de ferramentas visuais, de forma a permitir uma identificação rápida do tipo de zona de interação observada. Tal abordagem pode ser repetida em outras regiões, a partir do monitoramento curto da temperatura da água, em determinados pontos de um curso superficial.

É importante ressaltar que a abordagem utiliza o ajuste de uma curva trigonométrica, para extração dos parâmetros de interesse. Assim, sua aplicação produz resultados coerentes quando as temperaturas do ar e da água se comportam de forma próxima a uma curva senoidal, com as típicas variações sazonais de temperatura diária, como foi o caso dos períodos avaliados nesta seção. Em períodos de ocorrência de frentes frias, nota-se que a queda brusca da temperatura leva a ajustes de curvas trigonométricas que não possuem um ciclo completo em 24 horas. É possível observar tal situação nos dias 28 de julho de 2021 e 04 de maio de 2022 (Figura 17 e Figura 18, respectivamente). Nestas situações, o ajuste resulta em valores de amplitude elevados e resultados dispersos para a razão entre as amplitudes. Adicionalmente, nestes períodos, é possível observar a ocorrência de temperaturas mínimas invertidas, com os menores valores de temperatura ocorrendo no período vespertino, o que também resulta na dispersão dos resultados do tempo de retardamento.

7.5 Teste de causalidade de Granger

7.5.1 Contextualização e metodologia

O Teste de Granger, proposto pelo autor de mesmo nome (GRANGER, 1969), é um teste de hipóteses estatístico utilizado para determinar se uma série temporal pode ser considerada útil para prever o comportamento temporal de uma segunda série temporal. Tal teste foi desenvolvido inicialmente para a análises em econometria e finanças, a fim de avaliar as relações entre variáveis ao longo do tempo. Posteriormente, a necessidade de avaliar possíveis relações de causa e efeito entre dados em outras áreas do conhecimento, tais como em hidrologia e recursos hídricos (DETTO et al. 2012; PAPAGIANNANOPOULOU et al., 2017; MCGRAW e BARNES, 2018; SINGH e BORROK, 2019; HUANG et al., 2019; CALIXTO, 2020), expandiu o uso do teste.

Sejam duas séries temporais, identificadas por X e Y . O teste busca comparar a performance de previsão de dois modelos: um que inclui valores defasados temporalmente de ambas as séries, e o segundo que inclui somente valores defasados da série Y . A hipótese nula do teste assume que X não “Granger-causa” Y , indicando que a o uso da primeira série temporal não melhora as previsões futuras da segunda série. Se a hipótese nula é rejeitada, sugere-se que a série X tem influência causal significativa. Para mais detalhes da formulação matemática, recomenda-se ao leitor a leitura do texto original, proposto por Granger (1969).

A aplicação do teste de causalidade de Granger demanda que as séries temporais avaliadas possuam as seguintes premissas (GRANGER, 1969):

- Estacionariedade: característica indicativa da conservação das propriedades estatísticas da série, tais como média e variância, ao longo do tempo. Caso a estacionariedade não seja observada, o teste de causalidade de Granger pode não ser conclusivo. A utilização de técnicas de transformação, tais como a diferenciação de primeira ordem, pode auxiliar na obtenção da estacionariedade, sem prejuízo para as análises realizadas.
- Linearidade: A relação entre as séries temporais avaliadas no teste deve ser linear, o que permite o uso de combinações lineares de valores passados de uma das séries para predição dos valores da segunda série. Caso a relação observada seja não linear, outros métodos de avaliação de causalidade devem ser utilizados.
- Ausência de autocorrelação: indica que a série temporal não pode apresentar correlação com uma versão deslocada de si mesmo, em termos temporais. A

autocorrelação indica o grau de similaridade entre os dados observados em determinado momento, em relação a observações passadas, auxiliando na verificação da independência dos dados.

- Independência: as observações nas séries temporais oferecem informação única e são pouco influenciadas por valores anteriores e valores futuros. Ao violar esta condição, o teste pode fornecer resultados não conclusivos.

Apesar de tais demandas, o teste de causalidade de Granger apresenta como vantagens ser uma ferramenta bem estabelecida para indicar relações causais entre variáveis, devido à sua aplicabilidade em diversas áreas do conhecimento, assim como sua facilidade de interpretação e implementação, em termos quantitativos. Ao se utilizar valores defasados das séries na verificação da relação causal, o teste leva em conta a dependência temporal das variáveis entre si, o que muitas vezes não é considerado por outras ferramentas semelhantes. Desta forma, a realização do teste é importante para análises complementares, em conjunto com outras metodologias, como as aplicadas no contexto desta tese.

Nos dados de temperatura analisados nesta tese, foi possível observar qualitativamente a influência da temperatura do ar na temperatura da água, após determinado intervalo de tempo. Desta forma, a aplicação do teste de causalidade de Granger tende a indicar que a temperatura ambiente “Granger-causa” a temperatura da água, considerando que variações na primeira variável resultam em variações posteriores na segunda variável. Neste sentido, a defasagem do primeiro sinal de temperatura pode auxiliar / melhorar o desempenho da previsão do segundo sinal de temperatura. Porém, em zonas de interação rio-aquífero, em que a temperatura da água sofre influência do transporte de calor das águas subterrâneas descarregadas, tal causalidade pode ser afetada ou reduzida. Assim, o teste estatístico pode auxiliar na detecção de tais zonas e na diferenciação de sua origem, considerando os diferentes resultados obtidos.

Para a realização destas análises, o teste de causalidade de Granger foi implementado por meio de rotinas computacionais em linguagem Python, com o uso da biblioteca *StatsModels* (STATSMODELS, 2023). Os dados de temperatura do ar e da água, em cada um dos pontos monitorados ao longo do comprimento longitudinal do rio, foram avaliados por meio das curvas trigonométricas ajustadas para determinação razão entre as amplitudes e o tempo de retardamento entre os sinais de temperatura (tópico 7.4), nos mesmos períodos completos de 24 horas (Tabela 8). Tal uso leva em conta a necessidade de inserção de um parâmetro de entrada do teste (*max_lag*), que consiste na

máxima defasagem a ser avaliada entre os dois sinais. A inserção de tal parâmetro se baseou no tempo de retardamento observado com o uso da metodologia anterior.

Tabela 8 - Períodos avaliados com o Teste de Granger em cada uma das campanhas de monitoramento

Campanha	Período utilizado na análise
Inverno (1)	Das 22h de 05-07-21 às 22h de 06-07-21
Inverno (2)	Das 08h de 29-07-21 às 08h de 30-07-21
Primavera	Entre 0h de 08-12-21 às 0h de 09-12-21
Verão	Entre 0h de 27-01-22 às 0h de 28-01-22
Outono (2)	Entre 0h de 05-05-22 às 0h de 06-05-22

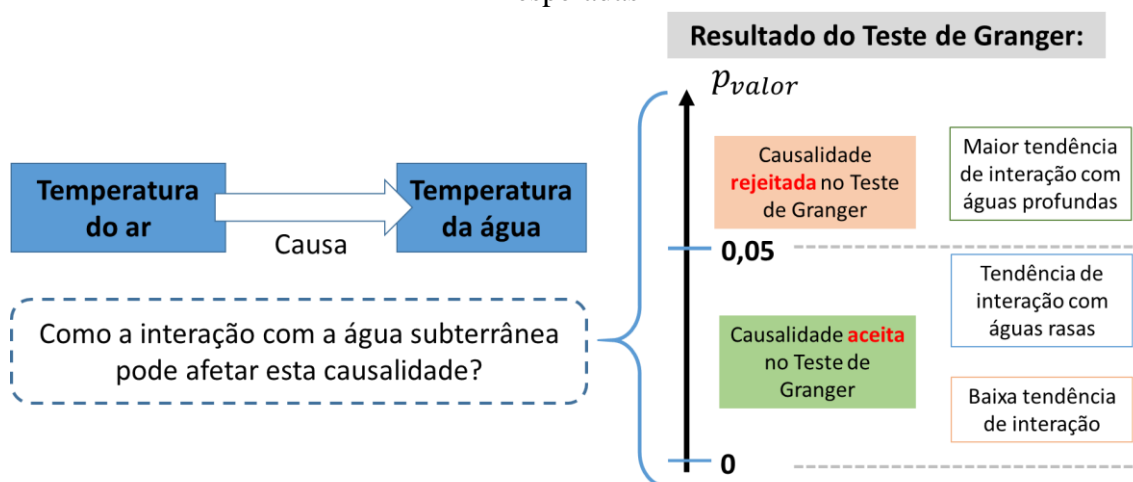
Fonte: Autor (2023)

A escolha da escala temporal diária busca uma maior tendência de atendimento das premissas impostas para a realização do teste de Granger, considerando o contexto de medidas de temperatura em meio natural. A existência de estacionariedade de cada uma das séries temporais de temperatura foi verificada a partir do uso do teste de hipóteses de raiz unitária KPSS (Teste de Kwiatkowski–Phillips–Schmidt–Shin). A hipótese nula do teste indica que a série é não possui raiz unitária e, portanto, é estacionária. Tal hipótese não é rejeitada para p-valor superior ao nível de significância estabelecido ($\alpha = 0,05$). Para os casos a estacionariedade não tenha sido confirmada, a diferenciação de primeira ordem foi aplicada e o teste foi refeito, a fim de assegurar o atendimento da premissa necessária para a realização do teste de Granger.

Para o teste de Granger, a hipótese nula confirma a causalidade da temperatura do ar em relação a temperatura da água, ocorrendo para valores de p-valor inferiores ao nível de significância estabelecido (também igual a 0,05). Valores de p-valor inferiores a 0,05 levam a rejeição da hipótese nula, resultando na indicação de causalidade entre as séries de temperatura. Ao se avaliar a estatística do teste, estima-se que resultados de p-valor próximos de zero são indicativos de zonas de baixa interação com águas subterrâneas, de característica influente ou mesmo áreas de cabo de fibra ótica exposta ao ar, considerando a forte relação de causalidade entre a temperatura do ar e da água nestas regiões. A tendência crescente nos valores de p-valor indica uma maior interação com as águas subterrâneas. Valores intermediários entre 0 e 0,05 podem ser indicativos de interação com águas rasas, pois ainda possuem a casualidade confirmada pelo teste. Áreas com p-valor superior a 0,05 indicam interação com águas profundas, com a causalidade sendo

rejeitada pelo teste de Granger (Figura 59). Tais conclusões serão observadas em conjunto com as anomalias de temperatura observadas nas temperaturas médias do período no qual o teste foi aplicado. O suporte das demais metodologias abordadas neste texto também foi considerado para avaliação dos resultados deste teste estatístico.

Figura 59 - Resumo da aplicação do teste de causalidade Granger e das conclusões esperadas



Fonte: Autor (2023)

A aplicação do teste de Granger aos dados de temperatura monitorados buscou avaliar se o teste é válido como ferramenta de diferenciação de zonas de interação rio-aquífero e das diferentes origens de fluxo que descarregam ao meio superficial, a partir dos valores da estatística do teste. Considerando a disponibilidade de dados de temperatura da água em diferentes estações do ano, a caracterização do uso do teste se torna mais robusta, permitindo averiguar o seu comportamento em diferentes condições ambientais. Adicionalmente, os resultados do teste indicarão quais períodos em que o monitoramento a sua aplicação é válida, considerando o não atendimento da condição de estacionariedade, verificada previamente à aplicação do teste de causalidade.

7.5.2 Resultados

Todos os períodos selecionados para a utilização do teste de Granger foram tiveram sua estacionariedade verificada a partir do teste KPSS, a fim de garantir o atendimento da principal premissa de uso do teste de causalidade. Foi possível observar que a aplicação da diferenciação de primeira ordem assegurou o atendimento da estacionariedade em todos os períodos selecionados. Considerando que os dados de temperatura utilizaram um modelo de curva trigonométrica, com ciclo aproximado a 24

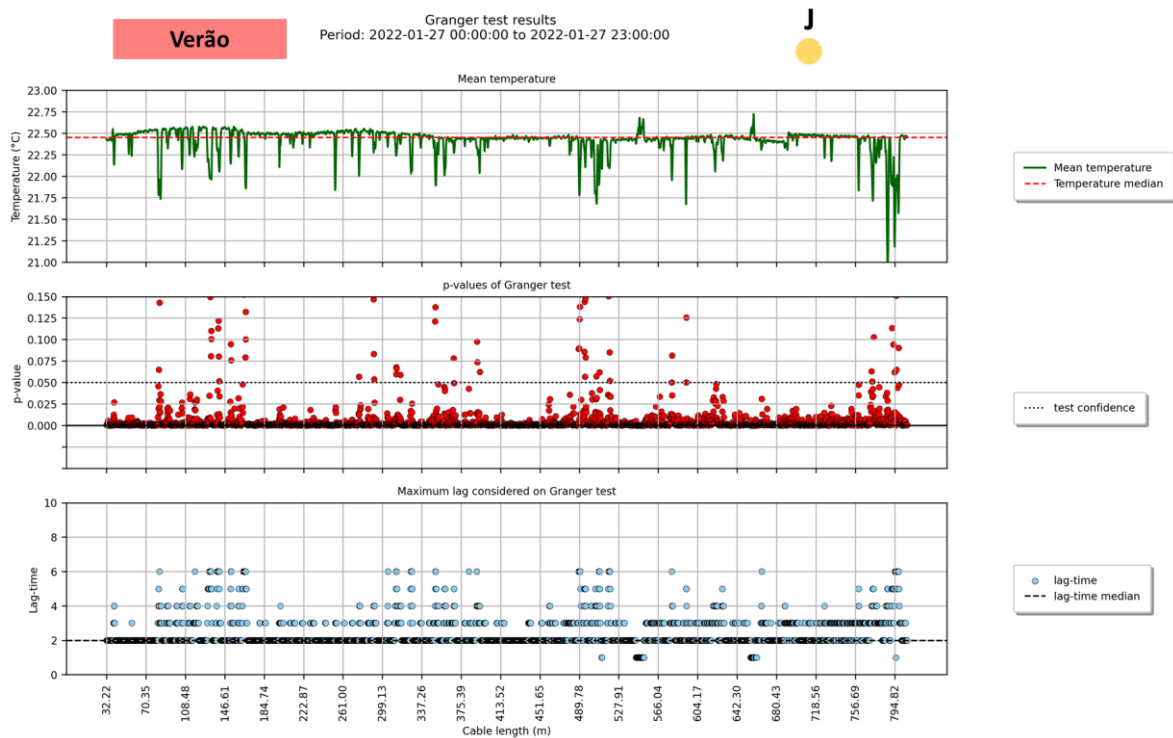
horas, que coincide com o recorte temporal utilizado nesta análise, a aplicação da diferenciação de primeira ordem resulta redução das amplitudes de tais sinais de temperatura e na respectiva aproximação ao valor central da curva trigonométrica modelada.

A Figura 60 apresenta os resultados da aplicação do teste de Granger para os dados de temperatura monitorados no trecho de jusante, nos períodos selecionados das campanhas de Verão e Outono (2), respectivamente. Figuras semelhantes foram produzidas para os demais períodos e para o trecho de montante, avaliados com este teste de casualidade, e são apresentados no Apêndice H deste texto. São apresentados 3 quadros nesta figura: o quadro superior ressalta os dados de temperatura média da água, observados no período de análise definido, permitindo observar a ocorrência das anomalias de temperatura. O quadro central apresenta os resultados de p-valor obtidos com a aplicação do teste de Granger. A linha tracejada em 0,05 apresenta o nível de significância considerado para a rejeição ou não da hipótese nula. Relembra-se que p-valor inferior a 0,05 leva a rejeição da hipótese nula, permitindo dizer que a série de temperatura do ar “Granger-causa” a série de temperatura da água. O quadro inferior apresenta o valor de defasagem temporal utilizado na realização do teste de Granger. É importante lembrar que este teste de causalidade testa o poder preditivo de uma série em relação a outra, a partir do deslocamento dos sinais. Neste sentido, os resultados de tempo de retardamento (tópico 7.4) serviram de base para a determinação deste dado de entrada. Considerando a aplicação do teste de Granger à amostra definida, os valores de defasagem devem ser não-nulos e inferiores à seis. Assim, o tempo de retardamento foi ajustado a tais limites, para permitir a execução coerente deste teste estatístico.

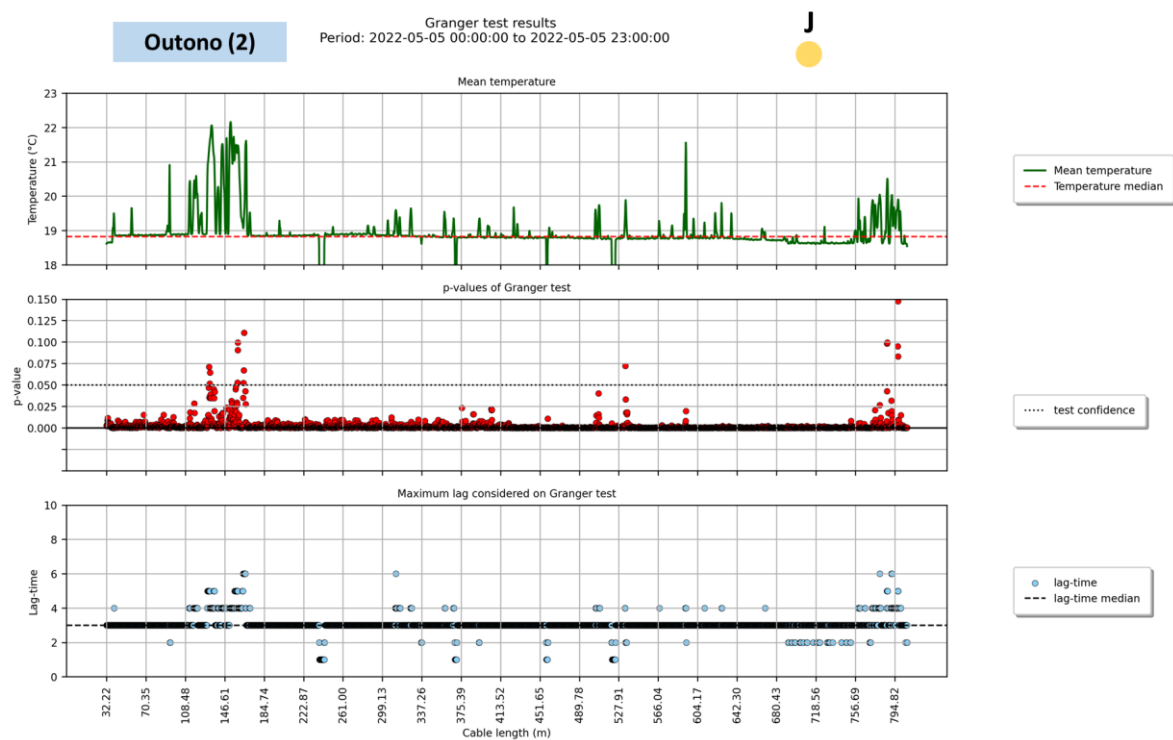
Observando a Figura 60, é possível observar que as regiões de maiores anomalias de temperatura, em ambas estações, mesmo com a modificação na forma de observação das zonas de interação (zonas quentes x zonas frias) coincidem com resultados de p-valor superiores à 0,05 (pontos vermelhos acima da linha tracejada), que foi o nível de significância considerado para o teste. Em tais zonas, também são observados os maiores valores de defasagem utilizados, derivados dos tempos de retardamento entre os sinais de temperatura do ar e da água e que configuram zonas de interação com águas profundas. Neste sentido, é possível concluir que em tais regiões, a temperatura do ar não “Granger-causa” a temperatura da água superficial, diferenciando este tipo de zona de interação em relação às demais regiões.

Figura 60 - Resultados do teste de causalidade de Granger, para o trecho de jusante, para dados monitorados na campanha de (a) Verão e (b) Outono (2)

(a)



(b)



Fonte: Autor (2023)

A ocorrência de uma maior quantidade de zonas de interação durante o Verão é evidenciada nos resultados apresentados, considerando a maior quantidade de zonas com p-valor superior à 0,05, quando comparado aos dados da campanha de Outono (2). Tais regiões também são coincidentes com zonas de anomalia de temperatura e de valores elevados de defasagem aplicada a uma das séries. Assim como já observado em outras metodologias utilizadas neste trabalho, estima-se que o aumento do nível freático, decorrente da ocorrência das chuvas, resulte num aumento do gradiente hidráulico existente na bacia e favoreça a descarga de água subterrânea ao meio superficial neste período do ano. Tal fato favorece a mistura da água de diferentes profundidades, nas camadas da zona hiporreica e uma consequente alteração dos sinais de temperatura da água, que podem ter sua relação de causalidade modificada, como indicado pelo resultado deste teste estatístico.

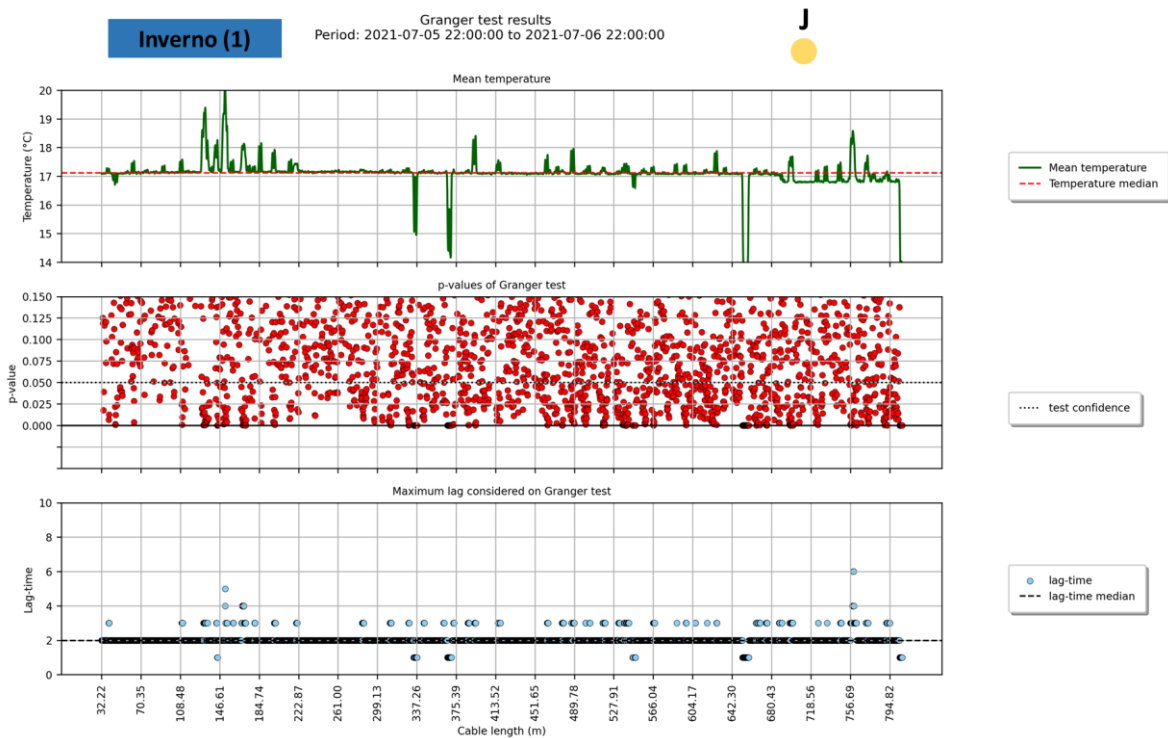
Ao se observar a faixa de resultados de p-valor entre 0 e 0,05, nota-se uma associação destas regiões com a ocorrência de anomalias de temperatura de menor grau e de valores de defasagem intermediários, configurando a ocorrência de zonas de interação com águas rasas. Tais fluxos, oriundos de camadas superficiais da zona hiporreica, apresentam sinais de temperatura mais próximos do observado na temperatura do ar e tem sua causalidade confirmada pelo teste de Granger, a partir dos p-valores inferiores ao nível de significância definido, ou seja, a temperatura do ar “Granger-cause” a temperatura da água descarregada em zonas de interação com águas rasas.

Para as zonas onde não são observadas anomalias de temperatura e para as zonas de exposição do cabo ao ar, as quais comumente apresentam baixos tempos de retardamento, ao se comparar as duas séries de temperatura, nota-se que os resultados de p-valor para o teste de Granger são próximos a zero. Tal resultado indica uma forte casualidade da temperatura do ar à temperatura da água nestas zonas, como esperado, considerando as observações realizadas com outras metodologias aplicadas neste trabalho, especialmente à observação da semelhança dos sinais de temperatura da água e do ar nestas regiões (vide Figura 58).

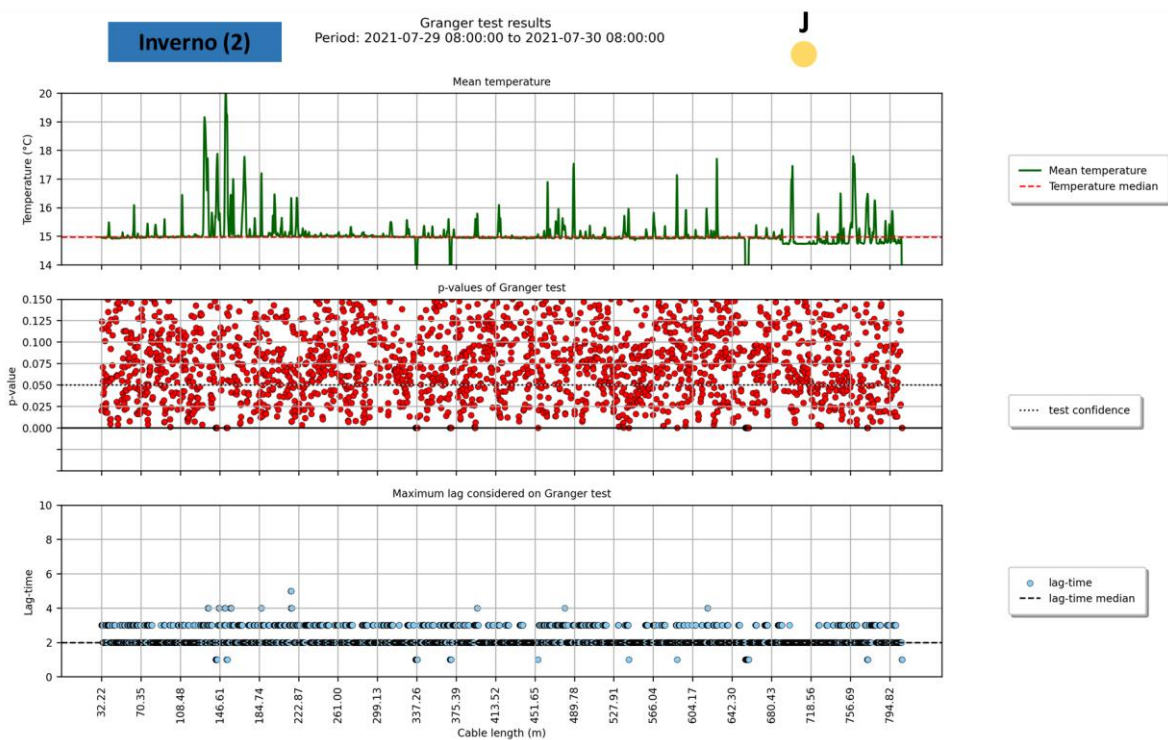
O comportamento verificado nas estações Verão e Outono (2) também foi observado de forma semelhante para os dados selecionados da campanha de Primavera. Porém, para os dados das campanhas de Inverno (1) e Inverno (2), os resultados do teste de Granger não foram conclusivos, uma vez que não houve associação entre os resultados de p-valor do teste de causalidade, as anomalias na temperatura média e os valores de defasagem aplicados em cada um dos pontos de monitoramento (Figura 61).

Figura 61 - Resultados do teste de causalidade de Granger, para o trecho de jusante, para dados monitorados na campanha de (a) Inverno (1) e (b) Inverno (2)

(a)



(b)



Fonte: Autor (2023)

Nos períodos inverniais monitorados, a temperatura média do ar esteve significativamente abaixo das temperaturas médias da água, em cerca 2 (campanha de Inverno (1)) a 5°C (Inverno (2)), diferente do observado nas demais estações do ano, em que as temperaturas ambientes médias eram superiores ou muito próximas aos valores médios da temperatura monitorado no curso superficial. Tais informações podem ser observadas a partir dos dados analisados no tópico 7.2 e complementado pelas informações disponíveis no Apêndice E deste trabalho.

Estima-se que a inversão de comportamento entre as temperaturas comprometeu o desempenho do teste de Granger, considerando que o mesmo avalia a causalidade a partir da comparação entre a capacidade de previsão de dois modelos: incluindo valores defasados de ambas as séries e incluindo somente valores da segunda série (aquela que ocorre posteriormente na escala de tempo). Esta comparação leva em conta o uso de combinações lineares entre as duas séries temporais, o que demanda a ocorrência de linearidade entre as temperaturas da água e do ar, uma das premissas indicadas ao teste de Granger. Neste sentido, as temperaturas ambientes mais baixas e frias não contribuem efetivamente para a previsão das temperaturas mais quentes, observadas ao longo do curso superficial, na escala de tempo utilizada na análise proposta. Isso resultou em resultados dispersos para o teste de Granger, para os pontos de monitoramento submersos. Tal fato se contrapõe às zonas de cabo exposto ao ar, onde é possível observar comportamento semelhante ao notado em campanhas realizadas em outras estações do ano, com resultados de p-valor próximos a zero (Figura 61). Esta observação reforça que o teste de Granger foi aplicado de forma semelhante ao feito em outras estações do ano.

A este contexto, também se soma o fato da maior diferença de temperatura entre águas superficiais e subterrâneas acontecer nos períodos de inverno, em conjunto com a elevada capacidade térmica da água, quando comparada ao ar atmosférico. Neste sentido, as zonas de descarga de água subterrânea funcionam como locais de fornecimento de energia térmica à água superficial. Em virtude de sua capacidade térmica, a água absorve parte desta energia térmica, conservando sua temperatura a níveis mais estáveis e quentes, quando comparada ao meio externo. Ao se observar a relação do meio superficial com o meio atmosférico, nos períodos mais frios, a que água superficial tem tendência a perder calor, considerando o gradiente de temperatura existente (água mais quente que o ar), afetando assim a linearidade e a capacidade de previsão do teste estatístico. Já nas demais estações, o meio atmosférico é quem tende a fornecer calor a água superficial, o que pode assegurar ao teste o fornecimento de resultados mais conclusivos.

7.5.3 Conclusões

A partir do exposto, é possível concluir que a aplicação do teste de Granger a dados conjuntos de temperatura da água e do ar se mostrou interessante para a diferenciação das zonas de interação rio-aquífero. Em especial, a separação das zonas de contato com águas profundas foi mais bem-sucedida, em relação às demais regiões de troca com o meio subterrâneo, uma vez que a causalidade observada entre as duas temperaturas foi afetada, de acordo com os resultados do teste estatístico.

Ao utilizar o teste de causalidade de Granger com dados de temperatura ambientais, é importante se atentar às suas premissas, especialmente à estacionariedade de cada uma das séries e à relação linear entre elas. Os períodos de dados selecionados no contexto desta pesquisa apresentaram comportamento estacionário, assegurado a partir da aplicação de uma diferenciação de primeira ordem aos dados em escala diária, ajustados à uma função trigonométrica. Foi possível observar uma possível falha na relação linear entre as séries de temperatura nos períodos mais frios do ano, em que a temperatura ambiente média é significativamente inferior à temperatura da água, levando a resultados inconclusivos do teste de Granger. Nas demais estações, onde o aquecimento da água é realizado diretamente pela radiação solar, a linearidade é mantida e os resultados do teste permitem diferenciar as zonas de interação.

Recomenda-se a utilização cautelosa do teste de Granger para a definição das zonas de interação rio-aquífero. Apesar da sua fácil implementação, o atendimento das premissas do teste, em conjunto com a inserção coerente da defasagem dos sinais a ser avaliada são fatores decisivos para a obtenção de bons resultados. Neste sentido, a utilização da análise do tempo de retardamento entre os sinais de temperatura do ar e da água é um bom ponto de partida para avaliação deste parâmetro de entrada do teste de causalidade. É importante se atentar a períodos em que a temperatura do ar possa sofrer variações bruscas, decorrentes da ocorrência de frente frias ou outros fenômenos meteorológicos, que possam afetar o comportamento da temperatura e levar ao não atendimento das premissas necessárias. Adicionalmente, recomenda-se a utilização do teste de Granger em conjunto com outras metodologias de diferenciação do comportamento das zonas de interação, que permitam a confirmação das conclusões obtidas.

8 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Esta tese buscou avaliar o potencial de utilização da temperatura como ferramenta de identificação e caracterização da interação rio-aquífero, em áreas tropicais. Sua execução combinou a realização de dois aspectos, ainda não observados na literatura: o estudo em uma bacia hidrográfica tropical inserida em área de afloramento do Sistema Aquífero Guarani (Bacia Hidrográfica do Ribeirão da Onça – Brotas/SP) e o uso da medição distribuída de temperatura, baseada no uso de cabos de fibra ótica como sensores. Foram realizadas seis campanhas de monitoramento da temperatura da água, em diferentes estações do ano, visando verificar o comportamento, em termos espaciais e temporais, das zonas de interação entre águas superficiais e subterrâneas, além dos efeitos da sazonalidade da temperatura ambiente no uso deste traçador natural. Tais campanhas resultaram em um banco de dados de temperatura da água em alta resolução, com aproximadamente 300 horas de monitoramento de temperatura da água, sendo um dos mais extensos monitoramentos para fins de avaliação da interação rio-aquífero ao que se tem conhecimento.

Em conjunto ao monitoramento, foram utilizadas sete diferentes metodologias para diferenciação do comportamento das zonas de interação rio-aquífero e a respectiva profundidade de origem da água subterrânea que participa desta troca, com base nos dados de temperatura e contribuindo a um dos desafios da hidrogeologia atual. Tais métodos englobam o uso de ferramentas de visualização dos dados e a análise qualitativa do comportamento térmico das diferentes regiões de interação, que englobam o uso de mapas de calor e gráficos de linha; o uso de técnicas de avaliação de variações espaciais da temperatura, que englobam o uso do Teste Z e de algoritmos de clusterização; além de técnicas de relação entre a temperatura da água e a temperatura do ar, levando em conta a observação de médias, desvios padrões e amplitudes das temperaturas, da correlação cruzada entre as séries temporais, da determinação das razões entre as amplitudes e o tempo de retardamento entre os sinais de temperatura, assim como a aplicação do teste de casualidade de Granger. Todo este ferramental buscou caracterizar separar as zonas de interação com águas profundas, zonas de interação com águas, zonas de baixa interação ou tendência influente e zonas de cabo de fibra ótica exposto ao ar, combinando a aplicação de tais técnicas ao conjunto de dados de temperatura monitorados, de forma inédita ou com adaptações e melhorias, considerando a finalidade proposta.

Os mapas de calor e os gráficos de linha se mostraram interessantes ferramentas de observação qualitativa do comportamento das zonas de interação rio-aquífero. A

ocorrência de anomalias persistentes de temperatura, indicadas por faixas consistentes nos mapas de calor e pelos picos e vales nos gráficos de linha são formas iniciais de identificação das zonas de interação. Tais ferramentas de visualização também permitiram a observação da alternância na forma de detecção das zonas de interação rio-aquífero, que no contexto das zonas tropicais, se apresentam como zonas mais quentes nos períodos de Inverno e Outono e durante as noites e madrugadas de Primavera, enquanto se apresentam como zonas frias durante as manhãs de Primavera e nos levantamentos de dados realizados no Verão. O limiar de 21 °C foi identificado como temperatura de transição entre estes comportamentos. Tais ferramentas de visualização também se mostraram úteis para identificação de horários ideais de monitoramento da interação, considerando o maior contraste entre as temperaturas da água superficial e subterrânea. Adicionalmente, também foi possível observar os diferentes comportamentos da temperatura ao longo do comprimento longitudinal do rio, nas diferentes estações do ano, que podem incentivar estudos posteriores do balanço energético existente entre o meio aquático e o meio atmosférico, levando em conta a contribuição das descargas de água subterrânea neste fluxo de calor.

Em termos de variações espaciais, buscou-se implementar o teste Z como ferramenta de diferenciação dos fluxos, de acordo com a proposta de Yao et al. (2015). Considerando a particularidade dos dados monitorados no contexto desta tese, foram propostas modificações nesta metodologia, considerando a aplicação única do teste estatístico em conjunto com critérios de rejeição, que visam retirar pontos de baixa interação e zonas de cabo exposto ao ar das análises. Em conjunto, foi proposto a verificação da persistência da rejeição da hipótese nula do teste, que indica a diferença de temperatura do ponto avaliado em relação aos pontos de montante, a partir de um nível de significância definido. Um limiar inicial de 80% de rejeição foi utilizado para a definição das zonas de interação com águas profundas, apresentando bons resultados para estações em que a diferença de temperatura entre as anomalias e a temperatura média da água superficial se encontrava na faixa entre 2 e 3 °C. Como o resultado do teste é influenciado pelo nível de contraste das temperaturas das águas de diferentes origens, sugere-se que este limiar seja flexível, considerando a diferença entre tais temperaturas. Para períodos de maior contraste, o limiar pode ser elevado e para períodos de menor contraste, o limiar pode ser reduzido. Tais conclusões foram obtidas considerando os períodos de monitoramento realizados no contexto desta tese, que permitiram aprimorar

a metodologia inicialmente utilizada por Yao et al. (2015), que teve aplicação restrita em uma única campanha de monitoramento.

A aplicação de algoritmos de clusterização foi outra estratégia utilizada para delimitação das variações espaciais da temperatura e a respectiva classificação dos fluxos. A partir do uso das rotinas não-supervisionadas *K-means* e *Agglomerative Clustering*, observou-se que o uso de três ou quatro grupos é suficiente para a divisão das zonas de interação com diferentes comportamentos. A fim de se manter o caráter não-supervisionado, a clusterização foi realizada com os dados de temperatura sem nenhum tipo de filtragem. Ao se observar as particularidades que podem influenciar na divisão dos grupos, nota-se que a variação longitudinal da temperatura, a alternância no comportamento das zonas de interação (zonas quentes x zonas frias) e as mudanças de temperatura causadas pela confluência de afluentes são pontos importantes a serem observados, quando da implementação deste tipo de abordagem em trabalhos futuros.

Ao se relacionar a temperatura da água com a temperatura do ar, a observação de valores de média, desvio padrão e amplitudes térmicas, em escala diária e em escala de campanha também foi utilizada como estratégia para diferenciação dos fluxos. Os valores observados para tais parâmetros estatísticos foram consistentes ao longo das diferentes campanhas, especialmente o desvio padrão, ao qual se recomenda como principal indicador estatístico. O uso das amplitudes também se mostrou interessante, mas apresentar resultados influenciados pelo momento de início e término do monitoramento, que pode não monitorar as temperaturas máximas ou mínimas, no caso das escalas diárias; assim como a ocorrência de fenômenos meteorológicos pontuais, no caso das amplitudes de campanha, considerando variações bruscas de temperatura ao longo dos dias de monitoramento.

A correlação cruzada entre as séries temporais de temperatura do ar e da água também resultou em bons resultados de diferenciação das zonas de interação, com um comportamento coeso nas diferentes estações de monitoramento realizadas. A obtenção do coeficiente de correlação cruzada máximo, em conjunto com o deslocamento relativo entre as duas séries para a sua ocorrência, resultou em parâmetros de fácil interpretação, com faixas de valores indicativas dos diferentes comportamentos dos fluxos. Estima-se que o uso de séries contínuas mais longas seja mais interessante, considerando a possibilidade de verificação de diferentes cenários de correlação.

O uso do ajuste de funções trigonométricas e a determinação da razão entre as amplitudes e o tempo de retardamento entre as séries temporais de temperatura da água e

do ar também foi outra abordagem proposta para uso com dados levantados com a medição de temperatura distribuída e o delineamento das zonas de interação ao longo do comprimento longitudinal do rio. Os resultados numéricos se mostraram coerentes com a expectativa, considerando os diferentes mecanismos de transporte de calor presentes na interface entre meio atmosférico, meio superficial e meio subterrâneo. O estabelecimento de faixas de valores para os dois parâmetros foi consolidado, com as zonas de interação com águas profundas apresentando baixos valores de razão entre as amplitudes e tempos de retardamento mais elevados. O uso de ferramentas gráficas, para a plotagem das funções trigonométricas ajustadas as séries de temperatura, pode ser interessante para a determinação do tipo de zona de interação que está ocorrendo em determinada região de um rio, mesmo monitorada com sensores pontuais de temperatura.

Por fim, o teste de causalidade de Granger foi outra estratégia utilizada para classificação das zonas de interação. Considerando a influência da temperatura do ar na temperatura da água superficial, a redução desta causalidade, verificada a partir do teste, pode ser utilizada como forma de separação de tais zonas, especialmente daquelas que possuem contato com águas mais profundas. Apesar da facilidade de uso e implementação deste teste estatístico, recomenda-se o seu uso com cautela, considerando as suas premissas (especialmente a linearidade e a estacionariedade), em conjunto com a definição coerente da defasagem considerada entre os sinais.

Ao se cruzar os resultados obtidos em cada uma das metodologias de classificação utilizadas, nota-se que os resultados obtidos são bastante consistentes e permitem a definição e caracterização conjunta das zonas de interação com águas profundas, zonas de interação com águas rasas, zonas de baixa interação ou tendência influente, além de zonas de cabo exposto ao ar. Sempre que possível, recomenda-se o uso conjunto de tais metodologias, visando verificar, de diferentes formas, o comportamento dos dados de temperatura da água e a respectiva relação entre o meio superficial e o meio subterrâneo. Adicionalmente, ressalta-se que as metodologias aqui apresentadas não são as únicas passíveis de uso para análise dos dados monitorados de temperatura e que estudos futuros poderão tanto aprimorar tais métodos quanto definir outras formas de classificação dos fluxos de interação.

Acredita-se que a realização deste trabalho auxilia no fomento ao uso da temperatura como traçador em áreas tropicais, especialmente no contexto dos estudos da interação rio-aquífero. Apesar de ser considerado um traçador de contraste, dependente da diferença de temperatura entre as águas de diferentes origens, a aplicação de algumas

das metodologias de análise e classificação dos dados de temperatura para definição das zonas de interação permitem o uso deste traçador para a análise deste fenômeno hidrológico ao longo de todo o ano. É sabido que o uso da medição distribuída de temperatura fornece excelentes resultados para o monitoramento de grandes extensões, ao longo da qual o cabo de fibra ótica pode ser instalado. Tal fato ainda se contrapõe ao custo de aquisição e uso do equipamento central de monitoramento, ao qual se espera uma maior popularização e redução de valores financeiros, especialmente no contexto de monitoramento ambiental e de realização de pesquisas científicas. Adicionalmente, o uso de sensores pontuais de temperatura, em diferentes regiões do país, também pode contribuir para a difusão deste traçador natural. O tempo e o custo para processamento e análise dos dados obtidos também deve ser levado em conta, a depender da extensão do monitoramento realizado.

Considerando as metodologias de análise e classificação das zonas de interação, buscou-se obter métricas iniciais de referência para as áreas tropicais e para o contexto das regiões de afloramento do Sistema Aquífero Guarani. Estudos posteriores, em outras áreas de estudo, podem utilizar tais valores de referência como ponto de partida para a análise do fenômeno de interação rio-aquífero, a partir de dados de temperatura.

Diferentes temas de pesquisa podem ser derivados deste trabalho, aos quais se destacam:

- Estudos da interação rio-aquífero com outras metodologias, que reforcem a diferenciação da origem dos fluxos, em termos de profundidade. São exemplos o uso de infiltrômetros em locais específicos, o monitoramento de isótopos estáveis e a verificação da idade da água, além de acompanhamento de parâmetros de qualidade da água, que permitam o cruzamento de dados com amostras oriundas de poços de monitoramento do sistema aquífero adjacente;
- Estudos relativos ao contexto biogeoquímico da zona hiporreica e das zonas de interação, levando em conta o contexto tropical. Considerando que tais locais podem atuar como regiões favoráveis à reprodução e ao desenvolvimento de espécies e a delimitação dos locais de interação permite investigações mais aprofundadas de como tais regiões afetam a diversidade, abundância e a distribuição da fauna que ali se instala (UCHÔA et al., 2023);
- Estudos de balanço de fluxos de calor entre o meio atmosférico, o meio superficial e o meio subterrâneo, considerando as variações de temperatura ao longo do

comprimento longitudinal do rio, a sazonalidade da temperatura do ar e a influência do transporte de calor pela descarga de águas subterrâneas;

- Estudos relativos ao efeito das mudanças climáticas nas temperaturas da água superficial e da água subterrânea e a consequente influência no uso desta propriedade física como traçador de fenômenos hidrológicos.
- Estudos relativos à quantificação de taxas de interação, utilizando dados de temperatura monitorados em subsuperfície, com metodologias de caráter permanente e caráter transiente, em áreas de interação rio-aquífero já mapeadas previamente (REIS et al., 2019)

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHMADI, A.; OLYAEI, M.; HEYDARI, Z.; EMAMI, M.; ZEYNOLABEDIN, A.; GHOMLAGHI, A.; DACCACHE, A.; FOGG, G.E.; SADEGH, M. Groundwater Level Modeling with Machine Learning: A Systematic Review and Meta-Analysis. **Water**, v.14, n. 949, 2022. <http://doi.org/10.3390/w14060949>

ALIND GUPTA. **Geeks for Geeks – ML | Types of linkages in clustering**. Disponível em: <<https://www.geeksforgeeks.org/ml-types-of-linkages-in-clustering/>>. Acesso em: mai 2023.

ANDERSON, M. P. Heat as Groundwater Tracer. **Groundwater**, v. 43, n. 6, p. 951-968, 2005. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2005.00052.x>

ANIBAS, C.; FLECKENSTEIN, J. H.; VOLZE, N.; BUIS, K.; VERHOVEVEN, R.; MEIRE, P.; BATELAAN, O. Transient or steady-state? Using vertical temperature profiles to quantify groundwater–surface water exchange. **Hydrological Process**, v. 23, p. 2165-2177, 2009. <https://doi.org/10.1002/hyp.7289>

ARANTES, E. J. **Emprego de infiltrômetros na caracterização da interação entre rio e aquífero**. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003. <https://doi.org/10.11606/D.18.2003.tde-15062007-162427>

ARANTES, E.J.; CHAUDHRY, F.H.; MARCUSSI, F.N. Caracterização da interação entre rio e aquífero. **Águas Subterrâneas**, v. 20, n. 2, p. 97-108, 2006. <https://doi.org/10.14295/ras.v20i2.11728>

ARRIAGA, M.A.; LEAP, D.I. Using solver to determine vertical groundwater velocities by temperature variations, Purdue University, Indiana, USA. **Hydrogeology Journal**, v. 14, n. 1, p. 253-263, 2006. <https://doi.org/10.1007/s10040-004-0381-x>

ARRIGONI, A. S.; POOLE, G. C.; MERTES, L. A. K.; O'DANIEL, S. J.; WOESSNER, W. W.; THOMAS, S. A. Buffered, lagged, or cooled? Disentangling hyporheic influences on temperature cycles in stream channels, **Water Resources Research**, v. 44, W09418, 2008. <https://doi.org/10.1029/2007WR006480>

BARRETO, C. E. A. G. **Balanço hídrico em zona de afloramento do Sistema Aquífero Guarani a partir do monitoramento hidrogeológico em bacia representativa**.

Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

BECKER, H.; ZIMMERMANN, N.; MCVICAR, T. et al. Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. **Sci Data**, v. 5, 180214, 2018. <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.214>

BENCALA, K. E.; GOOSEFF, M. N.; KIMBALL, B. A. Rethinking hyporheic flow and transient storage to advance understanding of stream-catchment connections. **Water Resources Research**, v. 47, n. 3, W00H03, 2011. <https://doi.org/10.1029/2010WR010066>

BLÖSCH, G.; BIERKENS, M.; CHAMBEL, A. et al. Twenty-three unsolved problems in hydrology (UPH) – a community perspective. **Hydrological Sciences Journal**, v. 64, n.10, p. 1141-1158, 2019. <https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1620507>

BOANO, F.; HARVEY, J. W.; MARION, A.; PACKMAN, A. I.; REVELLI, R.; RIDOLFI, L.; WÖRMAN, A. Hyporheic flow and transport processes: Mechanisms, models, and biogeochemical implications. **Rev. Geophys.**, v. 52, p. 603–679, 2014. <https://doi.org/10.1002/2012RG000417>

BRIGGS, M. A.; LAUTZ, L. K.; BUCKLEY, S. F.; LANE, J. W. Practical limitations on the use of diurnal temperature signals to quantify groundwater upwelling. **Journal of Hydrology**, v. 519, p. 1739-1751, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.09.030>

BRIGGS, M. A.; JOHNSON, Z. C.; SNYDER, C. D.; HITT, N. P.; KURYLYK, B. L.; LAUTZ, L.; IRVINE, D. J.; HURLEY, S. T.; LANE, J. W. Inferring watershed hydraulics and cold-water habitat persistence using multi-year air and stream temperature signals. **Science of the Total Environment**, v. 636, p. 1117-1127, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.344>

CABRERA, M. C. M., ANACHE, J. A. A., YOULTON, C., & WENDLAND, E. Performance of evaporation estimation methods compared with standard 20 m² tank. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 20, p. 874-879, 2016.

CAISSIE, D. The thermal regime of rivers: a review. **Freshwater Biology**, v. 51, n. 8, p. 1389-1587, 2006. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2006.01597.x>

CALIXTO, K. G. **Relações causais e persistências na dinâmica da disponibilidade hídrica para a formulação de modelos hidrológicos conceituais**. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2020. <https://doi.org/10.11606/D.18.2020.tde-10062021-112534>

CAO, D. F.; SHI, B.; YAN, J.-F.; WEI, G.Q. Distributed method for measuring moisture content of soils based on C-DTS. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, v. 36, n. 5, p. 910-915, 2014. <https://doi.org/10.11779/CJGE201405015>

CARDENAS, M. B. Hyporheic zone hydrologic science: A historical account of its emergence and a prospectus. *Water Resour. Res.*, v. 51, p. 3601–3616, 2015. <https://doi.org/10.1002/2015WR017028>

CARUSO, A.; RIDOLFI, L.; BOANO, F. Impacto f watershed topography on hyporheic exchange. **Advances in Water Resources**, v. 94, p. 400-411, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2016.06.005>

CASTRO JUNIOR, P. R.; WENDLAND, E. C. **Mapeamento morfopedológico aplicado à bacia-piloto do Ribeirão da Onça (SP) em áreas de recarga do Aquífero Guarani**. São Carlos: EESC/USP, 2015. Relatório de pós-doutoramento do Programa Nacional de Cooperação Acadêmica – CAPES.

CONSTANTZ, J.; TYLER, S.W.; KWICKLIS, E. Temperature-profile methods for estimating percolation rates in arid environments. **Vadose Zone Journal**, v. 2, n. 1, p. 12–24, 2003. <http://dx.doi.org/10.2136/vzj2003.0012>

CONSTANTZ, J. Heat as a tracer to determine streambed water exchanges. **Water Resources Research**, v. 44, n. 4, 2008. <https://doi.org/10.1029/2008WR006996>

CONTIN NETO, D. **Balço hídrico em bacia hidrográfica situada em região de recarga do aquífero Botucatu**. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1987.

COUTINHO, J. V. **Caracterização geofísica e modelagem do escoamento subterrâneo em área de afloramento do Sistema Aquífero Guarani**. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019. <https://doi.org/10.11606/D.18.2019.tde-03102019-105847>

COUTINHO, J. V.; PORSANI, J. L.; ELIS, V. R.; SANTOS, V. R. N.; USTRA, A. T.; WENDLAND, E. Applications of geophysical techniques to improve a groundwater conceptual model in an outcrop area of the Guarani Aquifer System, in Brazil. **Environmental Earth Sciences**, v. 79, p. 417, 2020. <http://dx.doi.org/10.1007/s12665-020-09163-4>

COZZARELLI, I. M. et al. Geochemical and geophysical indicators of oil and gas wastewater can trace potential exposure pathways following releases to surface waters. **Sci. Total Environ.**, v. 755(1), 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142909>

DES TOMBE, B.; SCHILPEROORT, B.; BAKKER, B. Estimation of Temperature and Associated Uncertainty from Fiber-Optic Raman-Spectrum Distributed Temperature Sensing. **Sensors**, v. 20, n.8, p. 2235, 2020. <https://doi.org/10.3390/s20082235>

DETTO, M. et al. Causality and Persistence in Ecological Systems: A Nonparametric Spectral Granger Causality Approach. **The American Naturalist**, v. 179, n. 4, p. 524-535, 2012.

DOGULU, N. Clustering Algorithms: Perspectives from the Hydrology Literature. **In: 27th IUGG General Assembly, IAHS Symposia**, Abstract IUGG19-3031, Montréal – Canada: 9 – 14 July 2019.

EUSER, T.; LUXEMBURG, W. M. J.; EVERSON, C. S.; MENGISTU, M. G.; CLULOW, A. D.; BATIAANSSEN, W. G M. A new method to measure Bowen ratios using high-resolution vertical dry and wet bulb temperature profiles. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 18, p. 2021–2032, 2014. <https://doi.org/10.5194/hess-18-2021-2014>

FERNALD, A. G.; WIGINGTON, P. J.; LANDERS, D. H. (2001), Transient storage and hyporheic flow along the Willamette River, Oregon: Field measurements and model estimates. **Water Resources Research**, v. 37, n. 6, p. 1681–1694, 2001. <https://doi.org/10.1029/2000WR900338>

FURUKAWA. **Fiber-Lan Indoor Outdoor (Cfot-Eo) – Abnt**. Disponível em: <https://www.furukawalatam.com/pt-br/catalogo-de-produtos-detalhes/fiber-lan-indoor_outdoor-cfot-eo---abnt>. Acesso em: abr. 2023.

GARNER, G.; MALCOLM, I. A.; SADLER, P.; HANNAH, D. M. What causes cooling water temperature gradients in a forested stream reach? **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 18, p. 5361-5376, 2014. <https://doi.org/10.5194/hess-18-5361-2014>

GASTMANS, D.; CHANG, H. K.; HUTCHEON, I. Groundwater geochemical evolution in the northern portion of the Guarani Aquifer System (Brazil) and its relationship to diagenetic features. **Applied Geochemistry**, v. 25, p.16-33, 2010. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeochem.2009.09.024>

GHOBADI, F.; KANG, D. Application of Machine Learning in Water Resources Management: A Systematic Literature Review. **Water**, v.15, n. 620, 2023. <https://doi.org/10.3390/w15040620>

GOMES, L. H. **Determinação da recarga profunda na bacia piloto do Ribeirão da Onça em zona de afloramento do Sistema Aquífero Guarani a partir do balanço hídrico na zona saturada**. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008. <https://doi.org/10.11606/D.18.2008.tde-28042009-132417>

GOOSEFF, M. Defining Hyporheic Zones – Advancing Our Conceptual and Operational Definitions of Where Stream Water and Groundwater Meet. **Geography Compass**, v. 4, n.8, p. 945–955, 2010. <https://doi.org/10.1111/j.1749-8198.2010.00364.x>

GRANGER, C. W. Investigating causal relations by econometric models and cross-spectral methods. **Econometrica**, v. 37, n. 3, p. 424-438, 1969.

GUANABARA, R. C. **Modelo transiente de fluxo em área de afloramento do Sistema Aquífero Guarani**. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

HANNAH, D.M.; MALCOLM, I.A.; BRADLEY, C. Seasonal hyporheic temperature dynamics over riffle bedforms. **Hydrological Processes**, v. 23, n. 15, p. 2178 – 2194, 2009.

HARE, D. K.; HELTON, A. M.; JOHNSON, Z. C.; LANE, J. W.; BRIGGS, M. A. Continental-scale analysis of shallow and deep groundwater contributions to streams. **Nature Communications**, v. 12, n.1450, 2021 <https://doi.org/10.1038/s41467-021-21651-0>

HARE, D. K.; BENZ, S. A.; KURYLYK, B. L.; JOHNSON, Z. C.; TERRY, N. C.; HELTON, A. M. Paired Air and Stream Temperature Analysis (PASTA) to Evaluate Groundwater Influence on Streams. **Water Resources Research**, v. 59, e2022WR0339912. <https://doi.org/10.1029/2022WR033912>

HATCH, C. E.; FISHER, A. T.; REVENAUGH, J. S.; CONSTANTZ, J.; RUEHL, C. Quantifying surface water–groundwater interactions using time series analysis of streambed thermal records: Method development, **Water Resources Research**, v. 42, n. W10410, 2006. <https://doi.org/10.1029/2005WR004787>

HAUSNER, M. B.; SUÁREZ, F.; GLANDER, K. E.; VAN DE GIESEN, N.; SELKER, J.; TYLER, S. W. Calibrating Single-Ended Fiber-Optic Raman Spectra Distributed Temperature Sensing Data. **Sensors**, v. 11, p. 10859 – 10879, 2011. <https://doi.org/10.3390/s111110859>

HIRATA, R.; FOSTER, S. The Guarani Aquifer System - from regional reserves to local use. **Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology**, v. 54, n.1, p.1-7, 2021. <http://dx.doi.org/10.1144/qjegh2020-091>

HIRATA, R.; KIRCHHEIM, R. E.; MANGANELLI, A. Diplomatic advances and setbacks of the Guarani Aquifer System in South America. **Environmental Science & Policy**, v. 114, p. 384-393, 2020.

HOMOBONO, T. G. **Análise estatística da influência da precipitação e de características do solo na variação do nível d'água em área de recarga do Aquífero Guarani**. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

HUANG, X. et al. Hydrological natural inflow and climate variables: Time and frequency causality analysis. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, v. 516, p. 480-495, 2019.

IBGE. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – Nosso território: relevo e clima**. Disponível em: <<https://educa.ibge.gov.br/criancas/brasil/nosso-territorio/19634-relevo-e-clima.html>>. Acesso em: abr. 2023.

INMET. **Levantamento da onda de frio que atuou no brasil no final de julho de 2021**. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/uploads/notastecnicas/LEVANTAMENTO_MASSA-DE-

AR-FRIO-FINAL-DE-JULHO_vCGMADP.pdf#page=1&zoom=auto,-100,842>.

Acesso em: mai. 2023.

JOHNSON, Z. C.; JOHNSON, B. G.; BRIGGS, M. A.; DEVINE, W. D.; SNYDER, C. D.; HITT, N. P.; HARE, D. K.; MINKOVA, T. D. Paired air-water annual temperature patterns reveal hydrogeological controls on stream thermal regimes at watershed to continental scales. **Journal of Hydrology**, v. 587, 124929, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124929>

KALBUS, E.; REINSTORF, F.; SCHIRMER, M. Measuring methods for groundwater-surface water interactions: a review. **Hydrology and Earth System Sciences Discussions**, v.10, n. 6, p. 873-887, 2006. <https://doi.org/10.5194/hess-10-873-2006>

KEERY, J.; BINLEY, A.; CROOK, N.; SMITH, J. W. N. Temporal and spatial variability of groundwater-surface water fluxes: Development and application of an analytical method using temperature time series. **Journal of Hydrology**, v. 336, n. 1–2, p. 1–16, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.12.003>

KURYLYK, B. L.; IRVINE, D. J.; BENSE, V. F. Theory, tools, and multidisciplinary applications for tracing groundwater fluxes from temperature profiles. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Water**, v. 6, n. 1, 2018. <https://doi.org/10.1002/wat2.1329>

KURYLYK, B. L.; MACQUARRIE, K. T. B.; CAISSIE, D.; MCKENZIE, J. M. Shallow groundwater thermal sensitivity to climate change and land cover disturbances: derivation of analytical expressions and implications for stream temperature modeling. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 19, p. 2469–2489, 2015. <https://doi.org/10.5194/hess-19-2469-2015>

LAPHAM, W. W. Use of temperature profiles beneath streams to determine rates of vertical ground-water flow and vertical hydraulic conductivity. **U.S. Geol. Surv. Water Supply Pap.** n. 2337, p. 1–35, 1989. <https://doi.org/10.3133/wsp2337>

LEWANDOWSKI, J. et al. Is the Hyporheic Zone Relevant beyond the Scientific Community? **Water**, v. 11, n. 11, p. 2230, 2019. <https://doi.org/10.3390/w11112230>

LEE, A.; AUBENEAU, A. F.; CARDENAS, M. B. The sensitivity of hyporheic exchange to fractal properties of riverbeds. **Water Resources Research**, v. 56, e2019WR026560, 2020. <https://doi.org/10.1029/2019WR026560>

LE LAY, H.; THOMAS, Z.; ROUAULT, F.; PICHELIN, P.; MOATAR, F. Characterization of Diffuse Groundwater Inflows into Streamwater (Part I: Spatial and Temporal Mapping Framework Based on Fiber Optic Distributed Temperature Sensing). **Water**, v. 11, n. 11, p. 2389, 2019. <https://doi.org/10.3390/w11112389>

LOWRY, C. S.; WALKER, J. F.; HUNT, R. J.; ANDERSON, M. P. Identifying spatial variability of groundwater discharge in a wetland stream using a distributed temperature sensor, **Water Resources Research**, v. 43, n. 10, p. 1-9, 2007. <https://doi.org/10.1029/2007WR006145>

LUCE, C. H.; TONINA, D.; GARIGLIO, F.; APPLEBEE, R. Solutions for the diurnally forced advection–diffusion equation to estimate bulk fluid velocity and diffusivity in streambeds from temperature time series. **Water Resources Research**, v. 49, n. 1, p. 488–506, 2013. <https://doi.org/10.1029/2012WR012380>

LUCAS, M. C. **Influência da precipitação e do uso do solo sobre a taxa de recarga em zona de afloramento do Sistema Aquífero Guarani**. 2012. 154 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012. <https://doi.org/10.11606/D.18.2012.tde-31102012-092335>

MACQUEEN, J. Some methods for classification and analysis of multivariate observations. **In: Proceedings of the Fifth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability**, Volume 1: Statistics, p. 281-297, 1967.

MALARD, F.; TOCKNER, K.; DOLE-OLIVIER, M.-J.; WARD, J.V. A landscape perspective of surface–subsurface hydrological exchanges in river corridors. **Freshwater Biology**, v. 47, p. 621-640, 2002. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2427.2002.00906.x>

MALDONADO, L. H. **Validação experimental de metodologias para quantificação contínua de vazão no Ribeirão da Onça**. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009. <https://doi.org/10.11606/D.18.2009.tde-27042010-154503>

MATHESWARAN, K.; BLEMMER, M.; ROSBJERG, D.; BOEGH, E. Seasonal variations in groundwater upwelling zones in a Danish lowland stream analyzed using Distributed Temperature Sensing (DTS). **Hydrological Process**, v. 28, n. 3, p. 1422-1435, 2013. <https://doi.org/10.1002/hyp.9690>

MAXWELL, R. M.; KOLLET, S. J. Interdependence of groundwater dynamics and land-energy feedbacks under climate change. **Nat. Geosci.**, v. 1, 665–669, 2008.

MCCALLUM, A. M.; ANDERSEN, M. S.; RAU, G. C.; ACWORTH, R. I. A 1-D analytical method for estimating surface water–groundwater interactions and effective thermal diffusivity using temperature time series. **Water Resources Research**, v. 48, n. 11, p. 1-8, 2012. <https://doi.org/10.1029/2012WR012007>

MCGRAW, M. C.; BARNES, E. A. Memory Matters: A for Granger Causality in Climate Variability Studies. **Journal of Climate**, v. 31, p. 3289-3300, 2018.

MELO, D. C. D.; CABRERA, M. C. M.; WENDLAND, E. Balanço Hídrico e modelagem subterrânea visando estimar recarga subterrânea. **Águas Subterrâneas**, v. 31, n.1, p. 66-78, 2017. <https://doi.org/10.14295/ras.v31i1.28656>

MEIRA NETO, A. A.; MELO, D. C. D.; WENDLAND, E. C. Bacia representativa em região de afloramento do Aquífero Guarani. In: ABRH (Org.), **XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos** (pp. 1-20). Porto Alegre: ABRH, 2011.

MILANI, D. M. **Análise da interação rio-aquífero em bacias hidrográficas e desenvolvimento de modelo numérico tridimensional**. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1990.

NIMER, E. Um modelo metodológico de classificação de climas. **Revista Brasileira de Geografia**, Rio de Janeiro: IBGE, v. 41, n. 4, p. 59-89, out./dez. 1979. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/115/rbg_1979_v41_n4.pdf>. Acesso em: abr. 2023. Adaptado.

NGWA. **Groundwater Temperature's Measurement and Significance**. Disponível em: <https://www.ngwa.org/what-is-groundwater/About-groundwater/groundwater-temperature's-measurement-and-significance>. Acesso em jun. 2023.

NOURANI, V.; GHANEELI, P.; KANTOUSH, S.A. Robust Clustering for Assessing the Spatiotemporal Variability of Groundwater Quantity and Quality. **Journal of Hydrology**, v. 604, p. 127272, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127272>

PAPAGIANNONOPOULOU, C. et al. A non-linear Granger-causality framework to investigate climate-vegetation dynamics. **Geoscientific Model Development**, v. 10, n. 5, p. 1945-1960, 2017.

POMPEO, C. A. **Balanço hídrico da zona não-saturada do solo na Bacia do Ribeirão da Onça**. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1990.

REIS, A.; MARTINS, R. T. A. A.; BERTOTTO, L. E.; COBALCHINI, E. R. O.; ISHIZAWA, Y. B.; WENDLAND, E. C. Experimental and representative watersheds as a training site of qualified professionals in water resources: a case study of Onça Creek Watershed (SP, Brazil). **Brazilian Journal of Water Resources**, v. 27, 2022. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.272220220040>

REIS, A.; ROSA, D. M. S. ; ALCANTARA, G. M. ; ANACHE, J. A. A. ; WENDLAND, E. . Estimativa das taxas de interação rio-aquífero, por meio de medições pontuais de gradientes de temperatura. In: **XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, 2019, Foz do Iguaçu/PR. Anais do XXIII SBRH - Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2019.

RICHTS, A.; STRUCKMEIER, W.; ZAEPKE, M. WHYMAP and the groundwater resources of the world 1:25,000,000. In J. Jones (Ed.), **Sustaining groundwater resources** (pp. 159-173, International Year of Planet Earth). Dordrecht: Springer, 2011. https://doi.org/10.1007/978-90-481-3426-7_10

ROSA, D. M. S. **Interação rio-aquífero: um estudo de caso na bacia do Ribeirão da Onça**. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018. <https://doi.org/10.11606/D.18.2019.tde-29052019-151558>

SAAR, M. O. Review: Geothermal heat as a tracer of large-scale groundwater flow and as a means to determine permeability fields. **Hydrogeology Journal**, v.19, n. 1, p. 31–52, 2011. <https://doi.org/10.1007/s10040-010-0657-2>

SAYDE, C.; GREGORY, C.; GIL-RODRIGUEZ, M.; TUFILLARO, N.; TYLER, S.; VAN DE GIESEN, N.; ENGLISH, M.; CUENCA, R.; SELKER, J. S. Feasibility of soil moisture monitoring with heated fiber optics. **Water Resources Research**, v. 46, 2010. <https://doi.org/10.1029/2009WR007846>

SCHENATO, L. A Review of Distributed Fiber Optic Sensors for Geo-Hydrological Applications. **Applied Sciences**, v. 7, n. 9, p. 896, 2017. <https://doi.org/10.3390/app7090896>

SCIKIT-LEARN. **K-Means Documentation**. Disponível em: <<https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.cluster.KMeans.html>>. Acesso em: mai. 2023a.

SCIKIT-LEARN. **Agglomerative Clustering Documentation**. Disponível em: <<https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.cluster.AgglomerativeClustering.html>>. Acesso em: mai. 2023

SELKER, J. S.; VAN DE GIESEN, N.; WESTHOFF, M.; PARLANGE, M. B.; LUXEMBURG, W. Fiber optics opens window on stream dynamics. **Geophysical Research Letters**, v. 33, 2006a. <https://doi.org/10.1029/2006GL027979>

SELKER, J. S.; THEVENAZ, L.; HUWALD, H.; MALLET, A.; LUXEMBURG, W.; VAN DE GIESEN, N.; STEJSKAL, M.; ZEMAN, J; WESTHOFF, M; PARLANGE, M. B. Distributed fiber-optic temperature sensing for hydrologic systems, **Water Resources Research**, v. 42, W12202, 2006b. <https://doi.org/10.1029/2006WR005326>

SHARGHI, E.; NOURANI, V.; ZHANG, Y.; GHANEEI, P. Conjunction of Cluster Ensemble-Model Ensemble Techniques for Spatiotemporal Assessment of Groundwater Depletion in Semi-Arid Plains. **Journal of Hydrology**, v. 610, p. 127984, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127984>

SHEEHAN, D. **Clustering with Scikit with GIFs**. Disponível em: <<https://dashee87.github.io/data%20science/general/Clustering-with-Scikit-with-GIFs/>>. Acesso em: mai. 2023.

SILIXA. **XT – DTS: Ruggedised Distributed Temperature Sensor**. Disponível em: <<https://silixa.com/products/xt-dts/>>. Acesso em: abr. 2023.

SIMON, N.; BOUR, O.; FAUCHEUX, M.; LAVENANT, N.; LE LAY, H.; FOVET, O.; THOMAS, Z.; LONGUEVERGNE, L. Combining passive and active distributed temperature sensing measurements to locate and quantify groundwater discharge variability into a headwater stream. **Hydrol. Earth Syst. Sci.**, v. 26, p. 1459–1479, 2022. <https://doi.org/10.5194/hess-26-1459-2022>

SINGH, N. K.; BORROK, D. M. A Granger causality analysis of groundwater patterns over a half-century. **Scientific Reports**, v. 9, n. 1, p. 1-8, 2019.

SOPHOCLEOUS, M. Interactions between groundwater and surface water: the state of science. **Hydrogeology Journal**, v.1, n. 10, p. 52-67. 2002. <https://doi.org/10.1007/s10040-001-0170-8>

STALLMAN, R. W. Steady one-dimensional fluid flow in a semi-infinite porous medium with sinusoidal surface temperature. **Journal of Geophysical**, v. 70, n. 12, p. 2821-2827, 1965. <https://doi.org/10.1029/JZ070i012p02821>

STASMODELS. Granger Causality Test. Disponível em: <<https://www.statsmodels.org/dev/generated/statsmodels.tsa.stattools.grangercausalitytests.html>>. Acesso em: maio 2023.

STEELE-DUNNE, S. C.; RUTTEN, M. M.; KRZEMINSKA, D. M.; HAUSNER, M.; TYLER, S. W.; SELKER, J.; BOGAARD, T. A.; VAN DE GIESEN, N. C. Feasibility of soil moisture estimation using passive distributed temperature sensing. **Water Resources Research**, v. 46, 2010. <https://doi.org/10.1029/2009WR008272>

STRIEGL, A. M.; LOHEIDE, S. P. Heated Distributed Temperature Sensing for Field Scale Soil Moisture Monitoring. **Groundwater**, v. 50, n. 3. p. 340-347, 2012. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2012.00928.x>

SUZUKI, S. Percolation measurements based on heat flow through soil with special reference to paddy field. **Journal of Geophysical Research**, v. 65, n. 9, p. 2883–2885, 1960. <https://doi.org/10.1029/JZ065i009p02883>

THOMPSON, T. J. et al. Groundwater discharges as a source of phytoestrogens and other agriculturally derived contaminants to streams. **Sci. Total Environ.**, v. 755, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142873>

TYLER, S. W.; SELKER, J.S.; HAUSNER, M. B.; HATCH, C. E.; TORGERSEN, T.; THODAL, C. E.; SCHLADOW, S. G. Environmental temperature sensing using Raman spectra DTS fiber-optic methods. **Water Resources Research**, v. 45, n. W00D23, 2009. <https://doi.org/10.1029/2008WR007052>

UCHÔA, J. G. S. M.; REIS, A. ; AYLLON, J. A. C. ; ABRAHAO, D. P. ; BERTOTTO, L. E. ; CUNHA, D. G. F. ; CORBI, J. J. ; WENDLAND, E. C. . A Holistic Perspective on Tropical Hyporheic Zones: Integrating Natural Tracers and Bioindicators for Comprehensive Characterization. **In: VII Congresso Internacional de Meio Ambiente Subterrâneo**, 2023, São Paulo. VII Congresso Internacional de Meio Ambiente Subterrâneo, 2023. v. 1.

WARD, A. The evolution and state of interdisciplinary hyporheic research. **WIREs Water**. v.3, p. 83–103, 2016. <https://doi.org/10.1002/wat2.1120>

WENDLAND, E. C.; BARRETO, C.; GOMES, L. H. Water balance in the Guarani Aquifer outcrop zone based on hydrological monitoring. **Journal of Hydrology**, v. 342, p. 261-269, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.05.033>

WENDLAND, E. C.; REIS, A.; ANACHE, J. A. A.; ROSA, D. M. S.; ALCANTARA, G. M.; LOWRY, C. S.; LIN, Y.F. Identifying stream-aquifer exchange by temperature gradient in a Guarani Aquifer System outcrop zone. **Brazilian Journal of Water Resources**, v. 27, 2022. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.272220220058>

WINTER, T. C.; HARVEY, J. W.; FRANKE, O. L.; ALLEY, W. M. **Groundwater and Surface Water: a single resource**. United States Geological Survey Circular 1139. 1999. <https://doi.org/10.3133/cir1139>

VAN DE GIESEN, N.; STEELE-DUNNE, S. C.; JANSEN, J.; HOES, O.; HAUSNER, M. B.; TYLER, S.; SELKER, J. Double-Ended Calibration of Fiber-Optic Raman Spectra Distributed Temperature Sensing Data. **Sensors**, v. 12, p. 5471-5485, 2012. <https://doi.org/10.3390/s120505471>

YAN, J.F.; SHI, B.; ZHU, H.; WANG, B.J.; WEI, G. Q.; CAO, D. F. A quantitative monitoring technology for seepage in slopes using DTS. **Engineering Geology**, v. 186, p. 100–104, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.01.001>

YAO, Y.; HUANG, X.; LIU, J.; ZHENG, C.; HE, X.; LIU, C. Spatiotemporal variation of river temperature as a predictor of groundwater/surface-water interactions in an arid watershed in China. **Hydrogeology Journal**, v. 23, p. 999–1007, 2015. <https://doi.org/10.1007/s10040-015-1265-y>

YIN, J.; MEDELLÍN-AZUARA, J.; ESCRIVA-BOU, A. Groundwater Levels Hierarchical Clustering and Regional Groundwater Drought Assessment in Heavily Drafted Aquifers. **Hydrology Research**, v. 53, p. 1031–1046, 2022. <https://doi.org/10.2166/nh.2022.048>

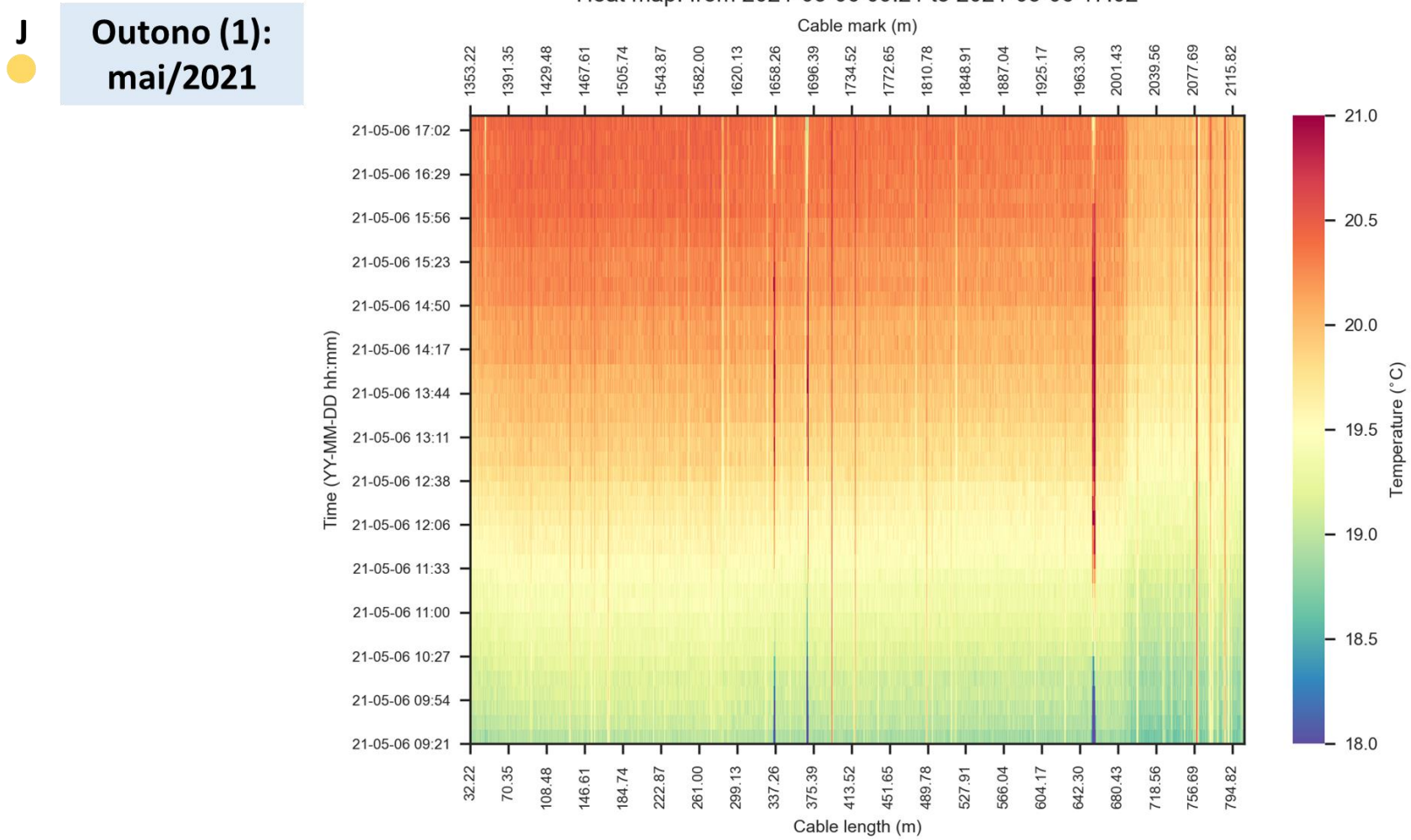
APÊNDICE A – HEATMAPS PRODUZIDOS A PARTIR DOS DADOS DE TEMPERATURA MONITORADOS

Este apêndice apresenta os heatmaps produzidos a partir dos dados de temperatura da água monitorados, nas diferentes campanhas realizadas (Figura A-1 a Figura A-11). Tais imagens foram apresentadas no Capítulo 5, em tamanho reduzido (Figura 20 e Figura 21), a fim de reduzir o espaço ocupado no corpo do texto e possibilitando a discussão dos resultados. Nesta seção, tais imagens são mostradas de forma ampliada, possibilitando ao leitor a melhor visualização dos dados e das informações exibidas no eixos coordenados.

Para facilitar a compreensão das imagens, o leitor possui diferentes elementos junto aos heatmaps:

- Além da indicação na legenda das imagens, é possível observar na parte superior esquerda das imagens a qual campanha os dados exibidos correspondem, indicados pelo texto nos retângulos coloridos. O trecho de fibra ótica no qual a medição foi realizada também é indicado nesta região, pela letra J para jusante ou pela letra M para montante, em conjunto com um círculo colorido, indicativo da região mostrada no mapa da Figura 9.
- Na parte superior dos mapas de calor, no título da imagem, também é possível observar os períodos inicial e final nos quais os dados são exibidos nas imagens. Nas três primeiras campanhas (Outono (1), Inverno (1) e Inverno (2)), foram escolhidos dias específicos para a exibição nos resultados, considerando a descontinuidade dos dados. Já nas campanhas finais (Primavera, Verão, Outono (2)), todo o período de medição foi exibido, uma vez que os dados apresentavam continuidade temporal.
- A abcissa dos gráficos correspondem ao comprimento da fibra ótica, em metros, enquanto a ordenada corresponde a data e hora da medição. Um eixo x secundário, localizado na parte superior, indica a marcação numérica existente no trecho de cabo, que facilita a identificação das regiões em campo. As cores são indicativas dos valores de temperatura obtidos na campanha, cujas faixas podem ser identificadas pela barra de cores, na lateral direita do gráfico. Os intervalos de temperatura variam de gráfico para gráfico, considerando a variação dos valores ao longo do ano monitorado.

Figura A-1 – Heatmap, para o trecho de jusante, com dados monitorados no dia 06 de maio de 2021, que se incluem na campanha Outono (1)

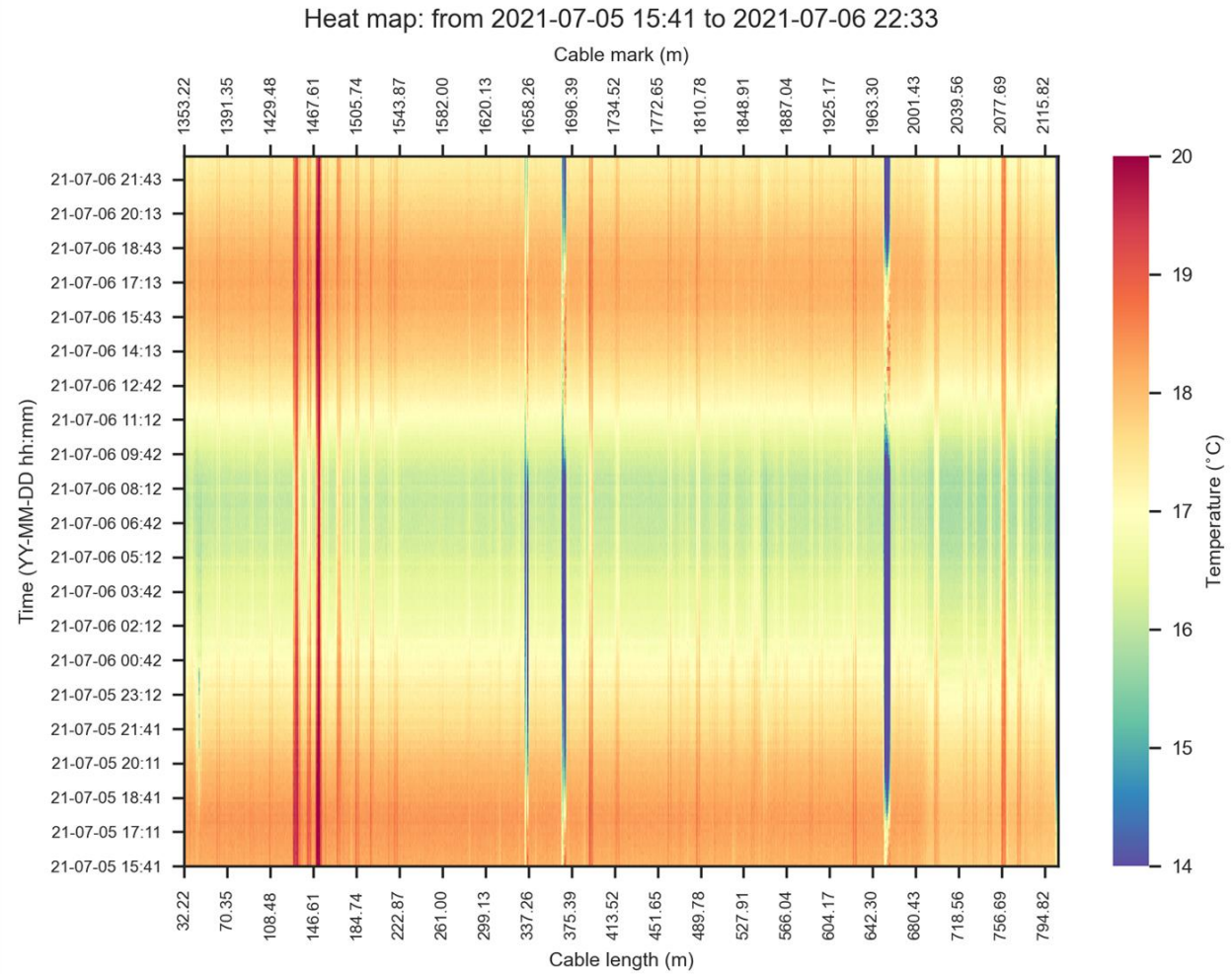


Fonte: Autor (2023)

Figura A-2 – Heatmap, para o trecho de jusante, com dados monitorados entre os dias 05 e 07 de julho de 2021, que se incluem na campanha Inverno (1)

J ●

**Inverno (1):
jul/2021**

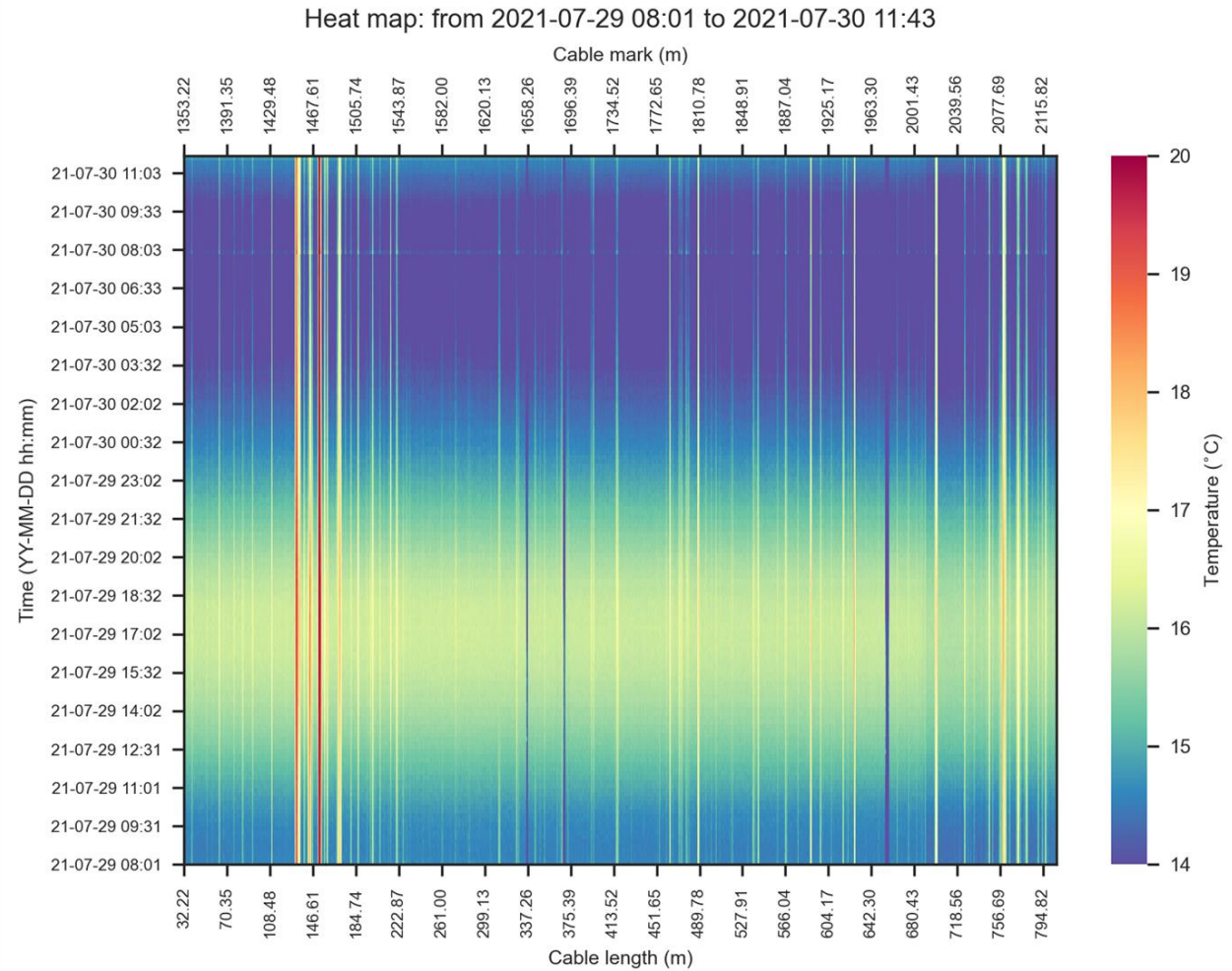


Fonte: Autor (2023)

Figura A-3 – Heatmap, para o trecho de jusante, com dados monitorados entre os dias 29 e 30 de julho de 2021, que se incluem na campanha Inverno (2)

J ●

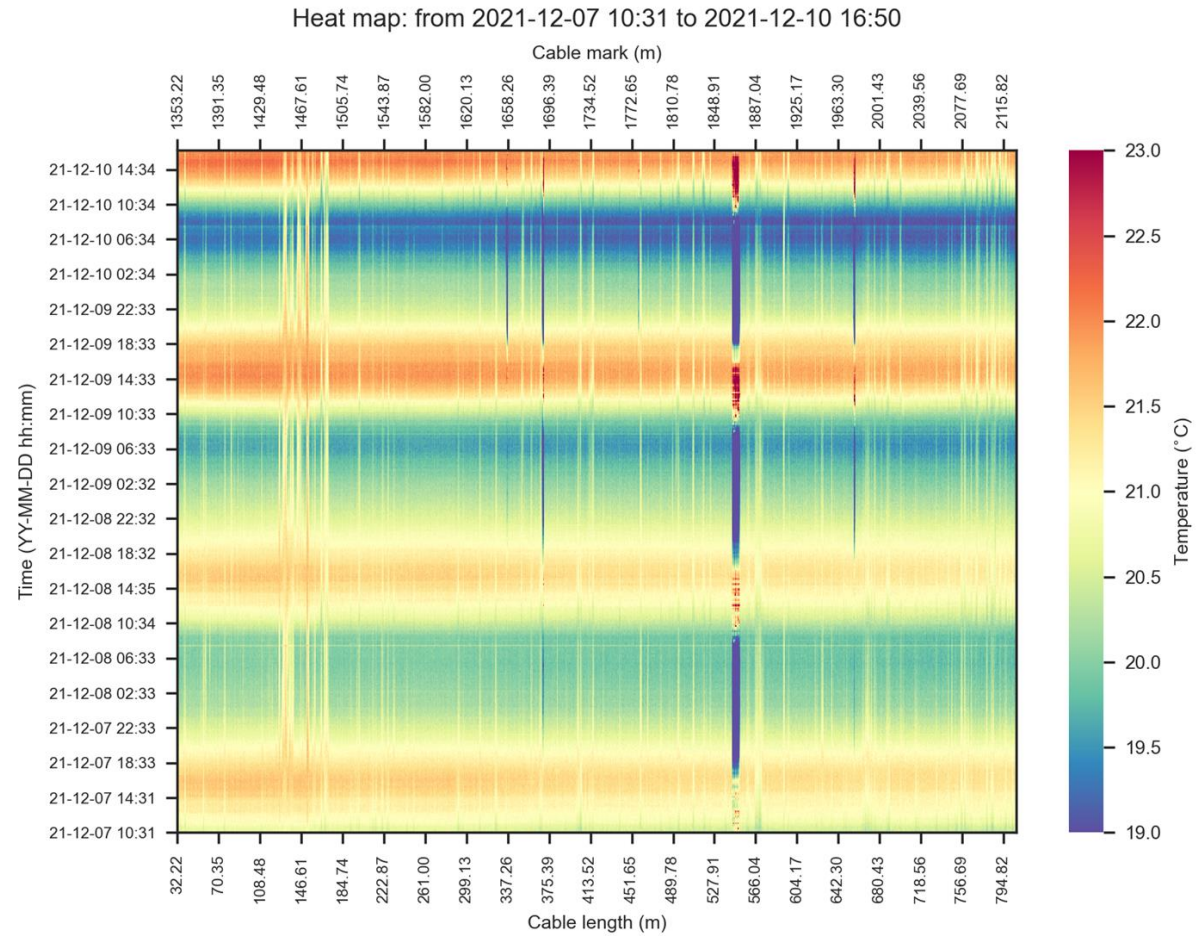
**Inverno (2):
jul/2021**



Fonte: Autor (2023)

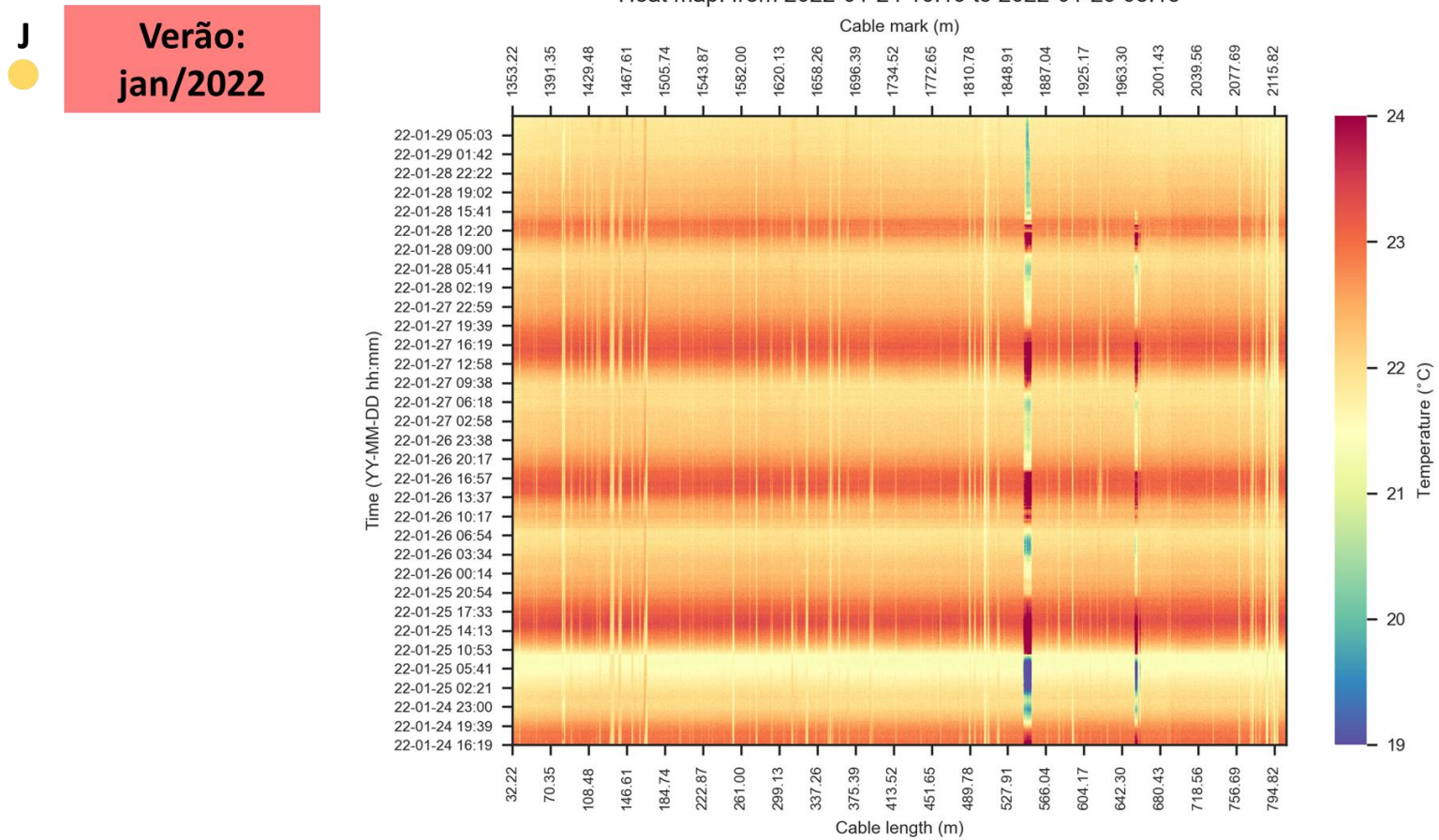
Figura A-4 – Heatmap, para o trecho de jusante, com dados monitorados entre os dias 07 e 10 de dezembro de 2021, que se incluem na campanha de Primavera

J
Primavera:
dez/2021



Fonte: Autor (2023)

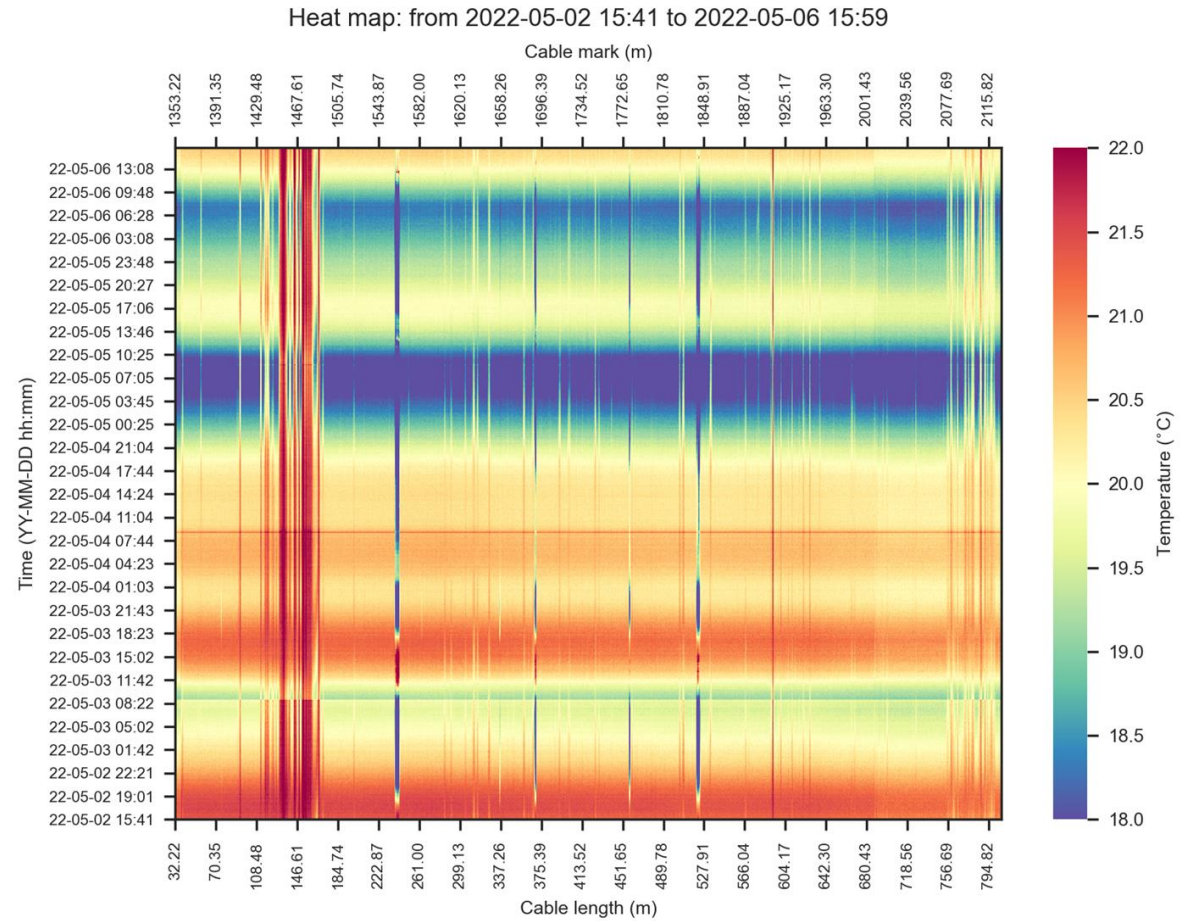
Figura A-5 – Heatmap, para o trecho de jusante, com dados monitorados entre os dias 24 e 29 de dezembro de 2022, que se incluem na campanha de Verão



Fonte: Autor (2023)

Figura A-6 – Heatmap, para o trecho de jusante, com dados monitorados entre os dias 24 e 29 de dezembro de 2022, que se incluem na campanha de Outono (2)

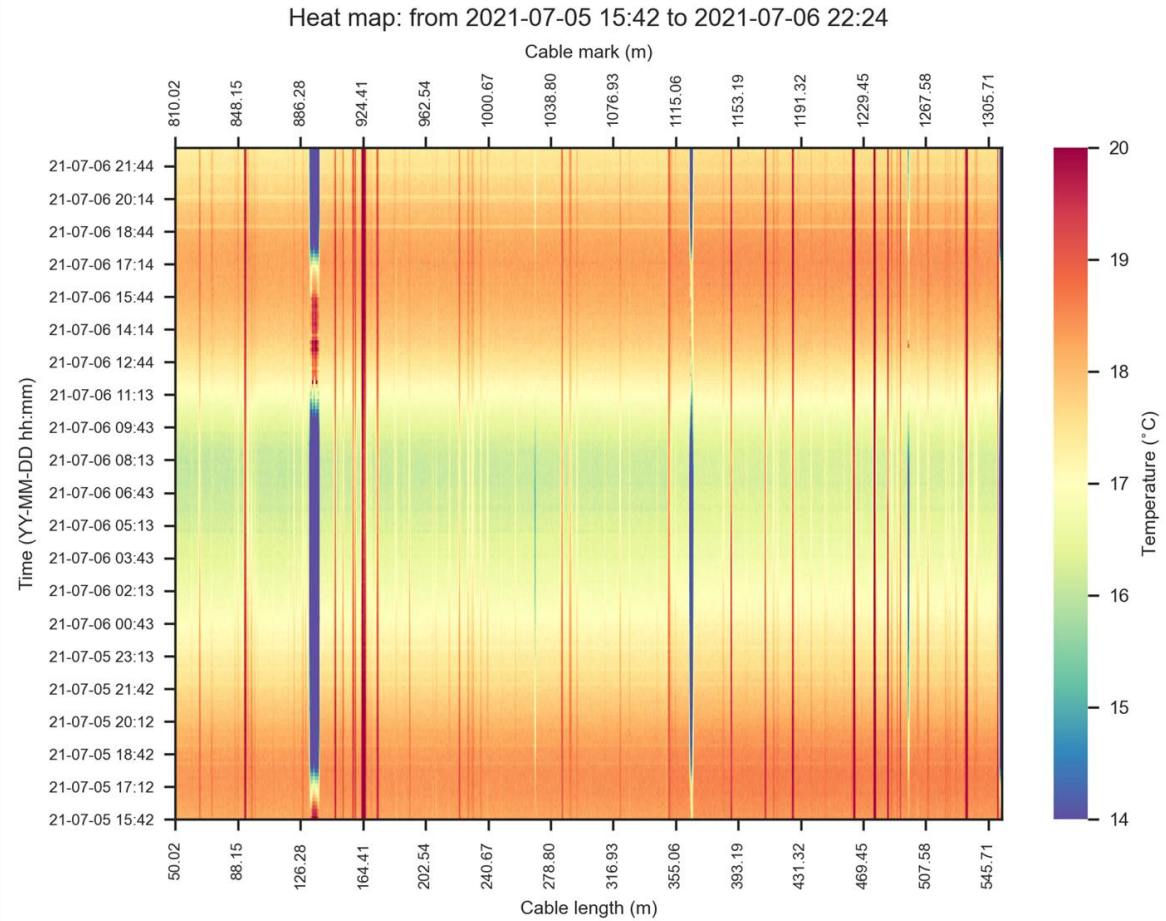
J
● **Outono (2):
 mai/2022**



Fonte: Autor (2023)

Figura A-7 – Heatmap, para o trecho de montante, com dados monitorados entre os dias 05 e 06 de julho de 2021, que se incluem na campanha de Inverno (1)

M
● **Inverno (1):
jul/2021**

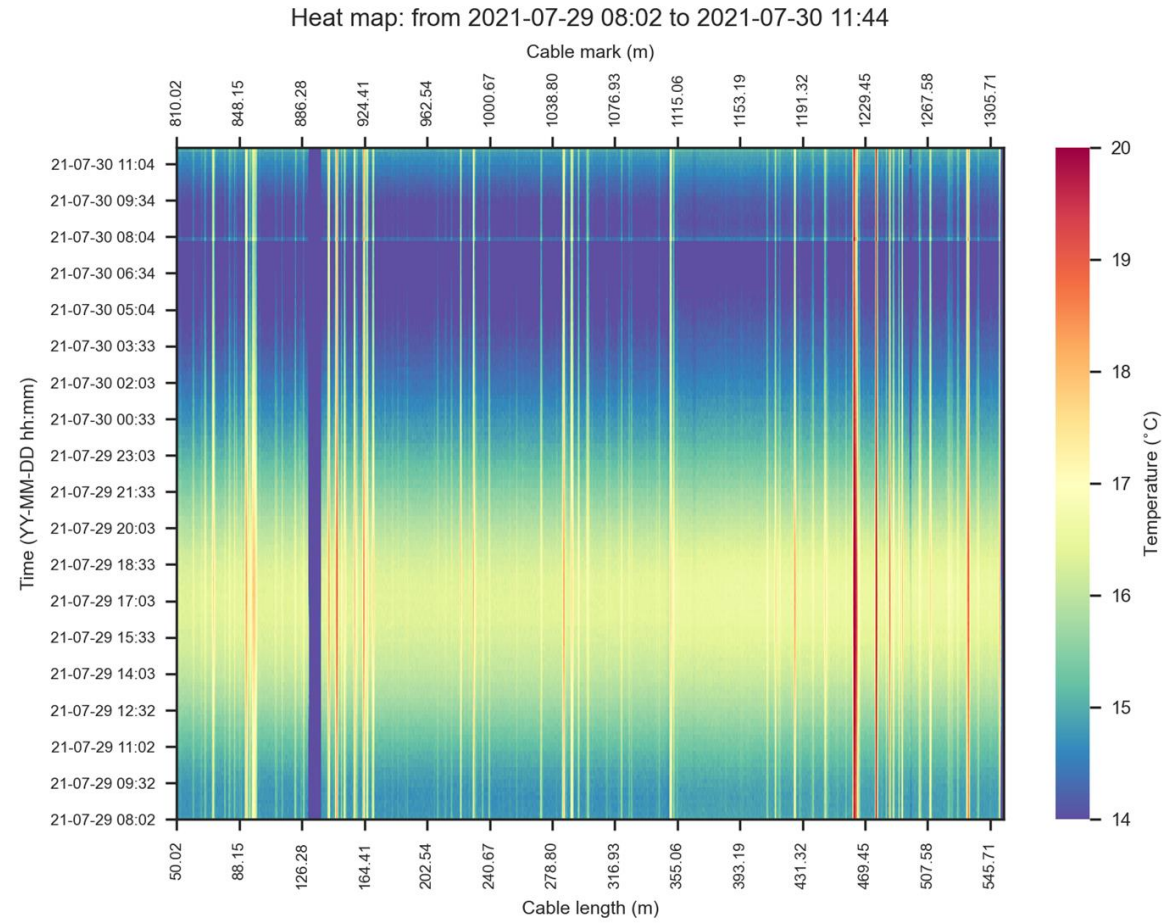


Fonte: Autor (2023)

Figura A-8 – Heatmap, para o trecho de montante, com dados monitorados entre os dias 29 e 30 de julho de 2021, que se incluem na campanha de Inverno (2)

M
●

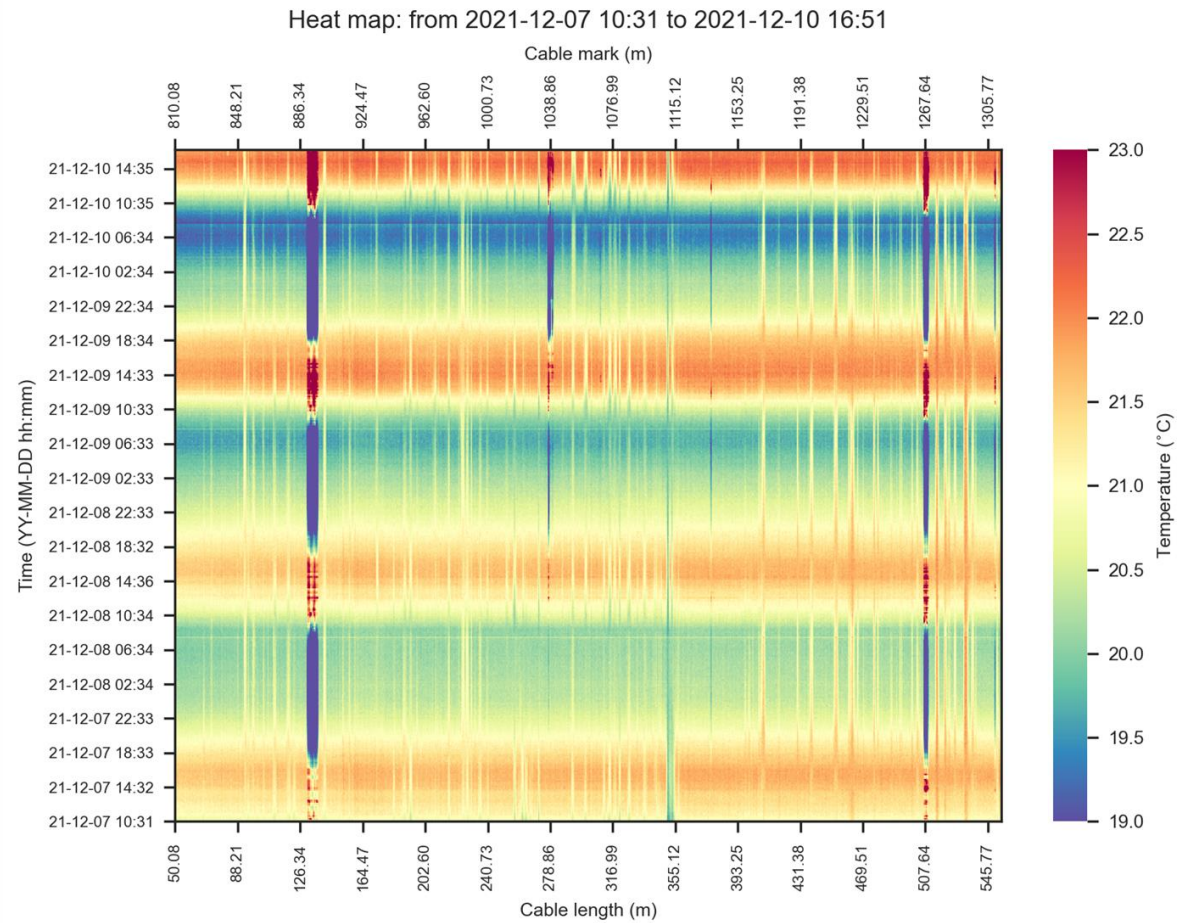
**Inverno (2):
jul/2021**



Fonte: Autor (2023)

Figura A-9 – Heatmap, para o trecho de montante, com dados monitorados entre os dias 07 e 10 de dezembro de 2021, que se incluem na campanha de Primavera

M
● Primavera:
dez/2021

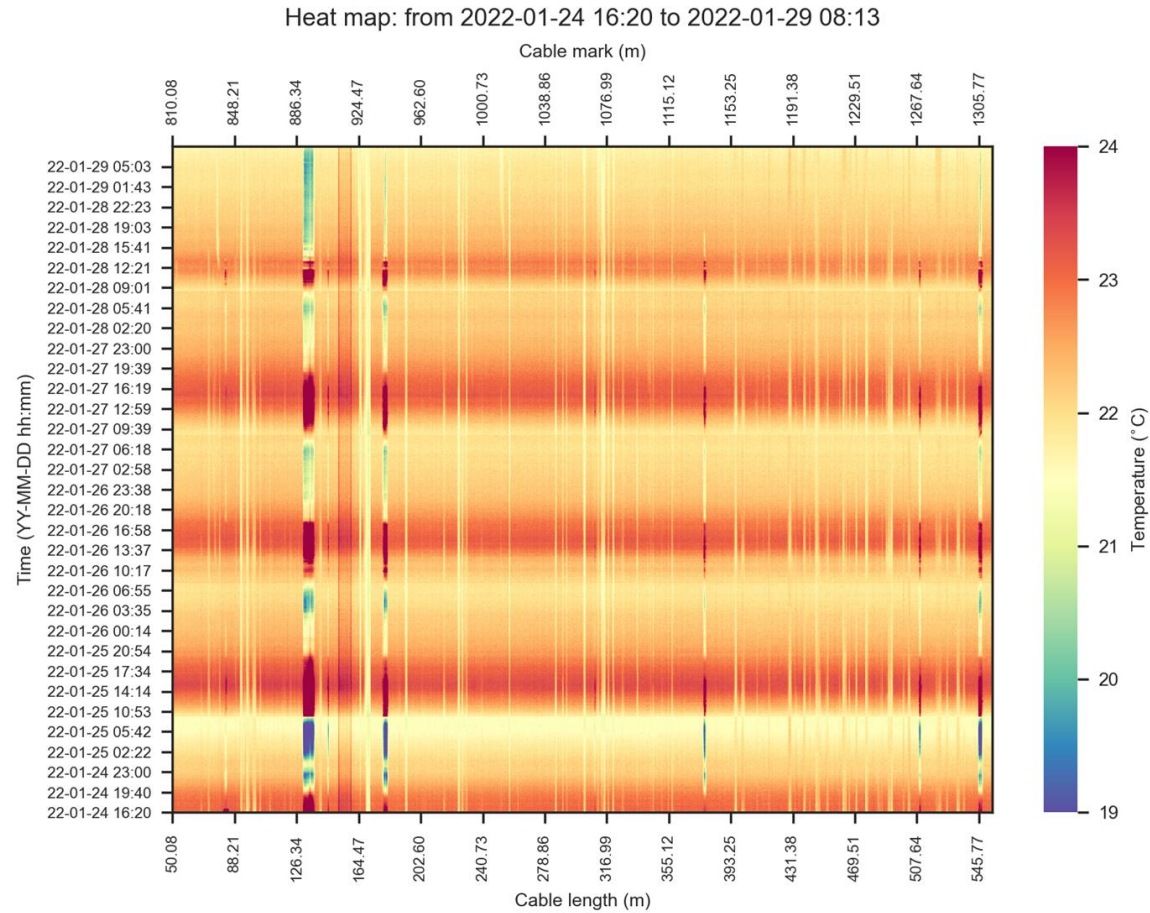


Fonte: Autor (2023)

Figura A-10 – Heatmap, para o trecho de montante, com dados monitorados entre os dias 24 e 29 de janeiro de 2022, que se incluem na campanha de Verão

M
●

**Verão:
jan/2022**

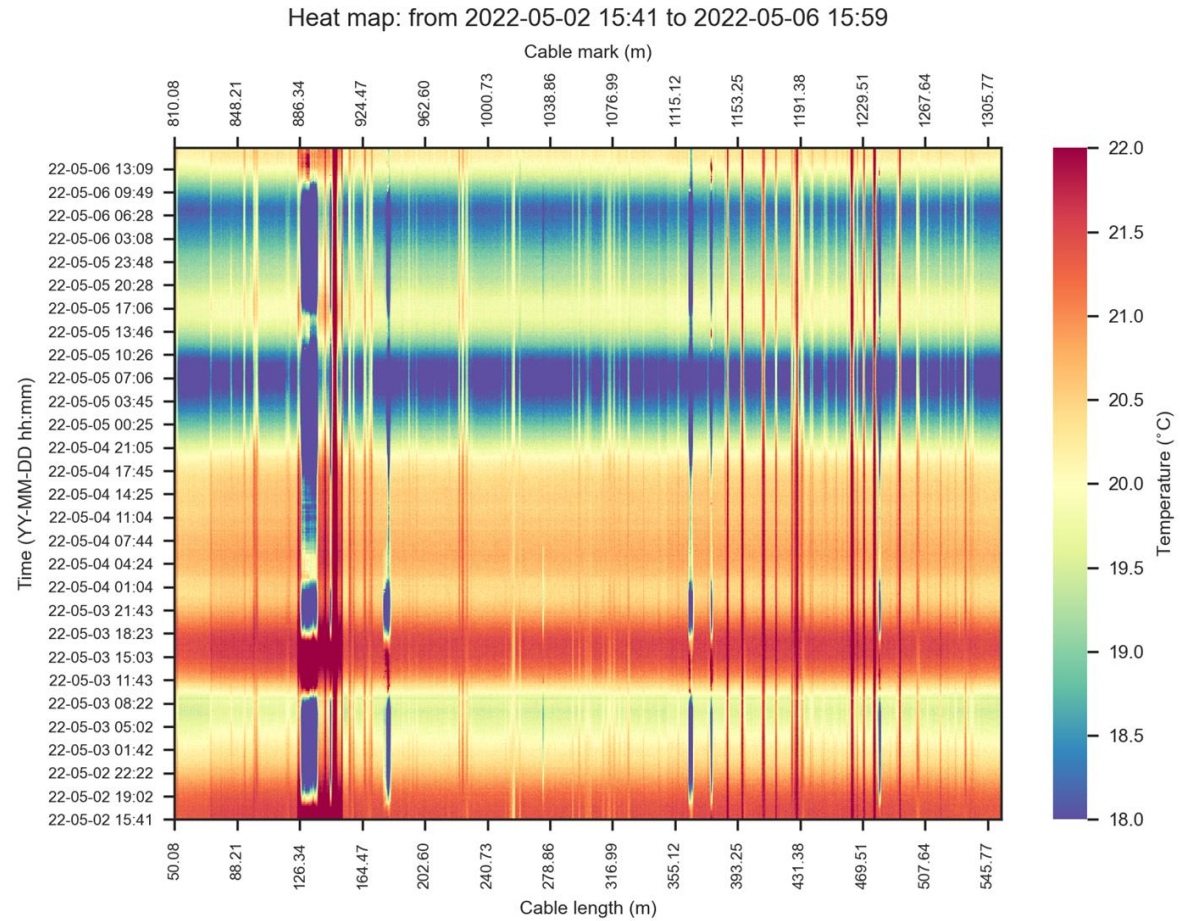


Fonte: Autor (2023)

Figura A-11 – Heatmap, para o trecho de montante, com dados monitorados entre os dias 02 e 06 de maio de 2022, que se incluem na campanha Outono (2)

M
●

**Outono (2):
mai/2022**



Fonte: Autor (2023)

APÊNDICE B – GRÁFICOS DE LINHA AMPLIADOS

Este apêndice apresenta os gráficos de linha utilizados para comparação entre as diferentes estações do ano, apresentados no Capítulo 5 (Figura 22 e Figura 23) em formato ampliado (Figuras B-1 a B-10). Apesar de já terem sido apresentados no texto em tamanho reduzido, a versão ampliada permite ao leitor uma melhor visualização dos dados e das informações exibidas no eixos coordenados.

As referidas figuras (Figuras B-1 a B-10) são apresentadas de forma separada para cada um dos trechos de cabo de fibra ótica (montante ou jusante), cuja identificação é mostrada na parte central direita dos gráficos, pelas iniciais e pelo círculo colorido indicativo do trecho. Os horários exibidos nos gráficos são 0h, 4h, 9h, 13h e 17h e foram assim escolhidos, em virtude de sua repetição nas campanhas realizadas, o que favorece a comparação proposta. A campanha Outono (1) não levantou dados noturnos e por isso não é representada nos gráficos dos horários contidos neste período. Além disso, nessa mesma campanha, não houveram medições no trecho de montante.

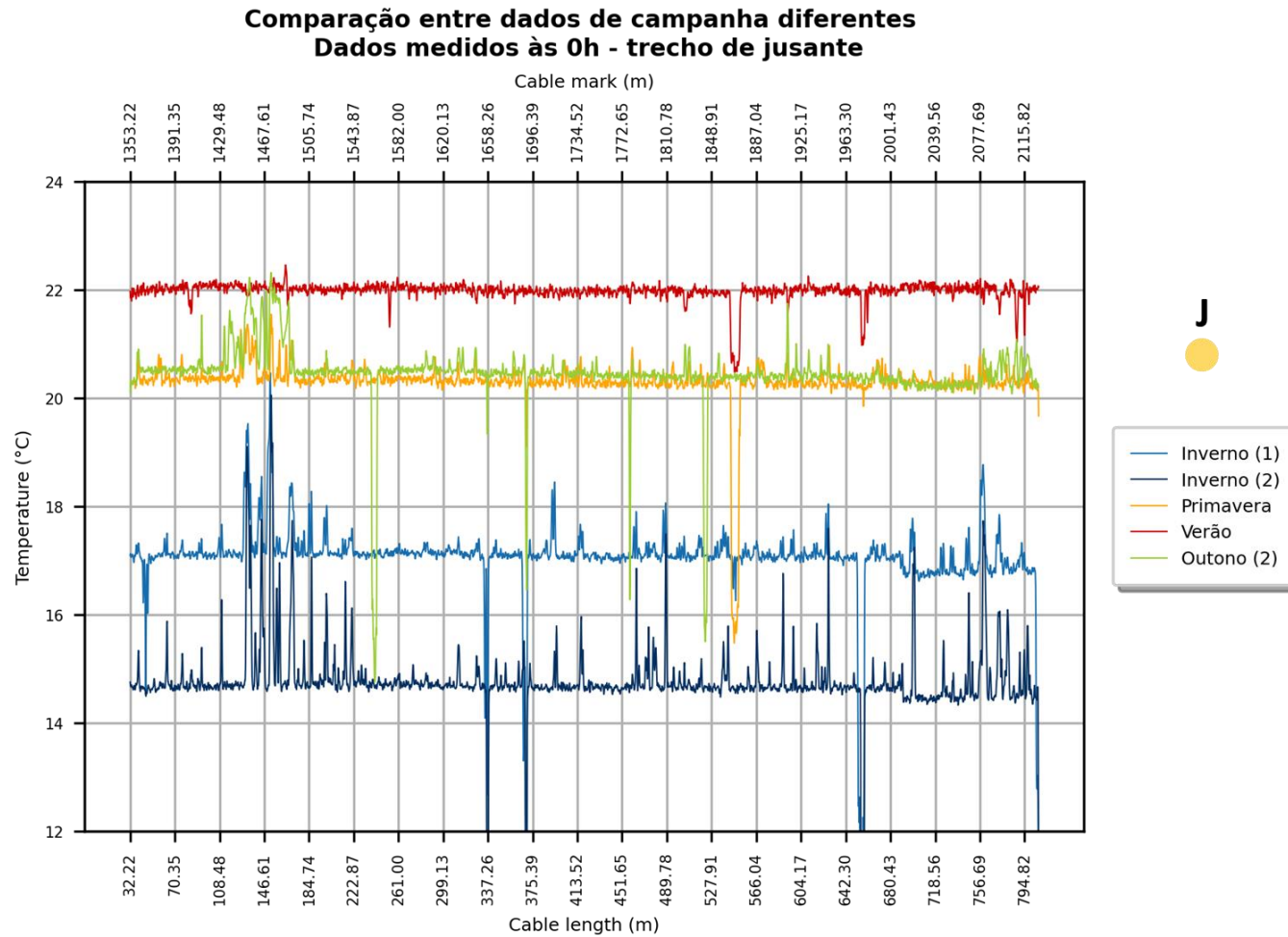
É importante ressaltar que para cada uma das campanhas de monitoramento realizadas, foram escolhidos dias específicos, representativos daquela estação, para a apresentação dos dados. Os horários em que tais dados foram medidos são informados na Tabela B-1 e são próximos aos informados nas legendas dos gráficos. Essa aproximação não causa prejuízo às análises realizadas, uma vez que não ocorrem mudanças bruscas na temperatura da água, em intervalos de tempo muito pequenos.

Tabela B-1 – Datas e horários dos dados apresentados na Figura 22, na Figura 23 e nas figuras deste apêndice

	Outono (1)	Inverno (1)	Inverno (2)	Primavera	Verão	Outono (2)
Data	05-05-21	06-07-21	30-07-21	08-12-21	25-01-22	03-05-22
0h	---	00:02	00:02	23:57	00:01	00:01
4h	---	04:02	04:02	03:57	04:01	04:02
9h	09:00	09:02	09:03	08:57	09:01	09:02
13h	12:59	13:03	13:01	12:59	13:03	13:02
17h	16:59	17:03	17:02	16:56	17:03	17:03

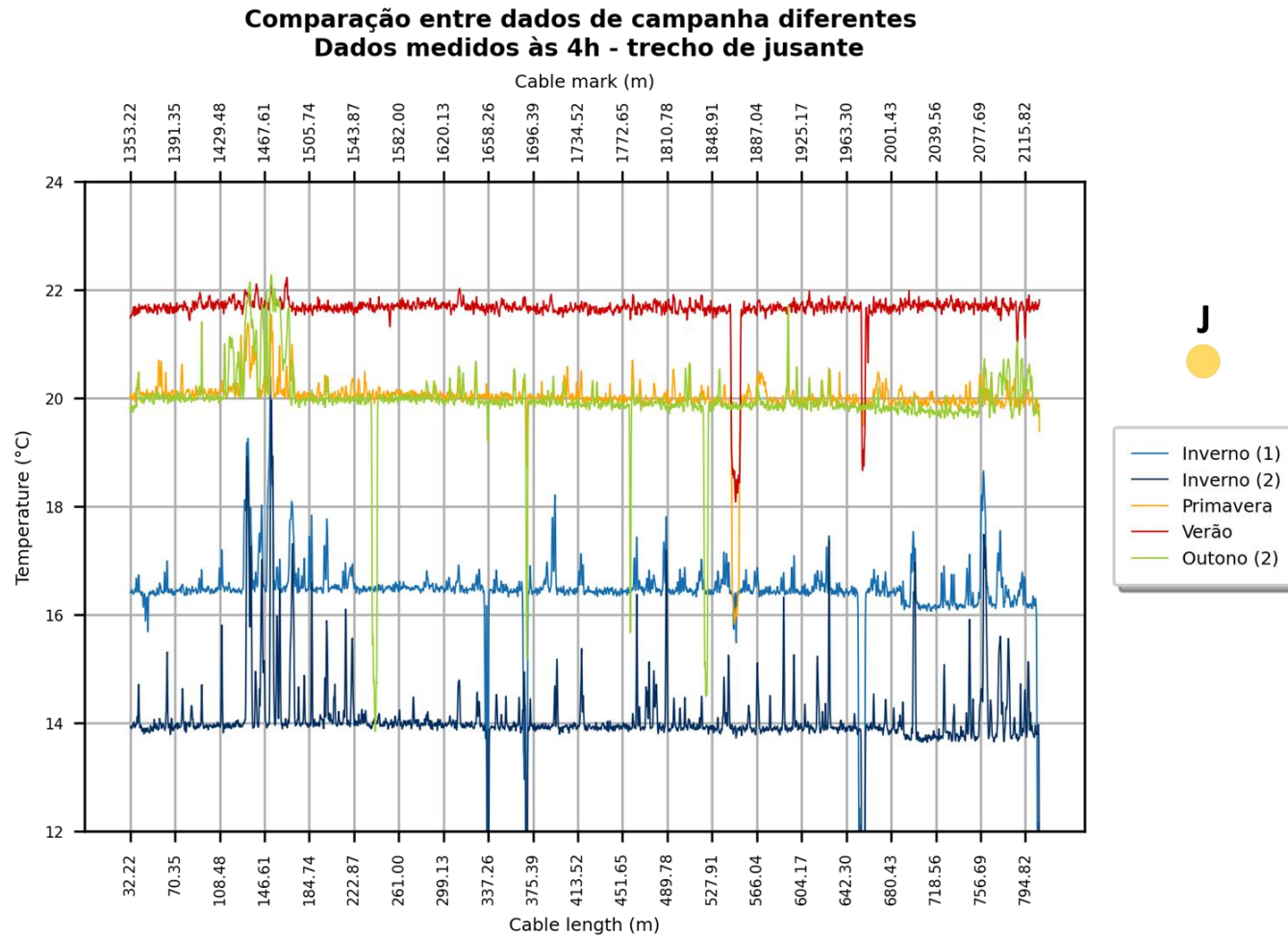
Fonte: Autor (2023)

Figura B-1 – Comparação dos dados de temperatura monitorados, às 0h, em diferentes estações, para o trecho de jusante



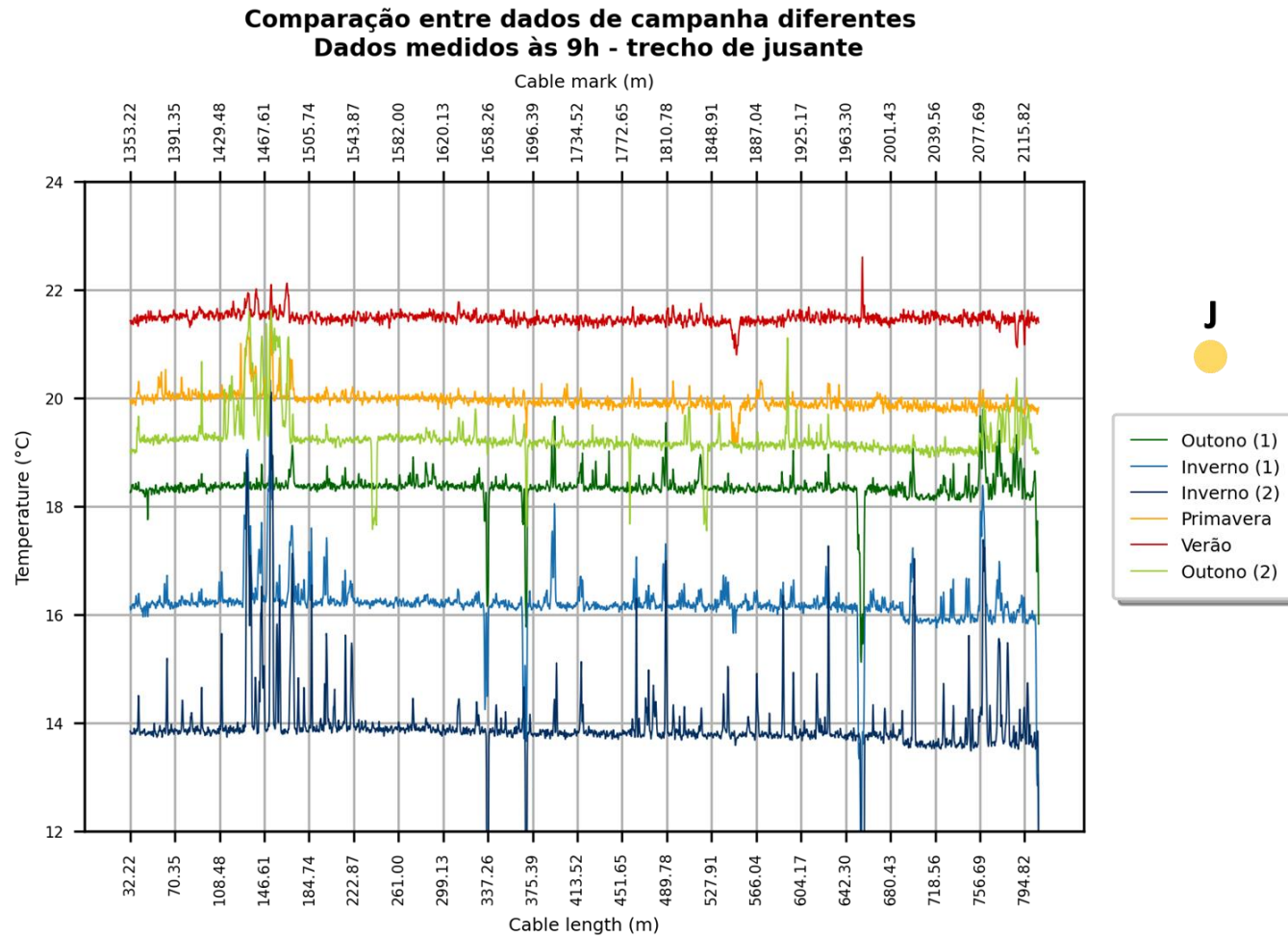
Fonte: Autor (2023)

Figura B-2 – Comparação dos dados de temperatura monitorados, às 4h, em diferentes estações, para o trecho de jusante



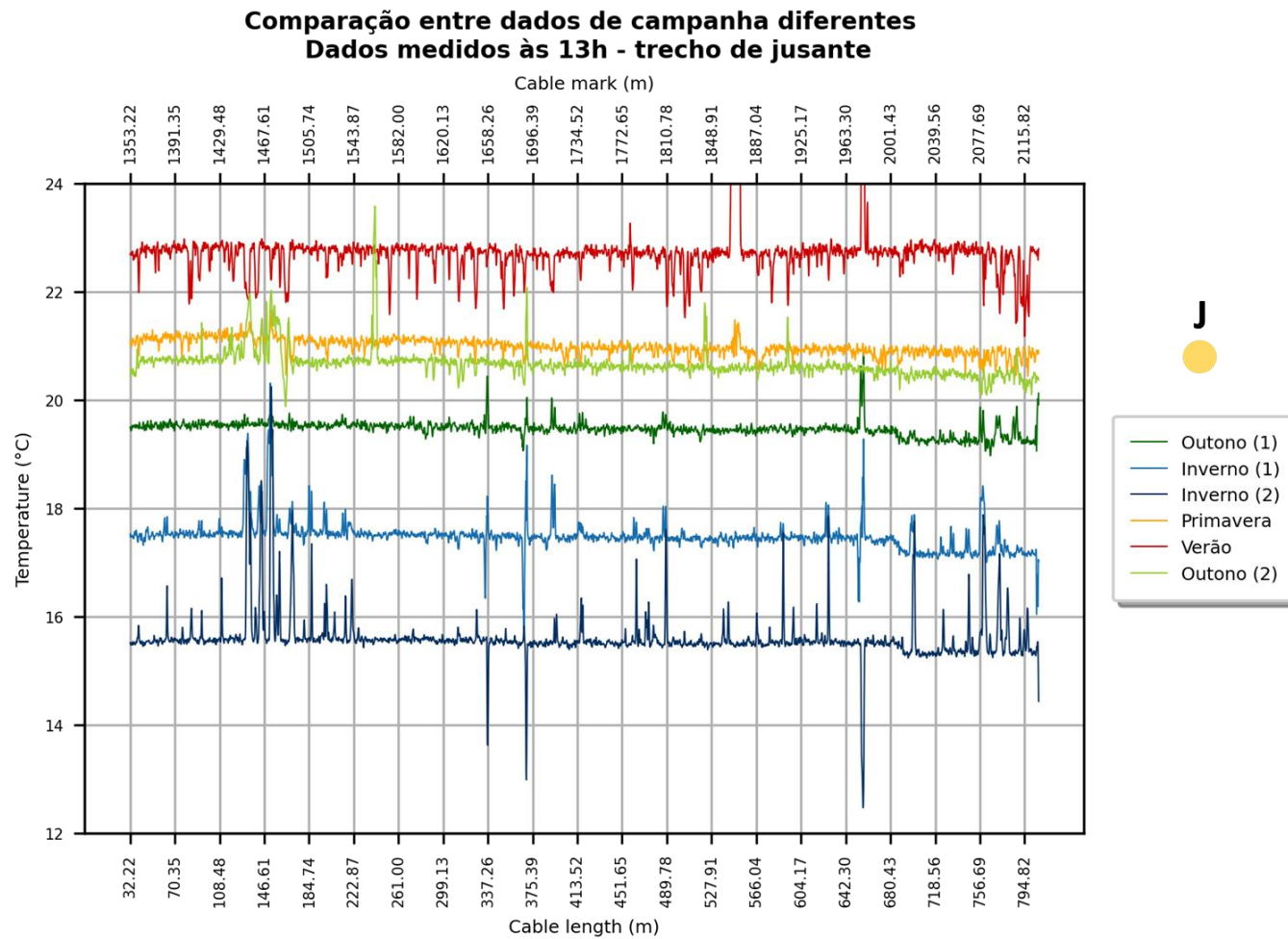
Fonte: Autor (2023)

Figura B-3 – Comparação dos dados de temperatura monitorados, às 9h, em diferentes estações, para o trecho de jusante



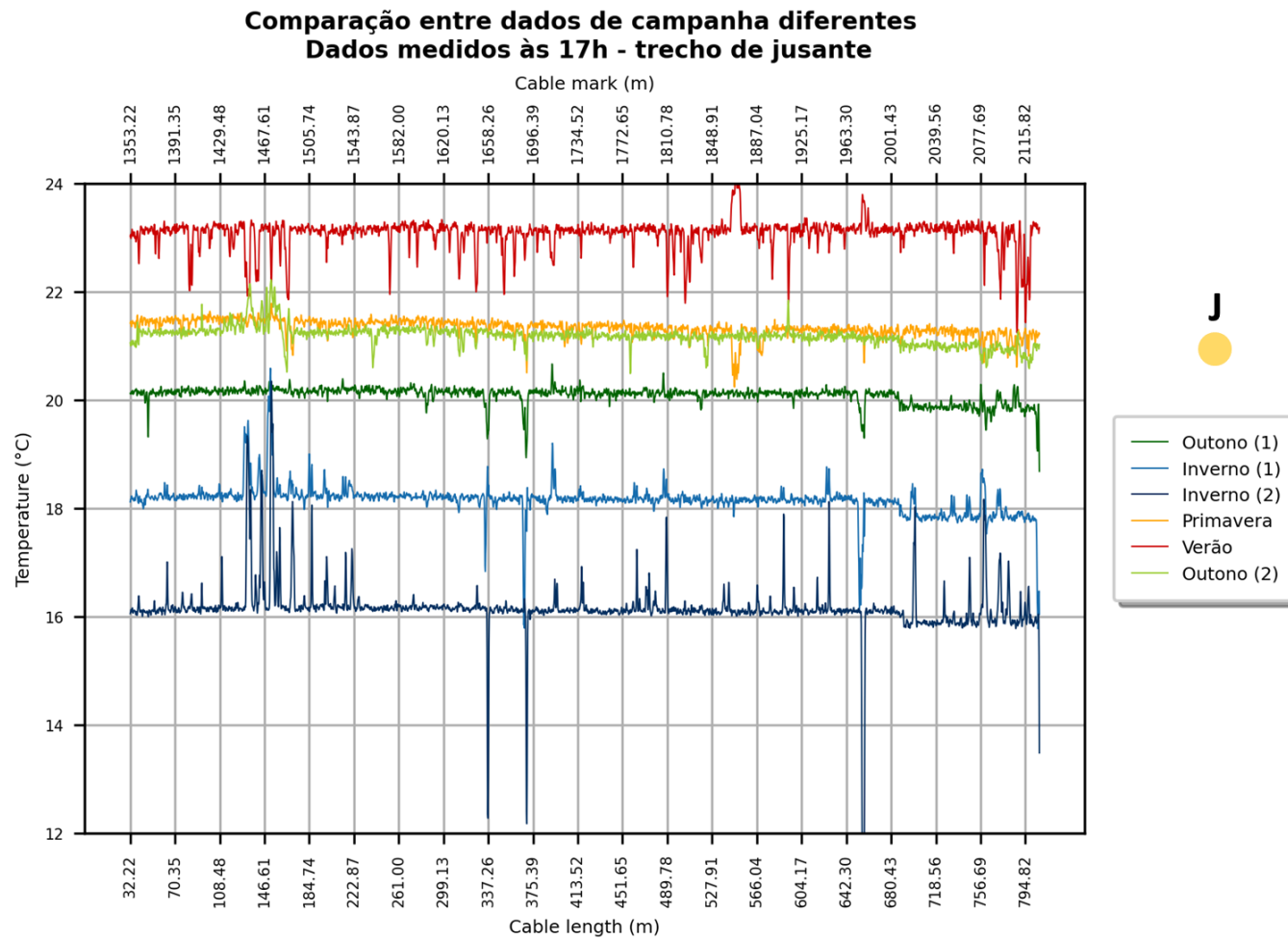
Fonte: Autor (2023)

Figura B-4 – Comparação dos dados de temperatura monitorados, às 13h, em diferentes estações, para o trecho de jusante



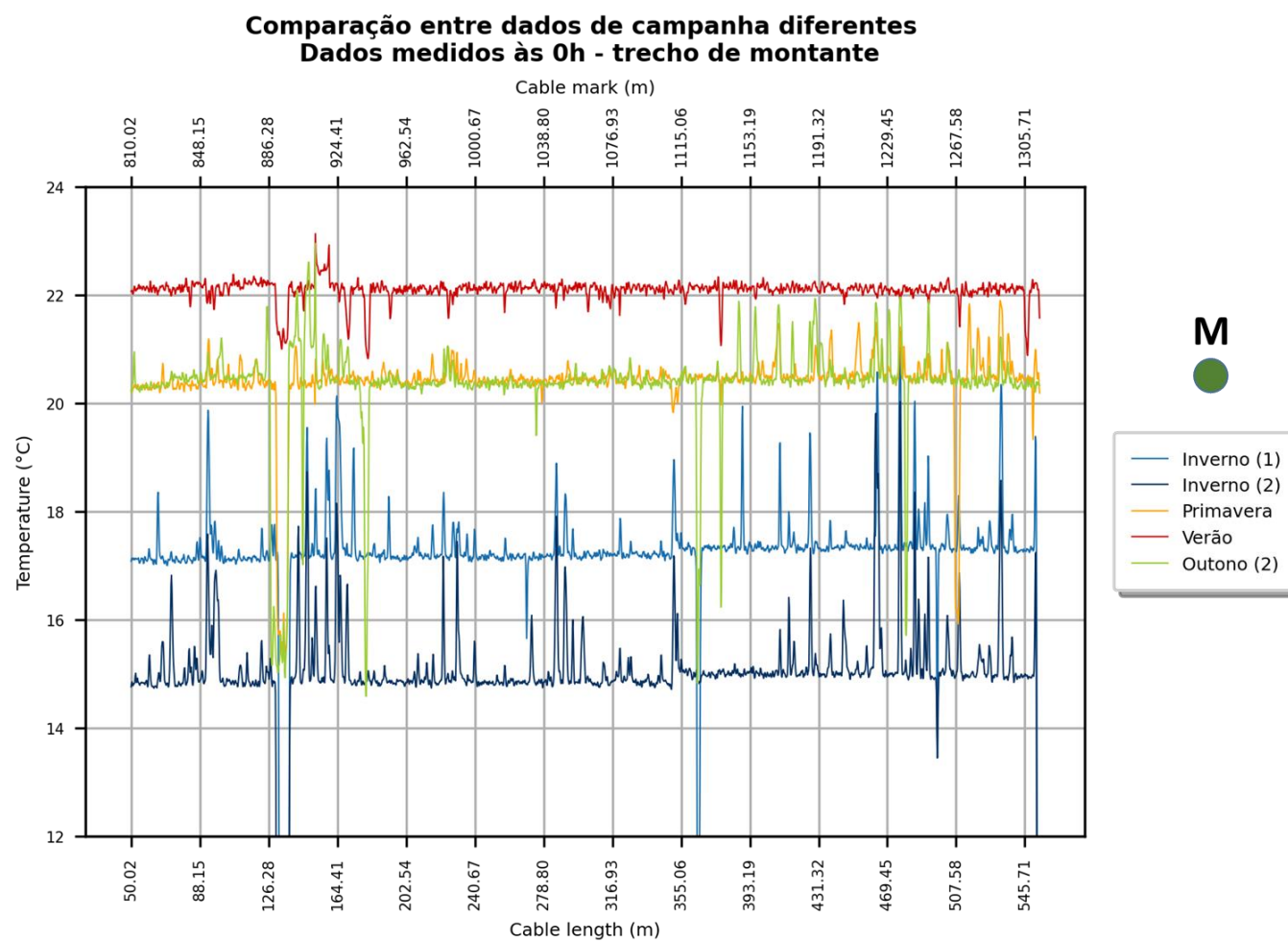
Fonte: Autor (2023)

Figura B-5 – Comparação dos dados de temperatura monitorados, às 17h, em diferentes estações, para o trecho de jusante



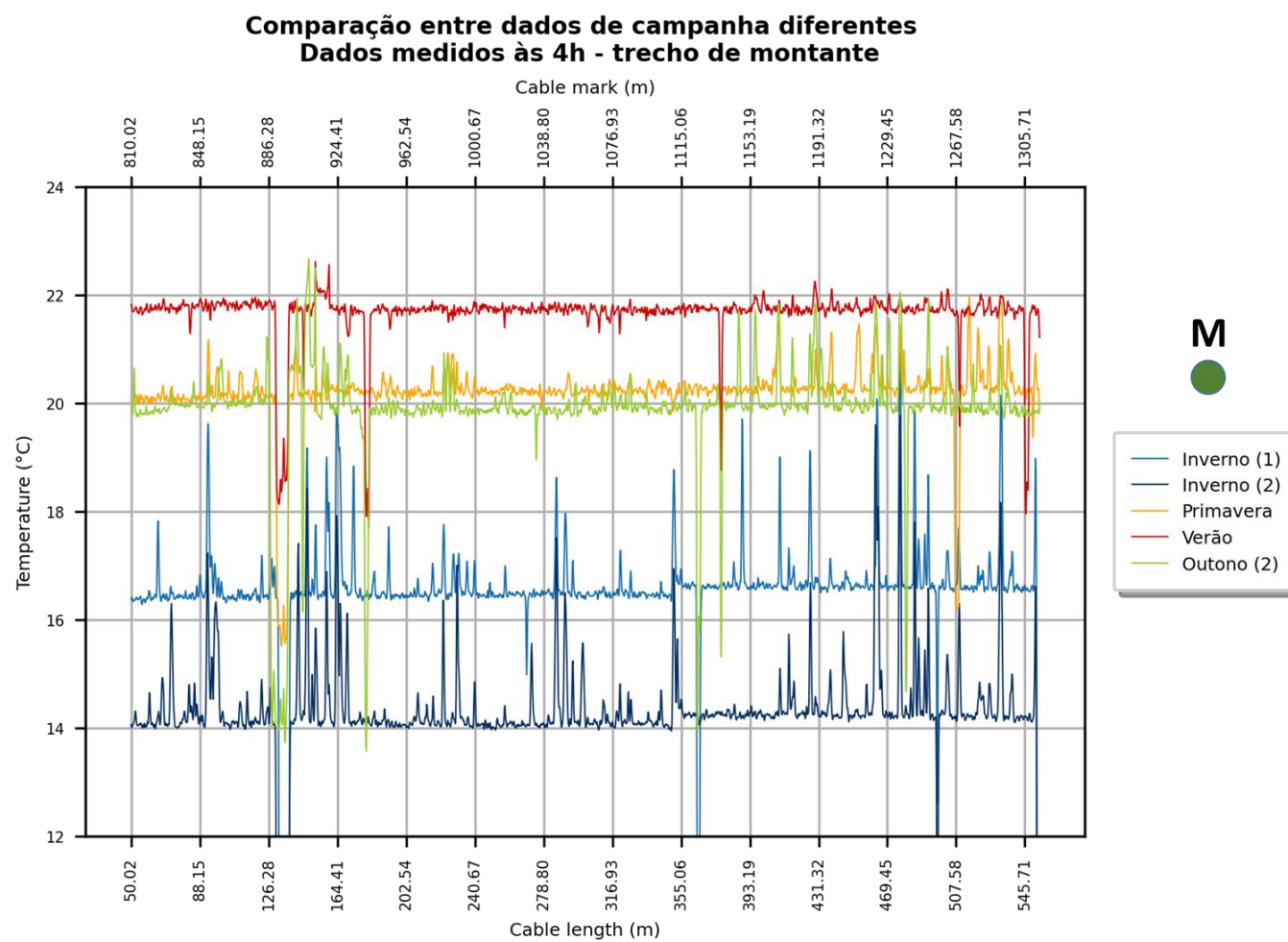
Fonte: Autor (2023)

Figura B-6 – Comparação dos dados de temperatura monitorados, às 0h, em diferentes estações, para o trecho de montante



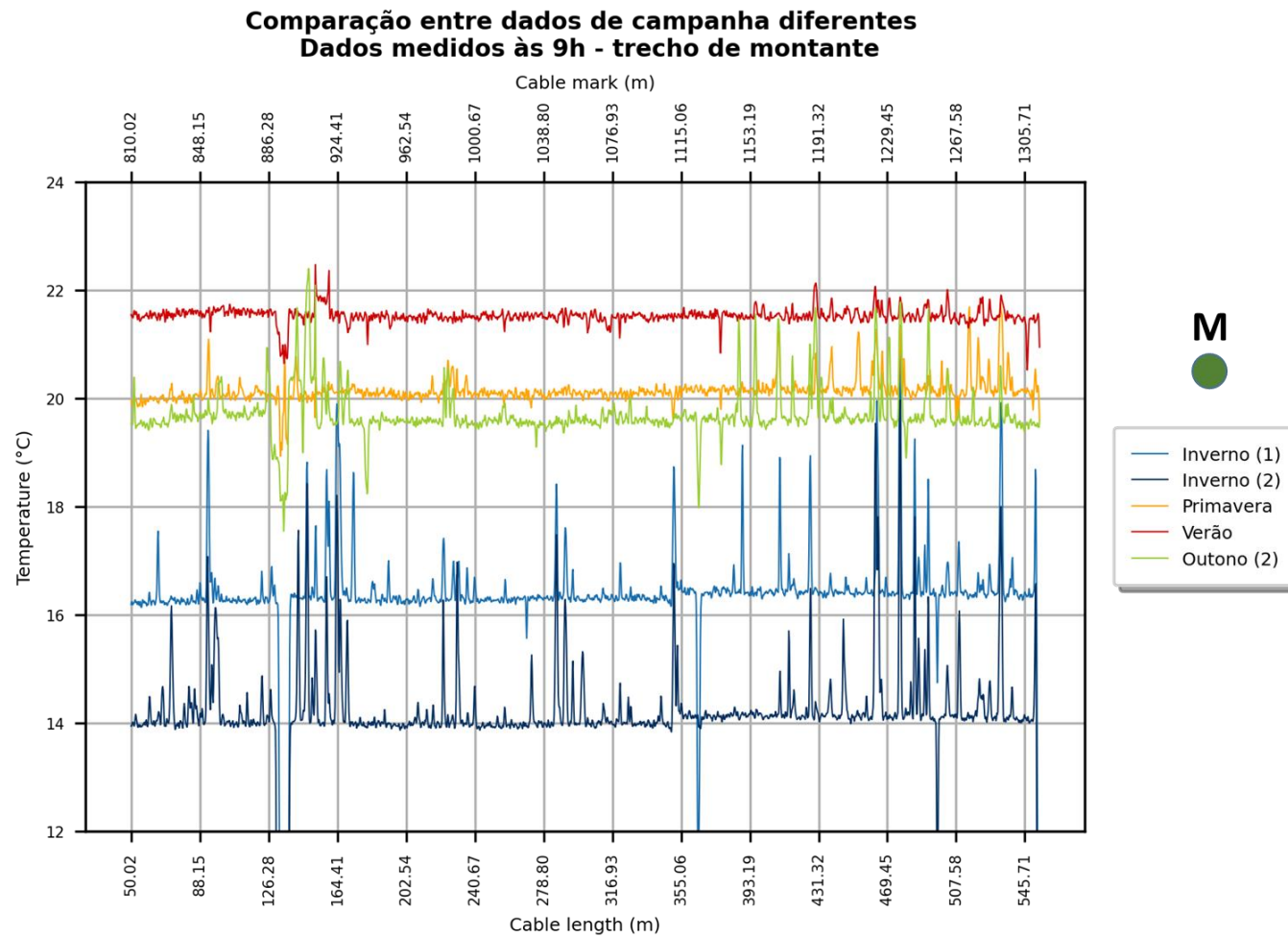
Fonte: Autor (2023)

Figura B-7 – Comparação dos dados de temperatura monitorados, às 4h, em diferentes estações, para o trecho de montante



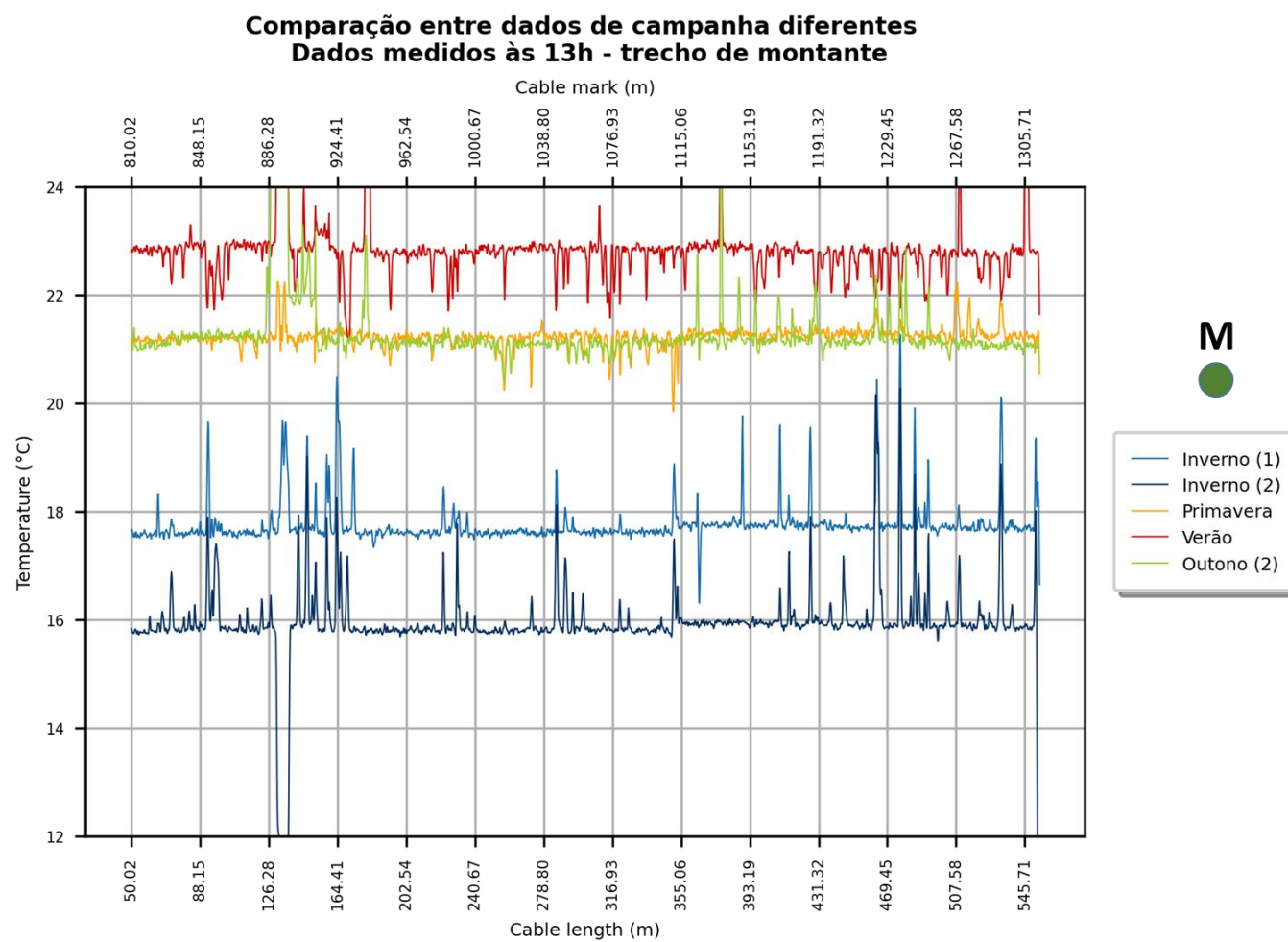
Fonte: Autor (2023)

Figura B-8 – Comparação dos dados de temperatura monitorados, às 9h, em diferentes estações, para o trecho de montante



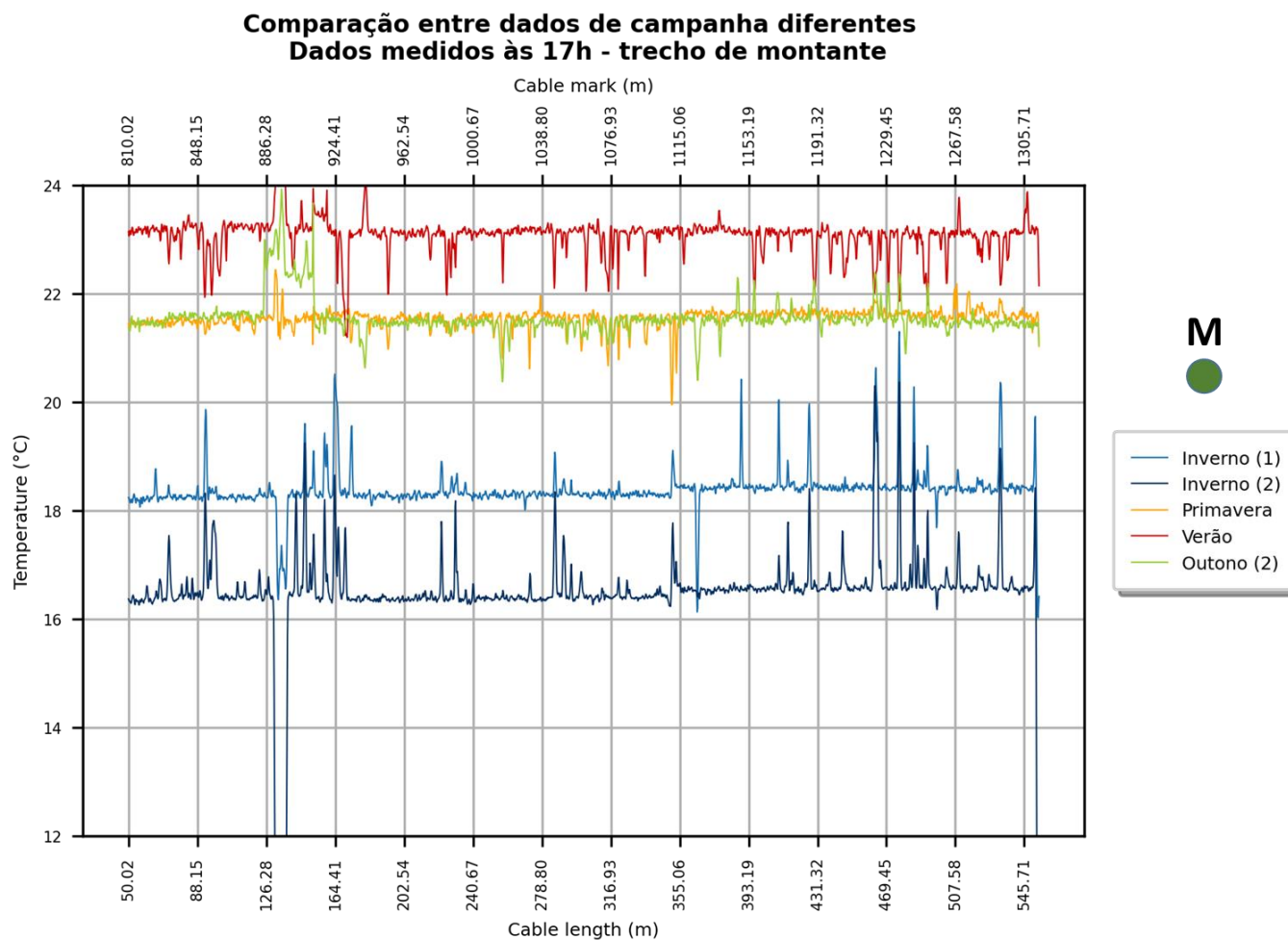
Fonte: Autor (2023)

Figura B-9 – Comparação dos dados de temperatura monitorados, às 13h, em diferentes estações, para o trecho de montante



Fonte: Autor (2023)

Figura B-10 – Comparação dos dados de temperatura monitorados, às 17h, em diferentes estações, para o trecho de montante



Fonte: Autor (2023)

APÊNDICE C – RESULTADOS GRÁFICOS DO TESTE Z COMO FERRAMENTA DE DIFERENCIAÇÃO DOS FLUXOS

Este apêndice apresenta os resultados em gráficos da aplicação do Teste Z como ferramenta de diferenciação dos fluxos, aplicado aos dados monitorados nas diferentes campanhas realizadas neste trabalho. Optou-se pela exibição de tais imagens neste apêndice a fim de complementar as discussões apresentadas no tópico 6.1 desta tese. Os períodos de dados para o qual o teste foi aplicado estão indicados na Tabela C-1. A campanha de Outono (1) não foi incluída na análise, por não dispor de dados noturnos, no qual as anomalias de temperatura são mais acentuadas para a separação das zonas de interação.

Tabela C-1 – Períodos representativos utilizados para o Teste Z

Campanha	Período utilizado na análise
Inverno (1)	Das 22h de 05-07-21 às 06h de 06-07-21
Inverno (2)	Das 22h de 29-07-21 às 06h de 30-07-21
Primavera	Das 22h de 08-12-21 às 06h de 09-12-21
Verão	Entre 13h e 21h de 27-01-22
Outono (2)	Das 22h de 05-05-22 às 06h de 06-05-22

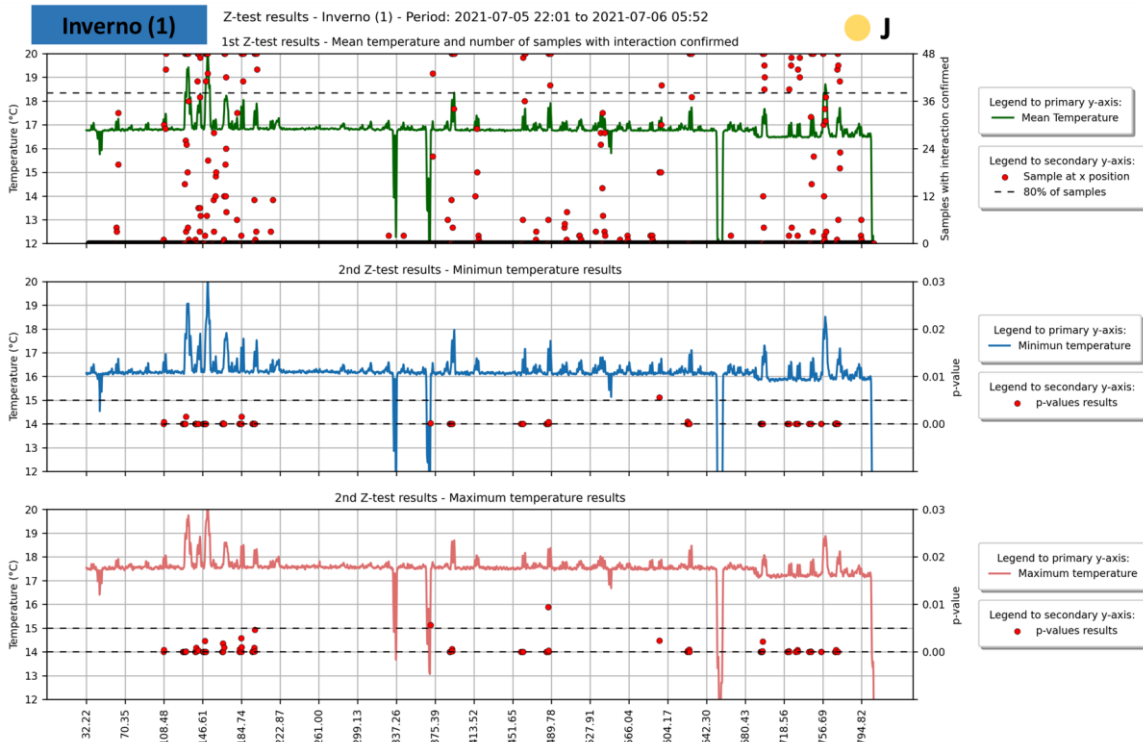
Fonte: Autor (2023)

As Figuras C-1 a C-5 apresentam os dados resultantes da aplicação dos dois testes Z propostos neste trabalho. As figuras são divididas em duas imagens, sendo uma para cada um dos trechos monitorados (jusante e montante). Cada imagem é subdividida em três quadros. O quadro superior apresenta o resultado do primeiro teste Z, aplicado às 8h de dados selecionados de cada campanha e que apresenta, em conjunto com a temperatura média do período avaliado, a contagem da persistência de rejeição da hipótese nula do teste Z (p-valor inferior a 0,005). Quanto maior o número de rejeições (quanto mais próximo de 48, ou seja, mais pontos vermelhos mais próximos do topo do quadro), mais persistente é a anomalia de temperatura naquele ponto em relação aos pontos vizinhos de montante. O quadro central e o quadro inferior das figuras apresentam o resultado do segundo teste Z aplicado para a temperatura máxima e para temperatura mínima do recorte realizado, respectivamente. O segundo teste é aplicado apenas aos pontos que apresentaram persistência superior a 80% nos resultados do primeiro teste e que não foram desconsiderados nos critérios de rejeição estabelecidos, que excluem zonas de cabo exposto ao ar e zonas com baixo desvio padrão entre o ponto avaliado e seus vizinhos de montante. Neste segundo teste, p-valor com resultados inferiores a 0,005 indicam zonas

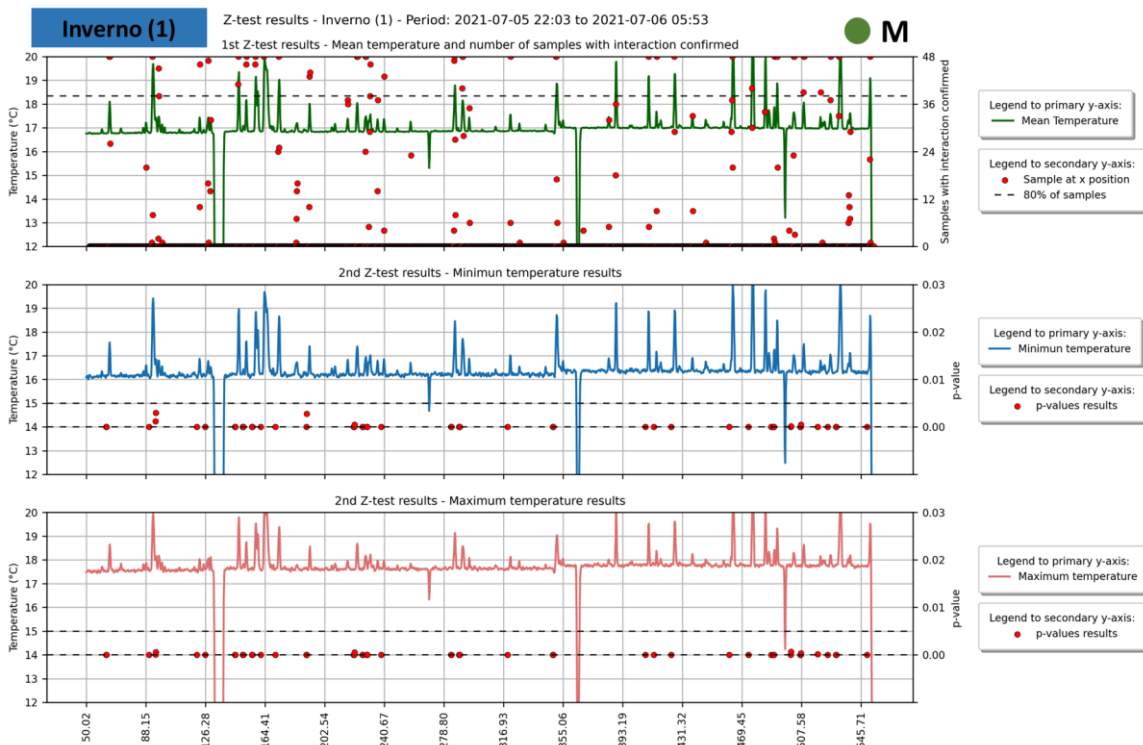
de interação com águas profundas. Ao observar os resultados do segundo teste, nota-se que as zonas de maior persistência, detectadas no primeiro teste, apresentaram p-valores inferiores à 0,005 no segundo teste, em ambas as condições de temperatura (máxima ou mínima), o que indica a potencialidade de utilização do primeiro teste como instrumento direto de separação de origem dos fluxos.

Figura C-1 – Resultados da aplicação do Teste Z, para a campanha de Inverno (1), com dados levantados entre 05 e 06 de julho de 2021 para o trecho de (a) jusante e (b) montante

(a)



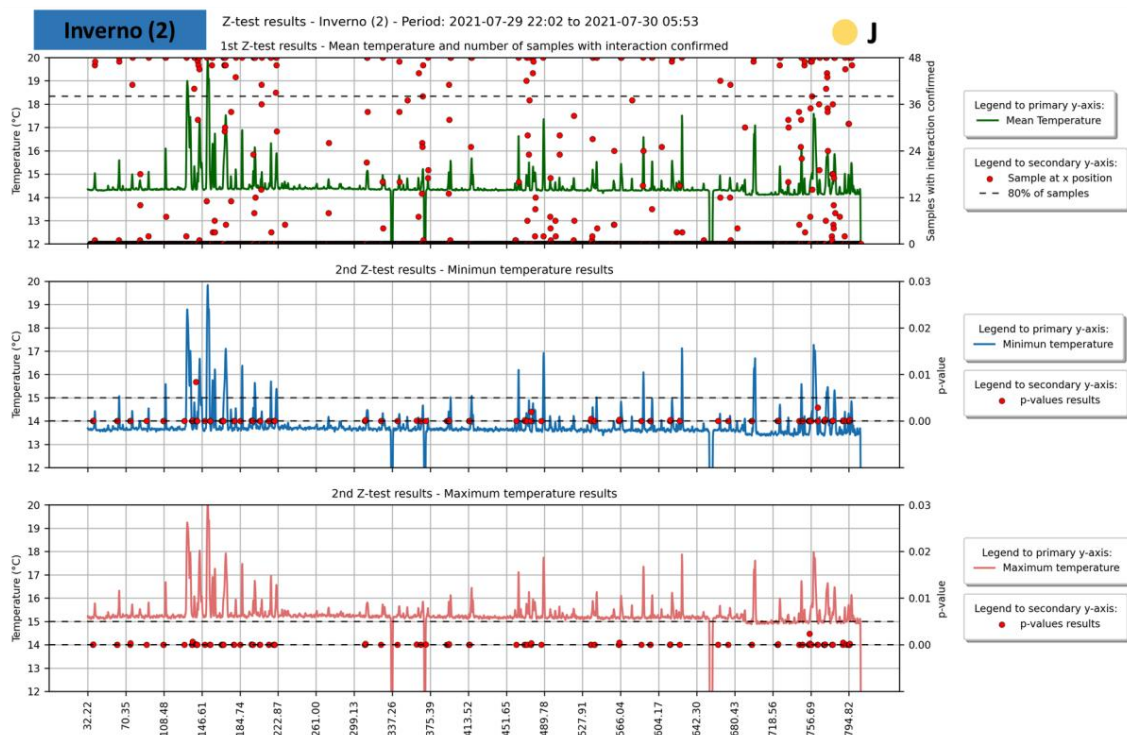
(b)



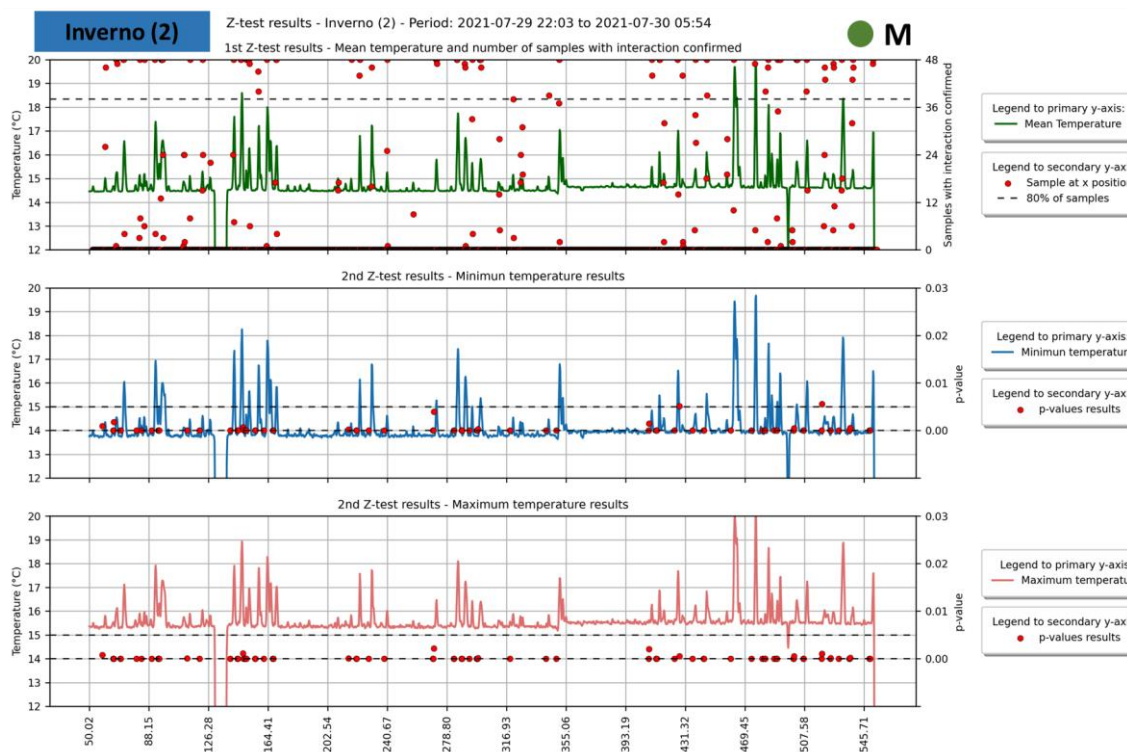
Fonte: Autor (2023)

Figura C-2 – Resultados da aplicação do Teste Z, para a campanha de Inverno (1), com dados levantados entre 29 e 30 de julho de 2021 para o trecho de (a) jusante e (b) montante

(a)



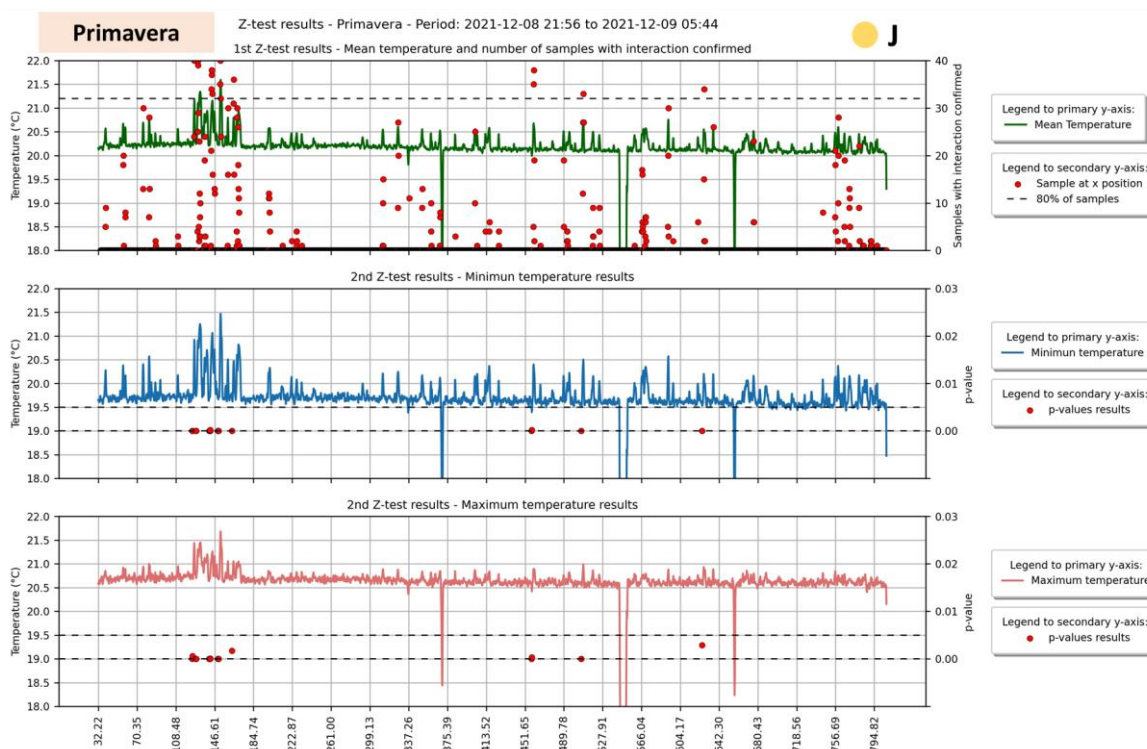
(b)



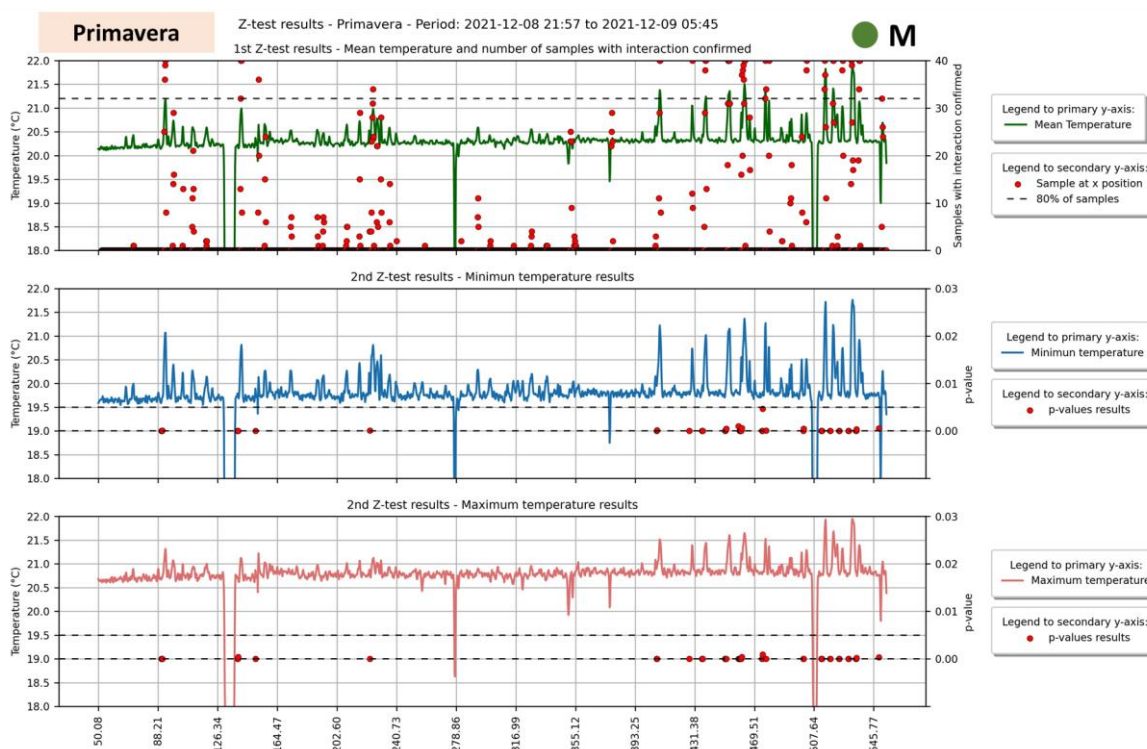
Fonte: Autor (2023)

Figura C-3 – Resultados da aplicação do Teste Z, para a campanha de Primavera, com dados levantados entre 08 e 09 de dezembro de 2021 para o trecho de (a) jusante e (b) montante

(a)



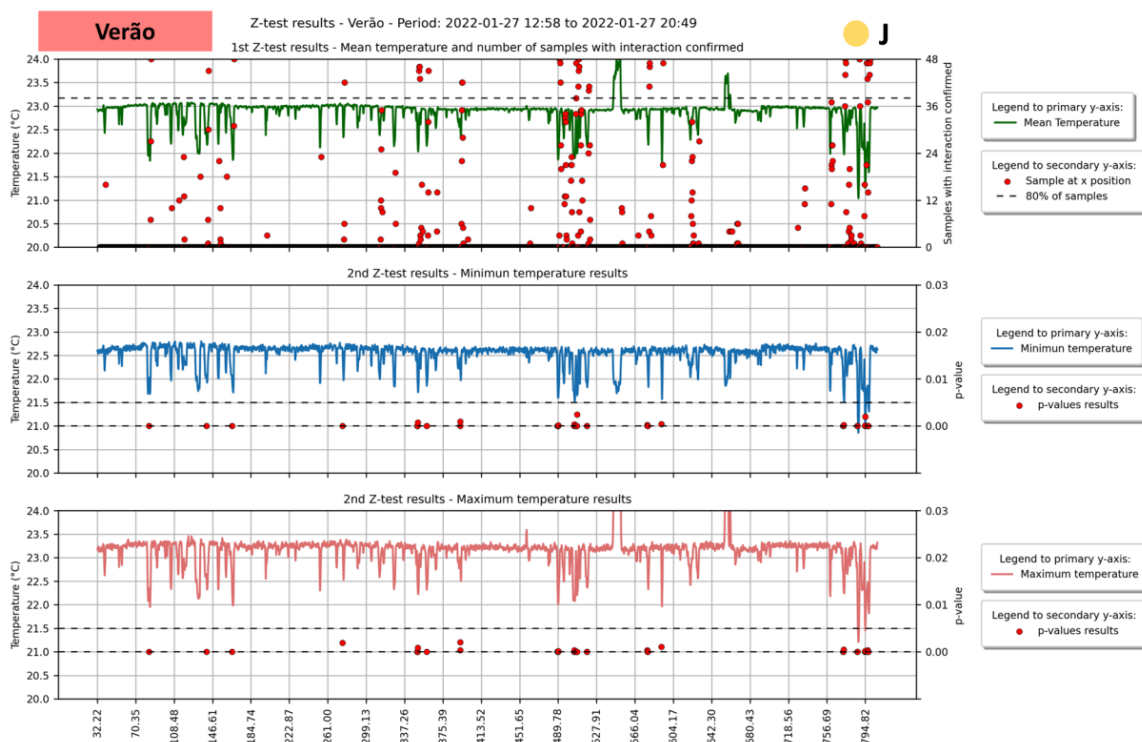
(b)



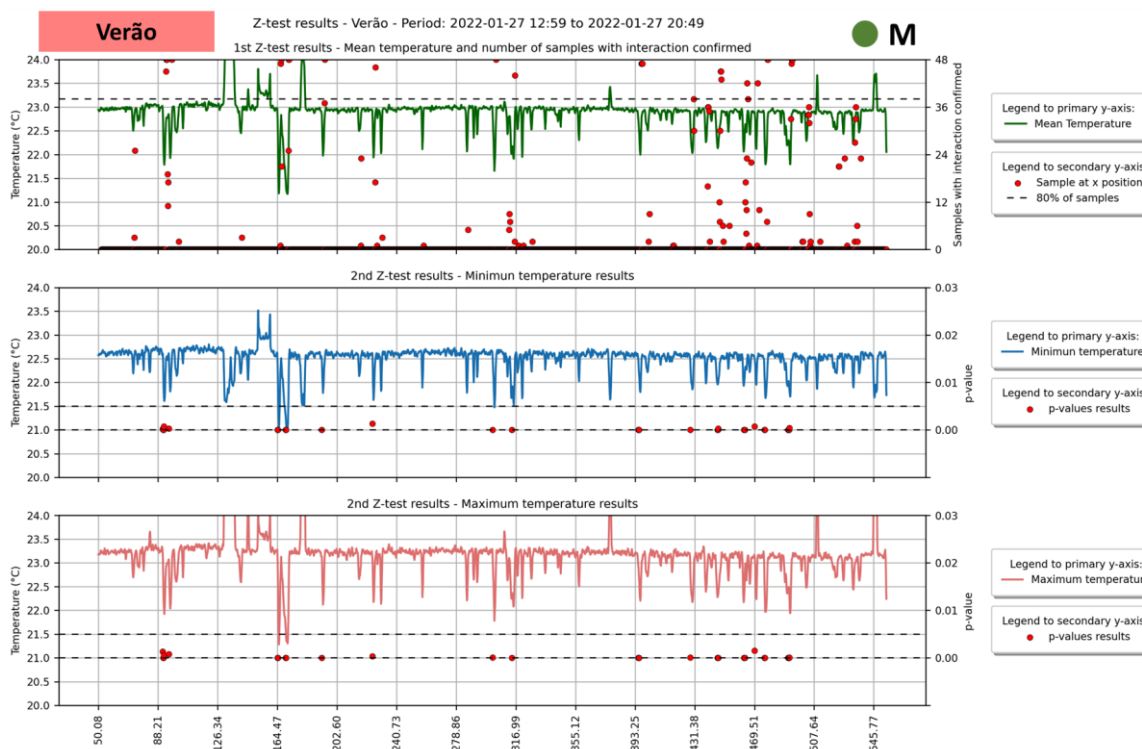
Fonte: Autor (2023)

Figura C-4 – Resultados da aplicação do Teste Z, para a campanha de Verão, com dados levantados entre 27 de janeiro de 2022 para o trecho de (a) jusante e (b) montante

(a)



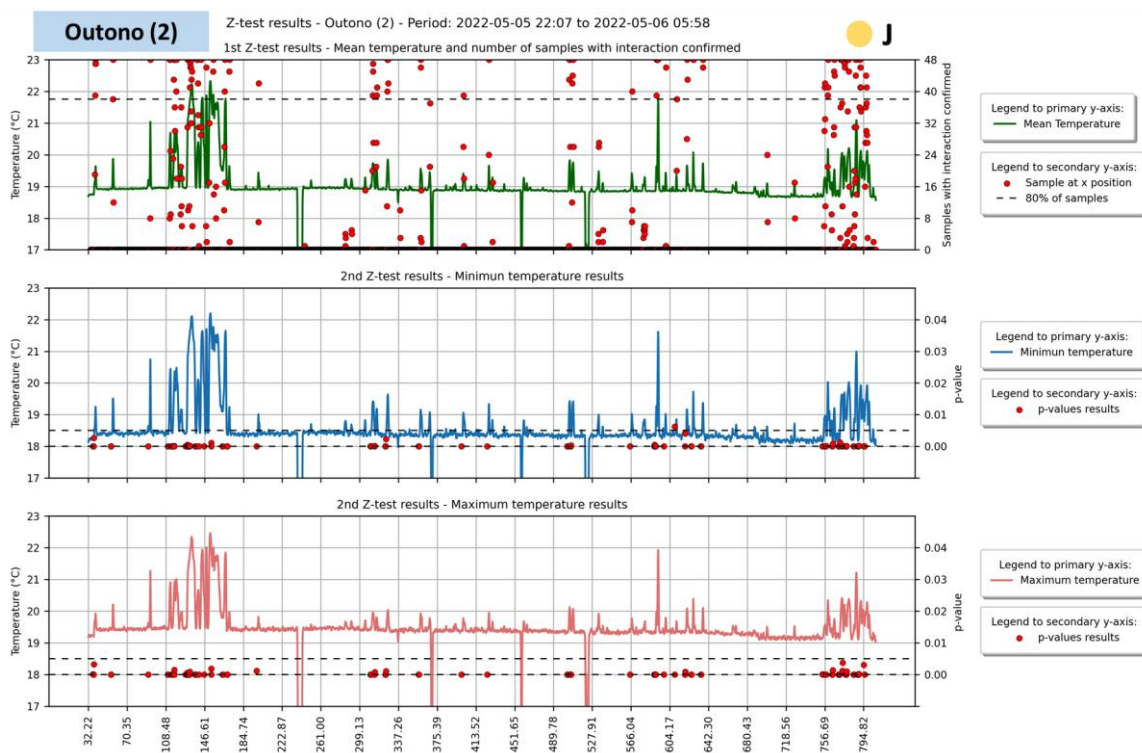
(b)



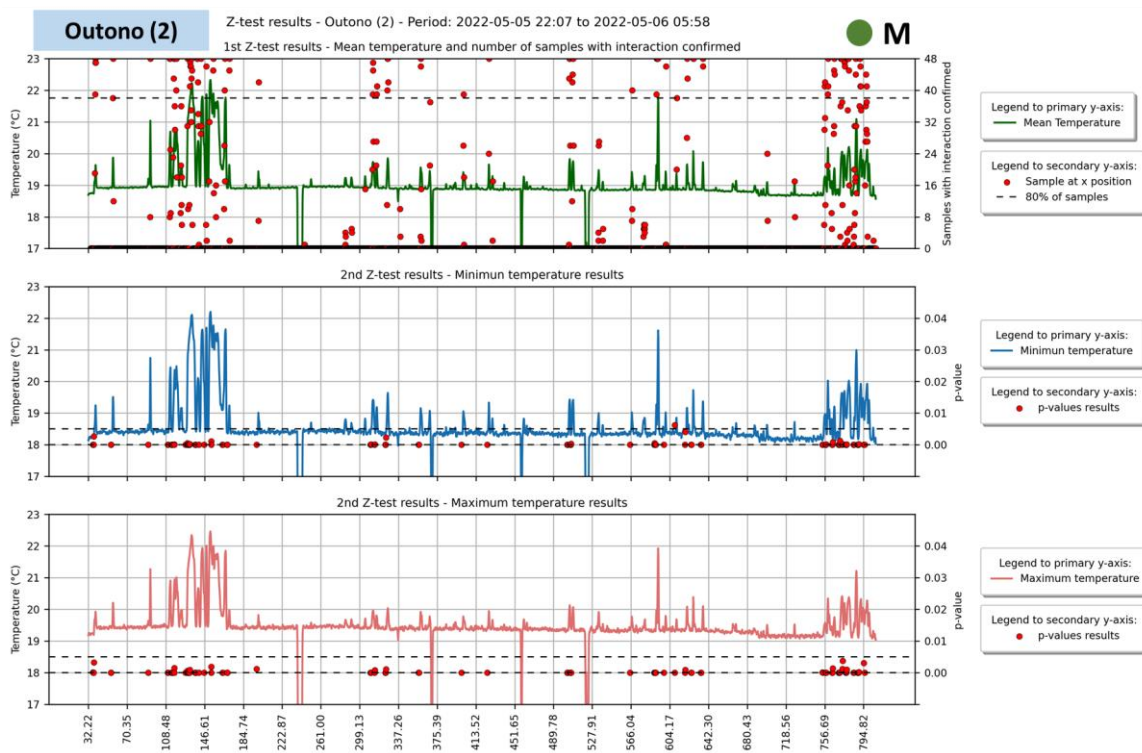
Fonte: Autor (2023)

Figura C-5 – Resultados da aplicação do Teste Z, para a campanha de Outono (2), com dados levantados entre 27 de janeiro de 2022 para o trecho de (a) jusante e (b) montante

(a)



(b)



Fonte: Autor (2023)

APÊNDICE D – RESULTADOS GRÁFICOS DA APLICAÇÃO DOS ALGORITMOS DE CLUSTERIZAÇÃO

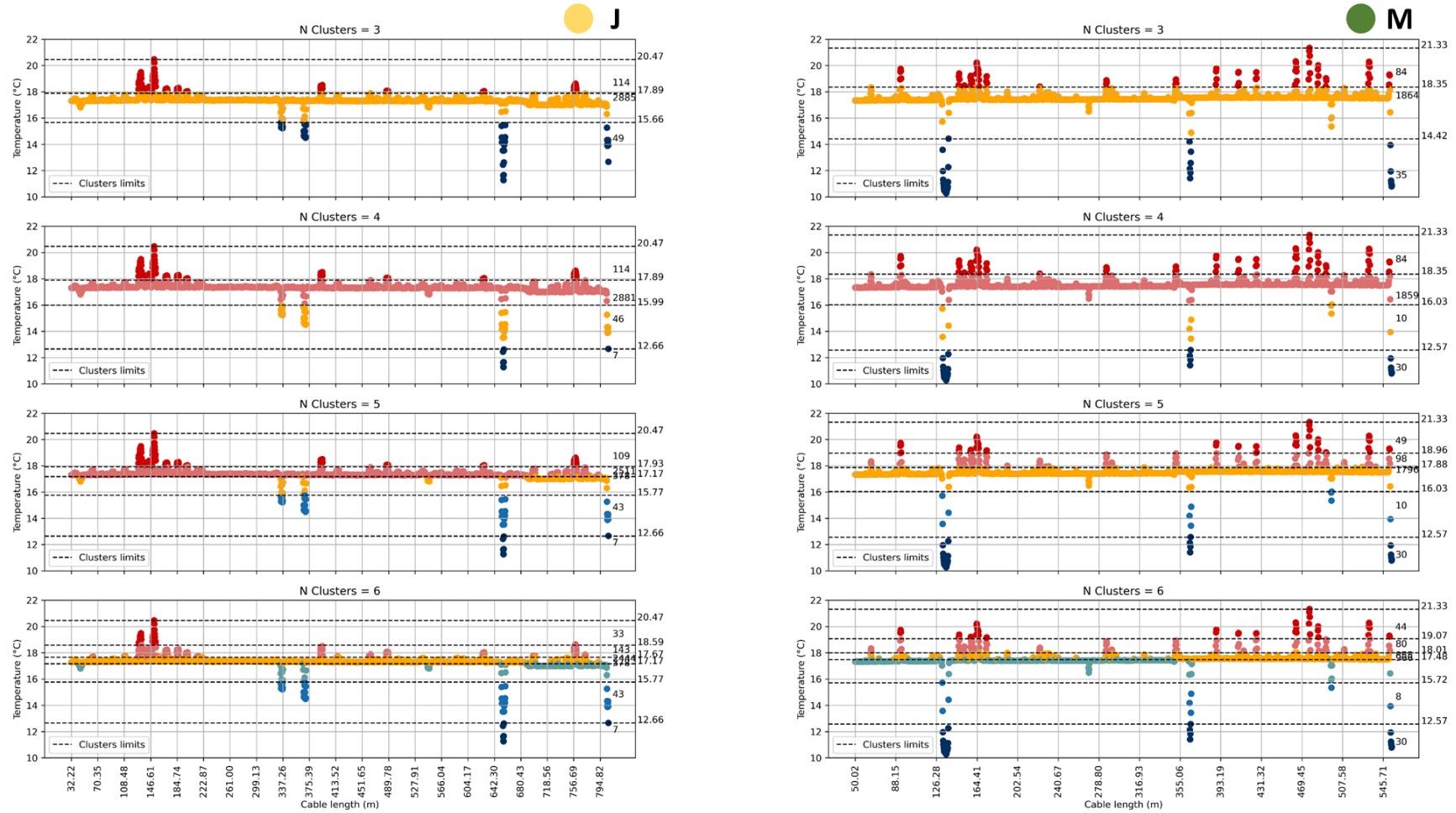
Este apêndice apresenta os resultados em gráficos da aplicação dos algoritmos de clusterização aos dados de temperatura da água, monitorados nas diferentes campanhas realizadas neste trabalho. Optou-se pela exibição de tais imagens neste apêndice a fim de complementar as discussões apresentadas no tópico 6.2 desta tese, que indicou as vantagens e limitações dos usos de tais rotinas computacionais na delimitação das zonas de interação rio-aquífero observadas a partir das variações de temperatura.

Inicialmente, a análise foi realizada em torno das temperaturas médias de cada campanha, a fim de avaliar a quantidade de clusters necessária para a separação das zonas de interação. Para as campanhas de Inverno (1) e Inverno (2), em que houve descontinuidade nos dados levantados, foi utilizado os períodos mais extensos de monitoramento contínuo (entre 05 e 06 de julho de 2021 e 29 e 30 de julho de 2021, respectivamente). Já para as campanhas de Primavera, Verão e Outono (2), todo o conjunto de dados foi utilizado, considerando a continuidade dos dados. A campanha de Outono (1) não é apresentada neste apêndice, mas teve seus resultados apresentados na parte principal do texto, referente ao uso destes algoritmos.

As Figuras D-1 a D-5 apresentam os resultados obtidos com o uso do algoritmo *K-means*, enquanto as Figuras D-6 a D-10 apresentam os resultados do uso do algoritmo *Agglomerative clustering*. A imagem da esquerda é referente ao trecho de jusante (maior comprimento ao longo do eixo x), enquanto a imagem da direita se refere ao trecho de montante. Cada quadro apresenta o agrupamento realizado para certa quantidade clusters, que varia entre 3 e 6 grupos, uma vez que se buscava identificar uma quantidade de grupos próxima da quantidade de zonas comumente identificadas nas interações rio-aquífero, no que se refere à origem das águas que descarregam ao meio superficial. No lado direito de cada quadro, é possível identificar a quantidade de pontos monitorados que foram incluídos em cada grupo, assim como os valores limites de temperatura que diferenciam cada cluster (linha tracejada indicada por *Clusters limits*).

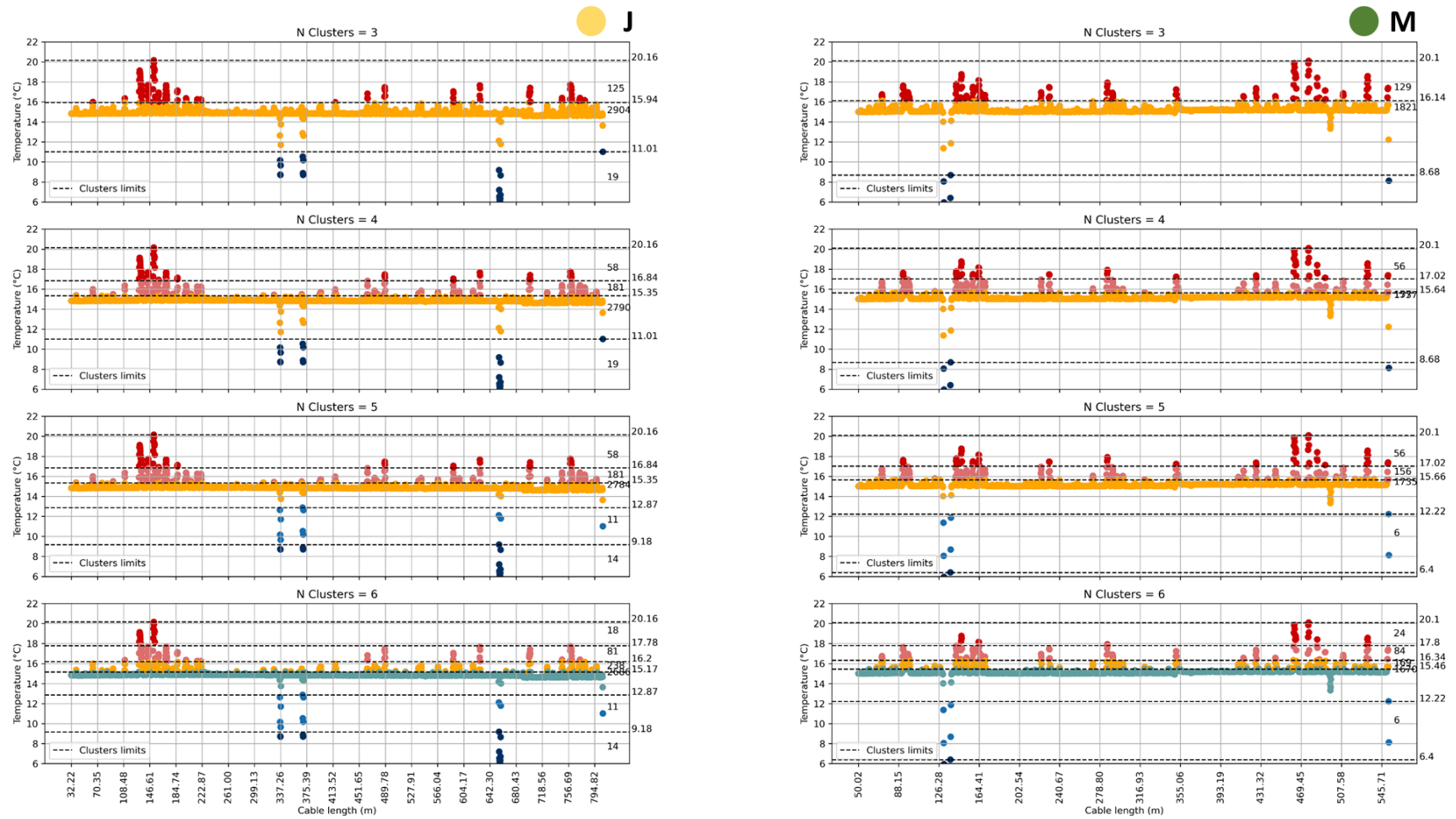
As Figuras D-11 a D-15 apresentam os resultados da formação de clusters a partir da aplicação de ambos os algoritmos, para dados monitorados em diferentes horários (8h, 13h, 17h e 22h), no trecho de montante. As figuras apresentam dados levantados nas diferentes campanhas de monitoramento, à exceção da campanha de Outono (1), que não foi incluída nesta análise, que complementa as verificações identificadas no tópico 6.2.3.2 deste trabalho.

Figura D-1 – Verificação do número de clusters, com o algoritmo K-means, para os dados da campanha de Inverno (1)



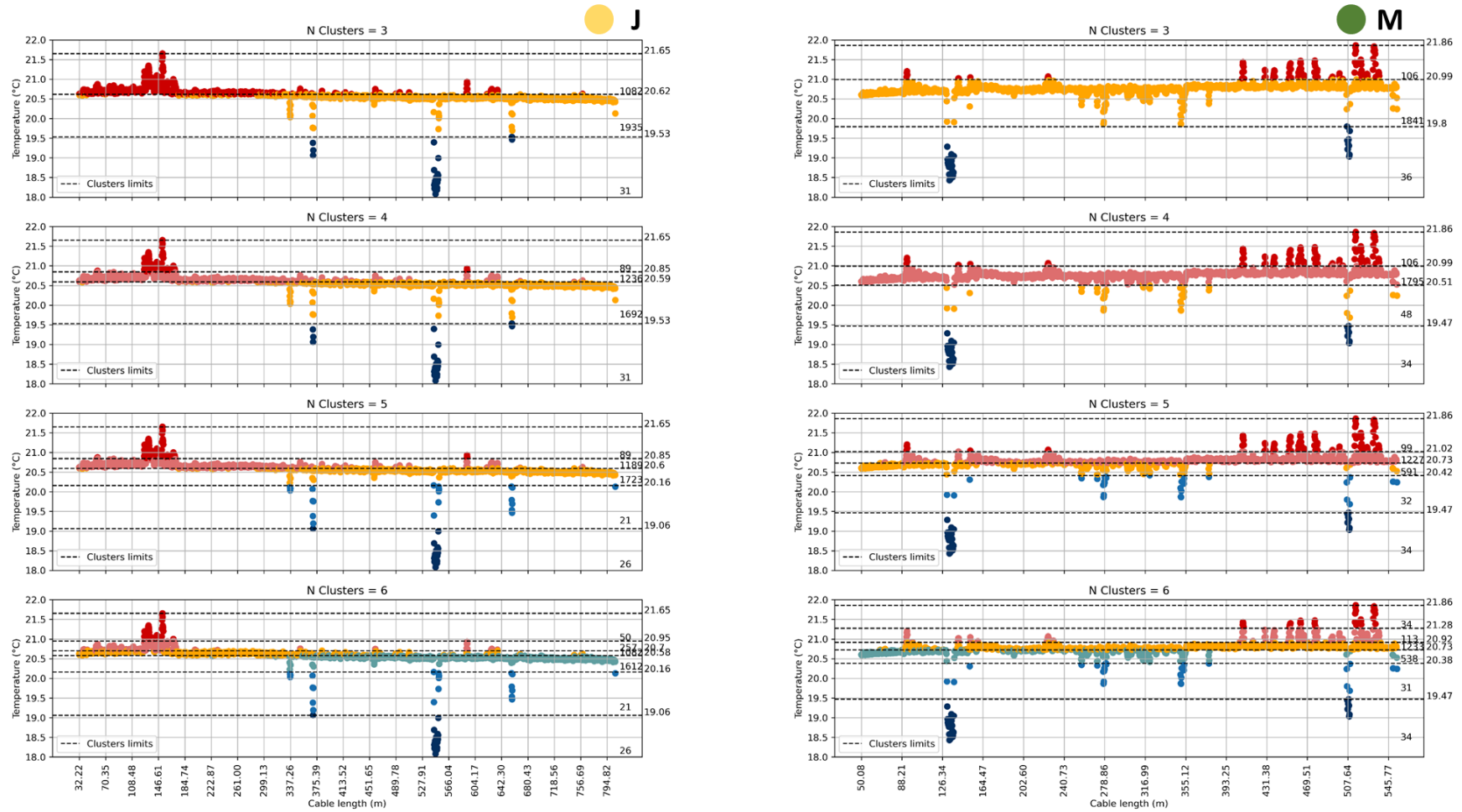
Fonte: Autor (2023)

Figura D-2 – Verificação do número de clusters, com o algoritmo K-means, para os dados da campanha de Inverno (2)



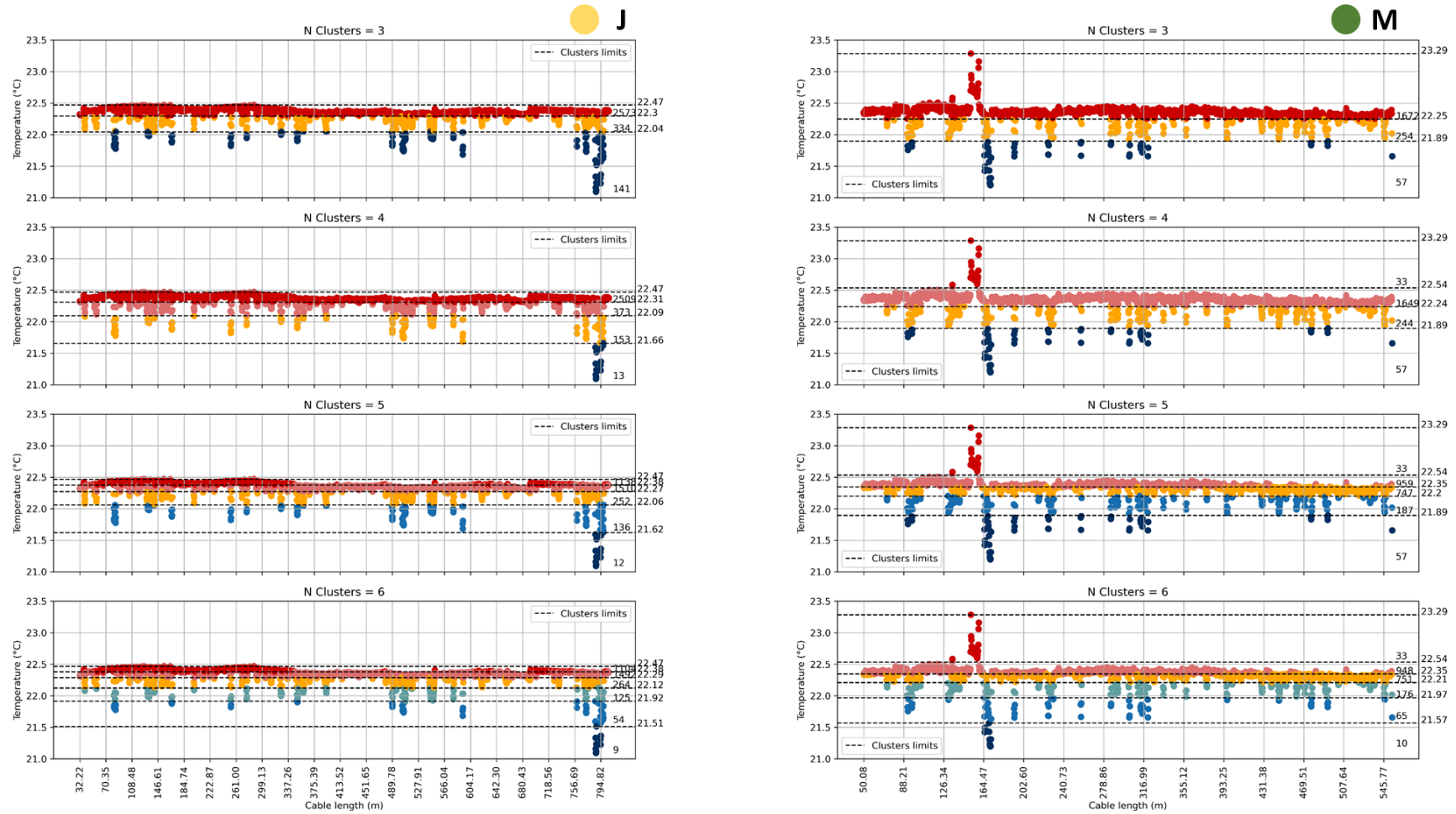
Fonte: Autor (2023)

Figura D-3 – Verificação do número de clusters, com o algoritmo K-means, para os dados da campanha de Primavera



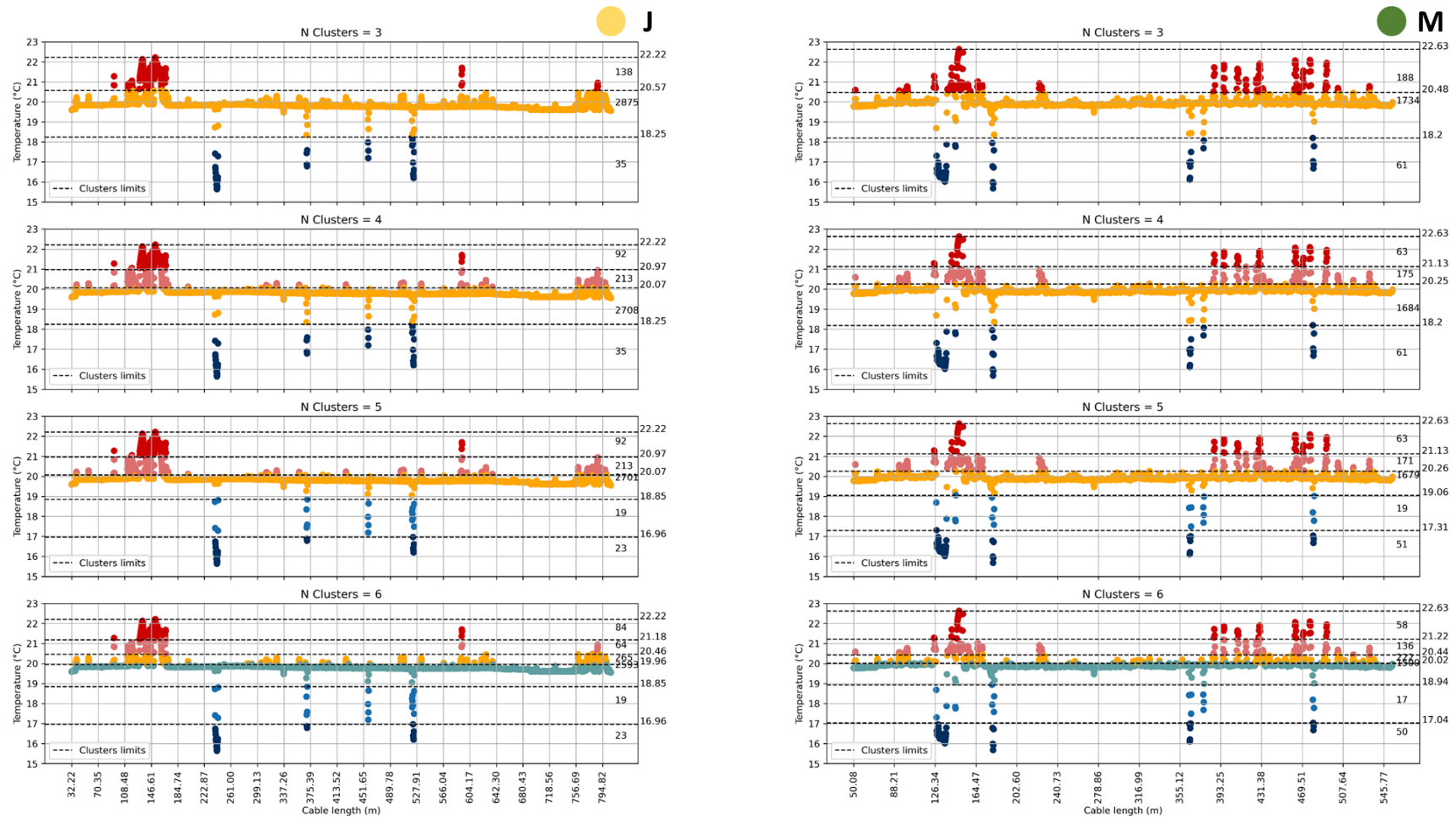
Fonte: Autor (2023)

Figura D-4 – Verificação do número de clusters, com o algoritmo K-means, para os dados da campanha de Verão



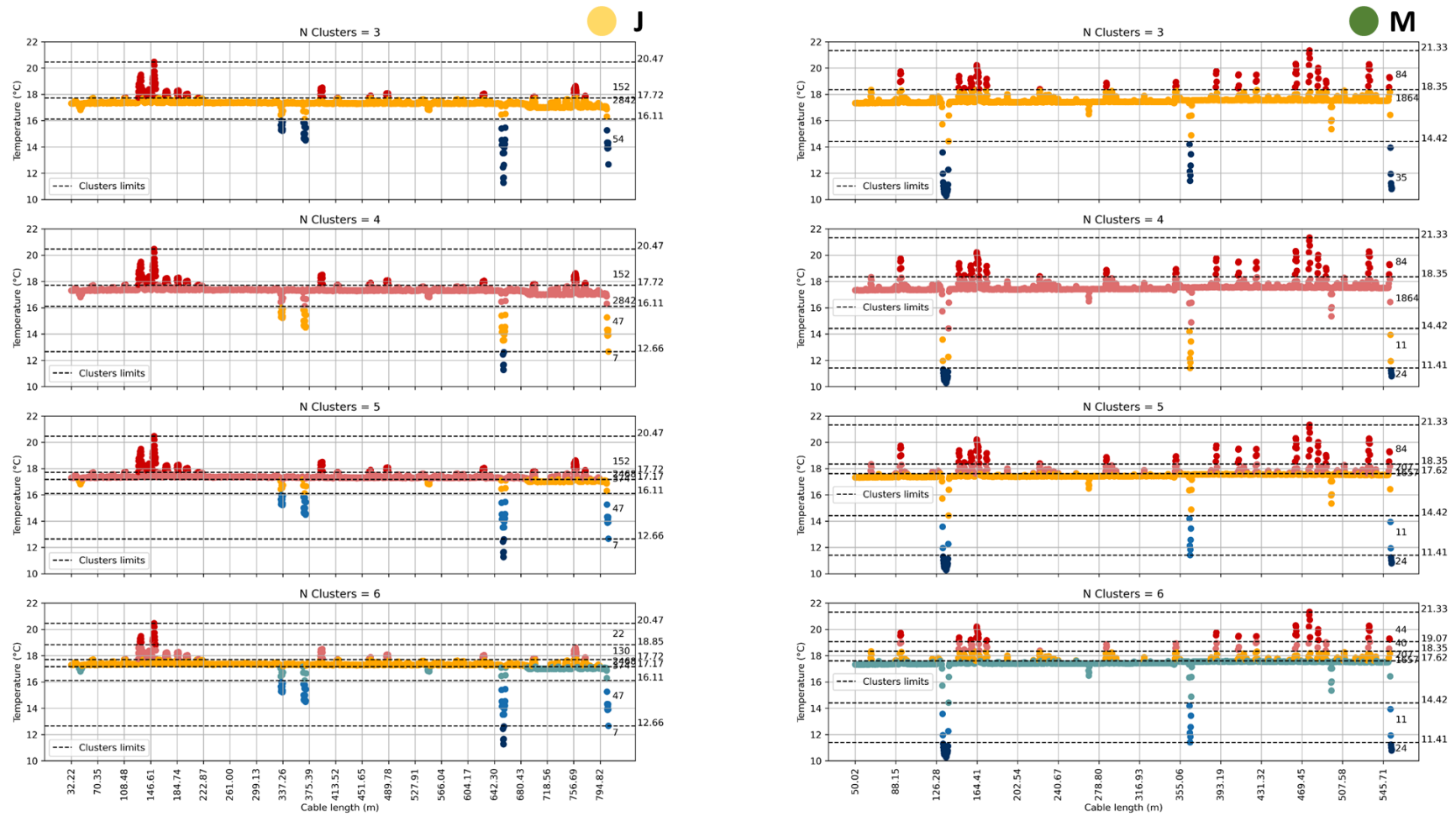
Fonte: Autor (2023)

Figura D-5 – Verificação do número de clusters, com o algoritmo K-means, para os dados da campanha de Outono (2)



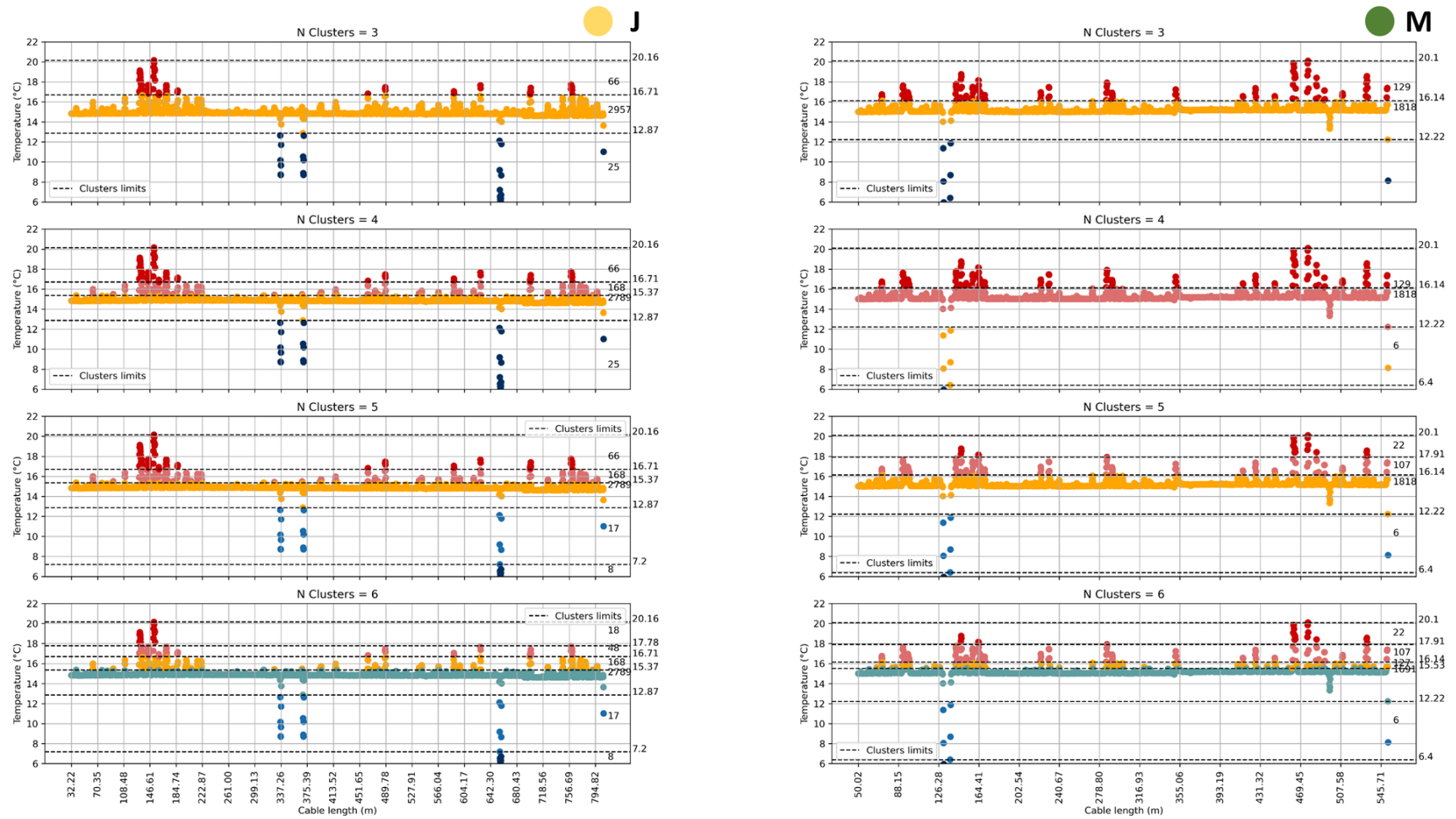
Fonte: Autor (2023)

Figura D-6 – Verificação do número de clusters, com o *Agglomerative clustering*, para os dados da campanha de Inverno (1)



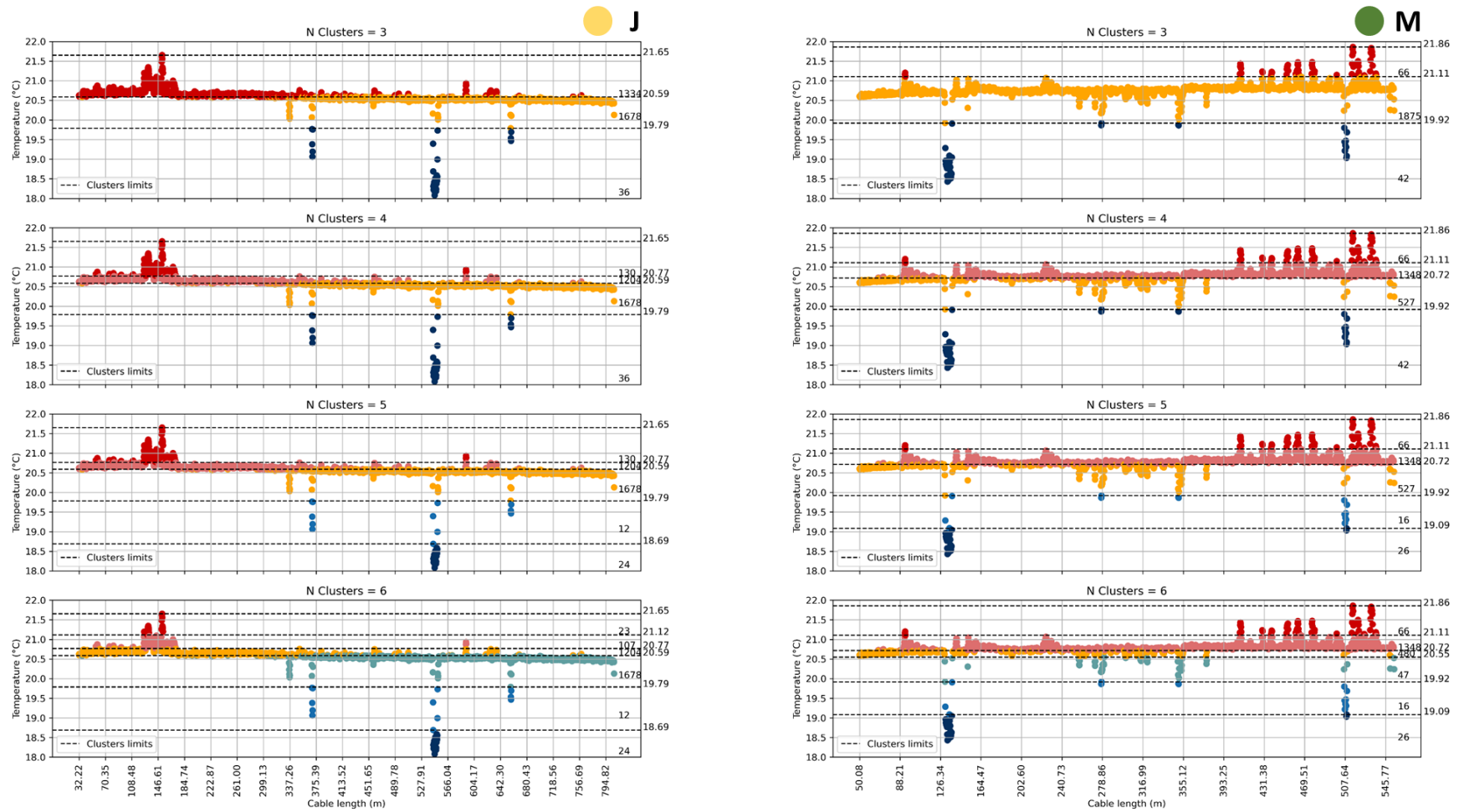
Fonte: Autor (2023)

Figura D-7 – Verificação do número de clusters, com o *Agglomerative clustering*, para os dados da campanha de Inverno (2)



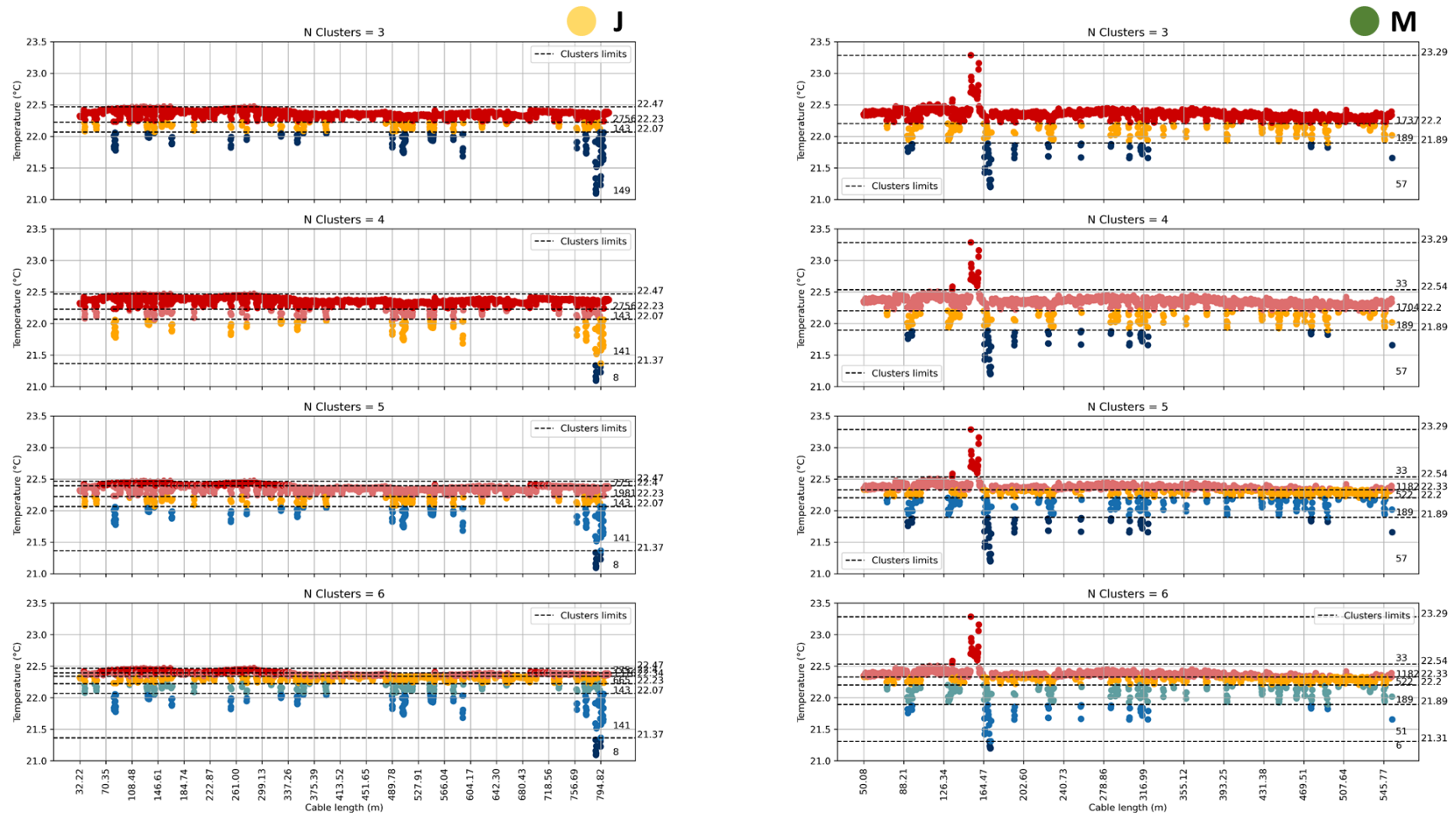
Fonte: Autor (2023)

Figura D-8 – Verificação do número de clusters, com o *Agglomerative clustering*, para os dados da campanha de Primavera



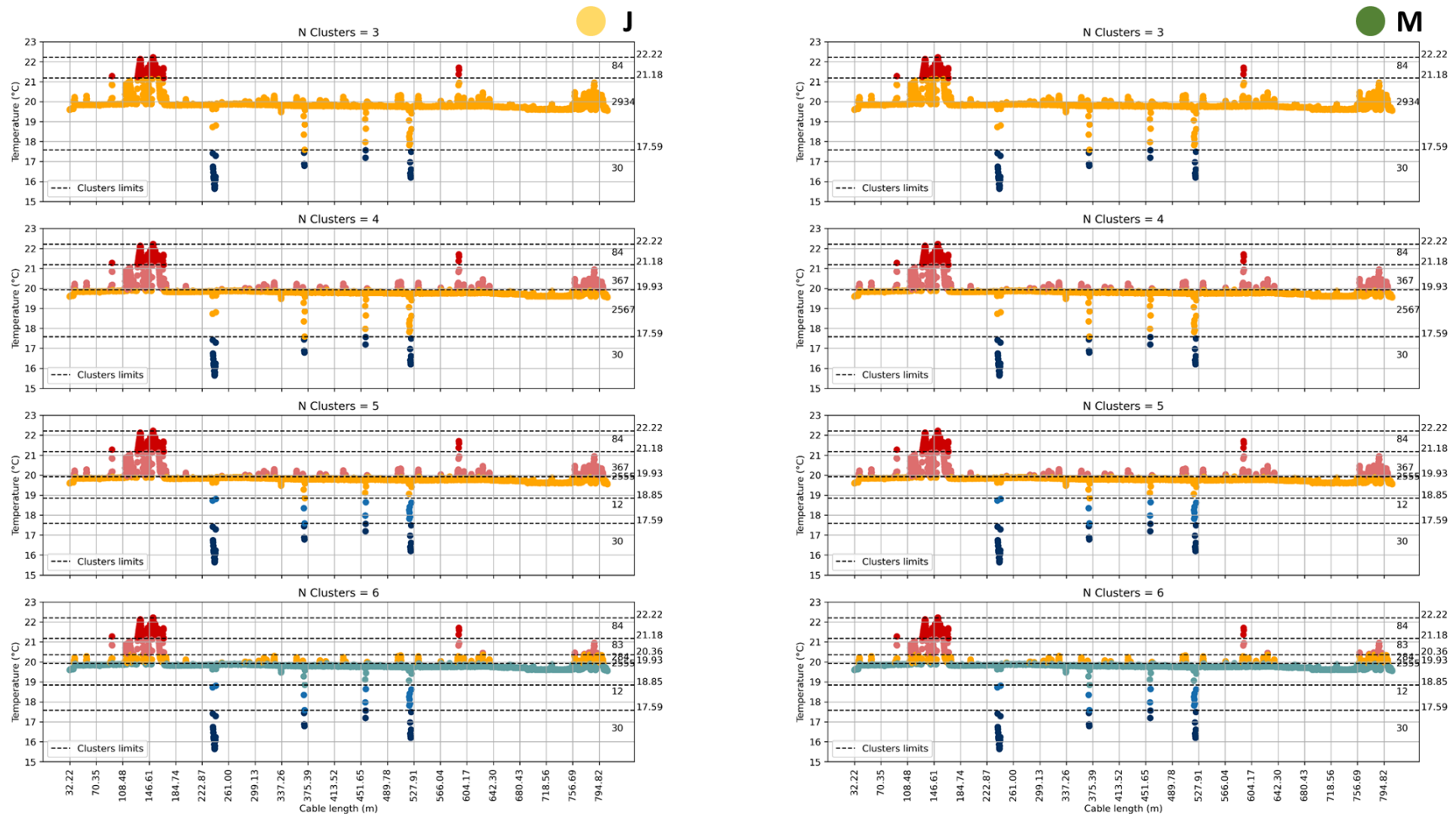
Fonte: Autor (2023)

Figura D-9 – Verificação do número de clusters, com o *Agglomerative clustering*, para os dados da campanha de Verão



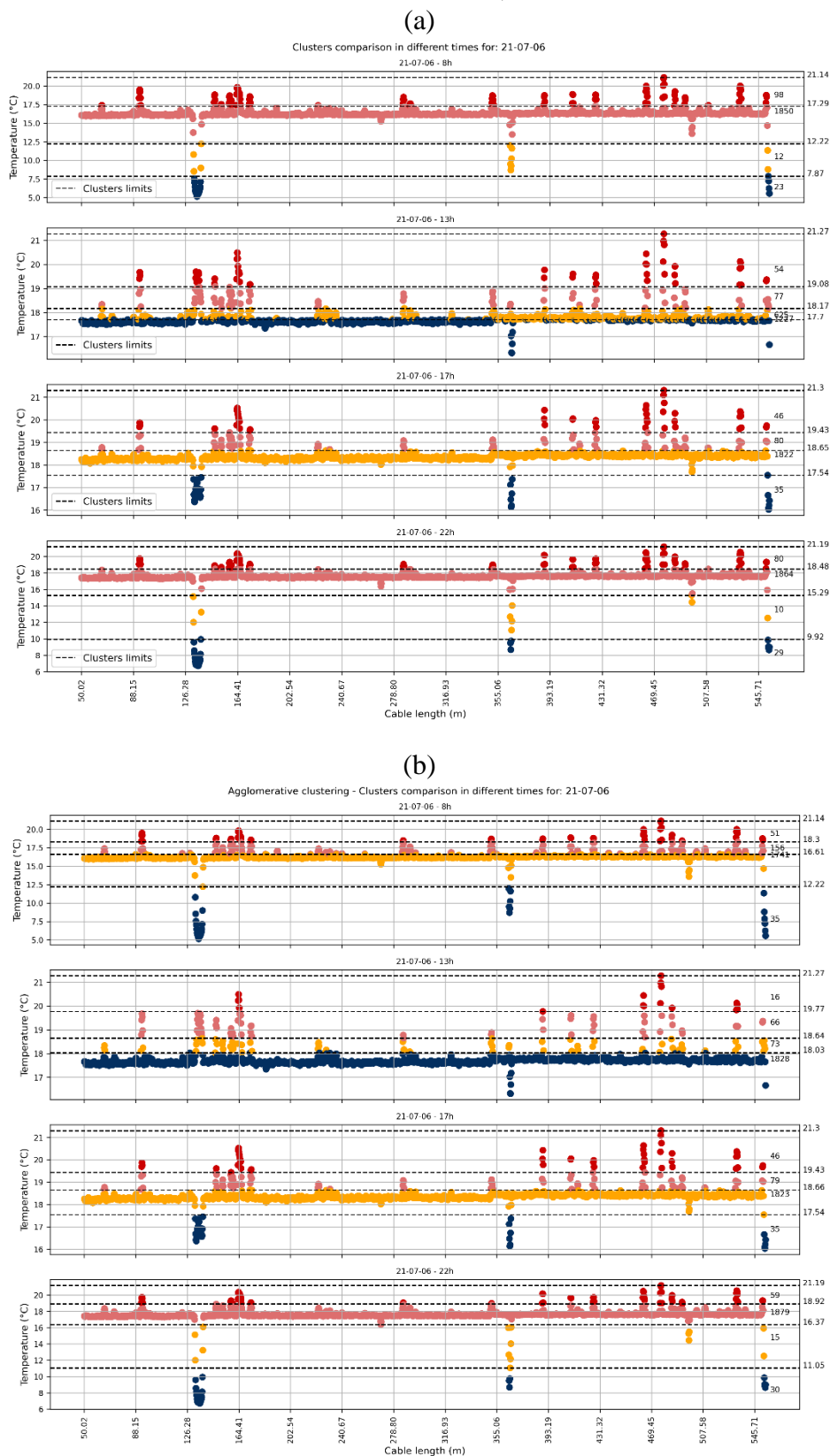
Fonte: Autor (2023)

Figura D-10 – Verificação do número de clusters, com o *Agglomerative clustering*, para os dados da campanha de Outono (2)



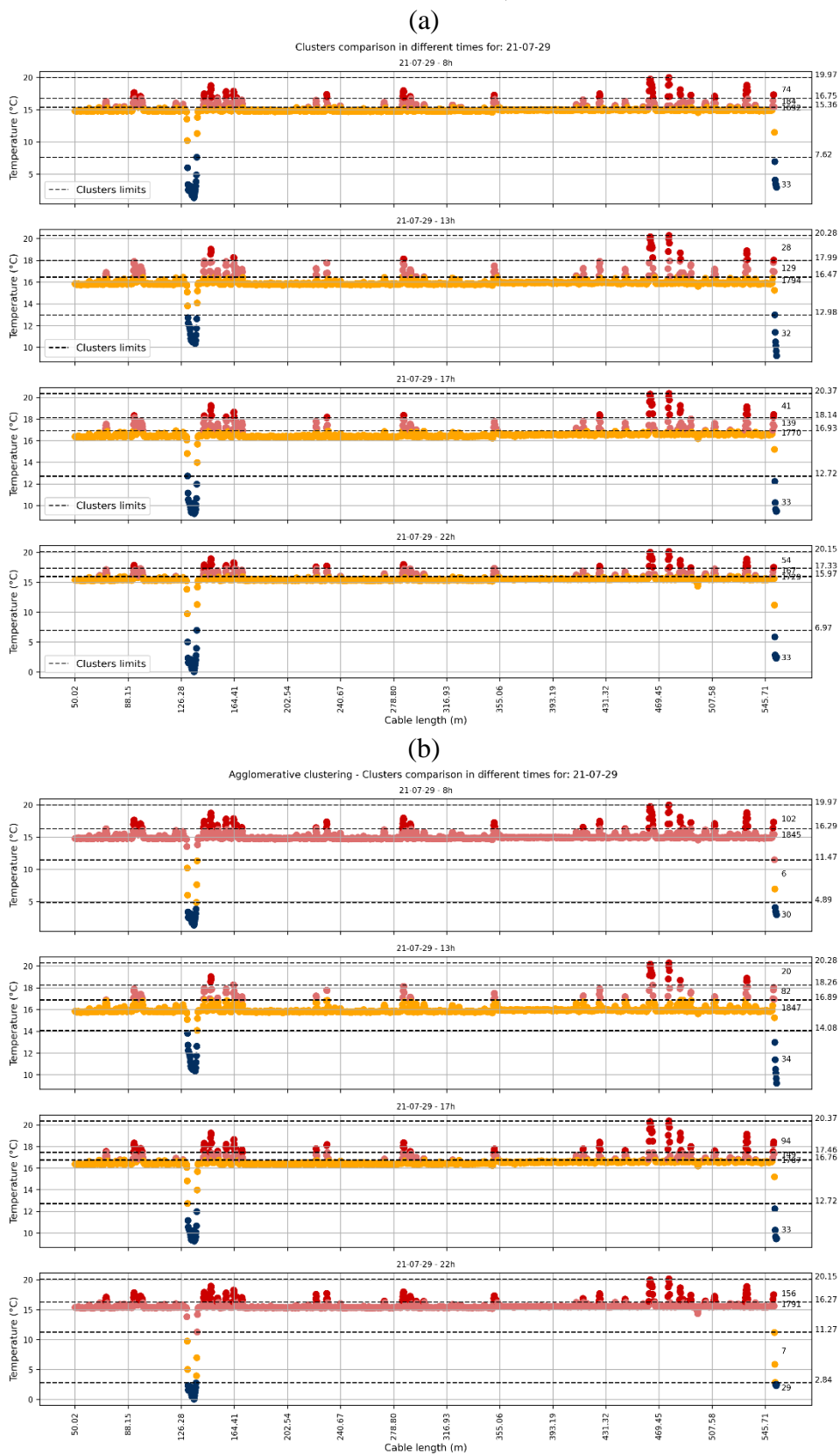
Fonte: Autor (2023)

Figura D-11 - Comparação da formação de clusters pelos algoritmos (a) K-means e (b) Agglomerative clustering, para os dados da campanha de Inverno (1), monitorados em diferentes horários do dia 06-07-2021, no trecho de montante



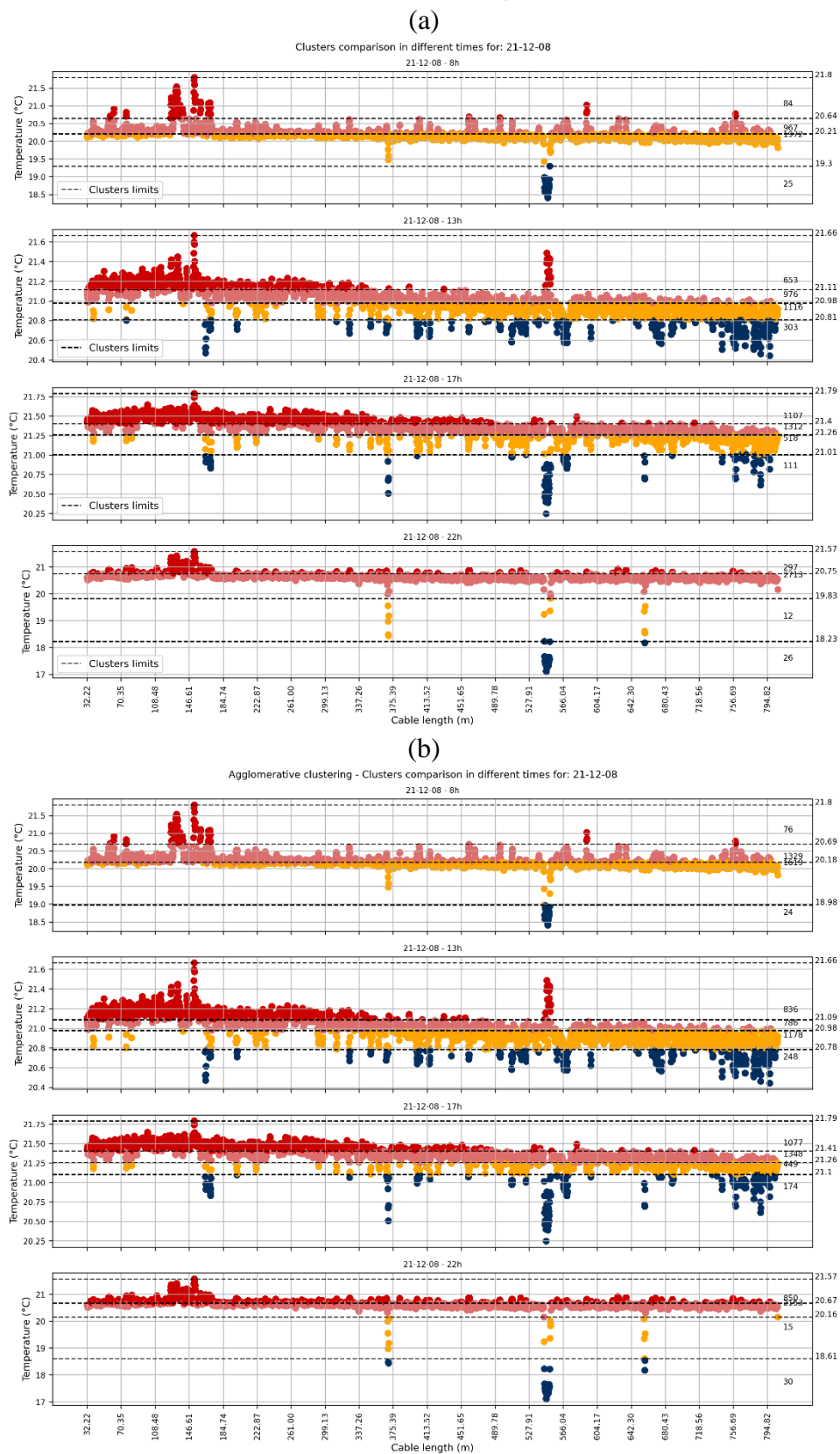
Fonte: Autor (2023)

Figura D-12 - Comparação da formação de clusters pelos algoritmos (a) *K-means* e (b) *Agglomerative clustering*, para os dados da campanha de Inverno (2), monitorados em diferentes horários do dia 29-07-2021, no trecho de montante



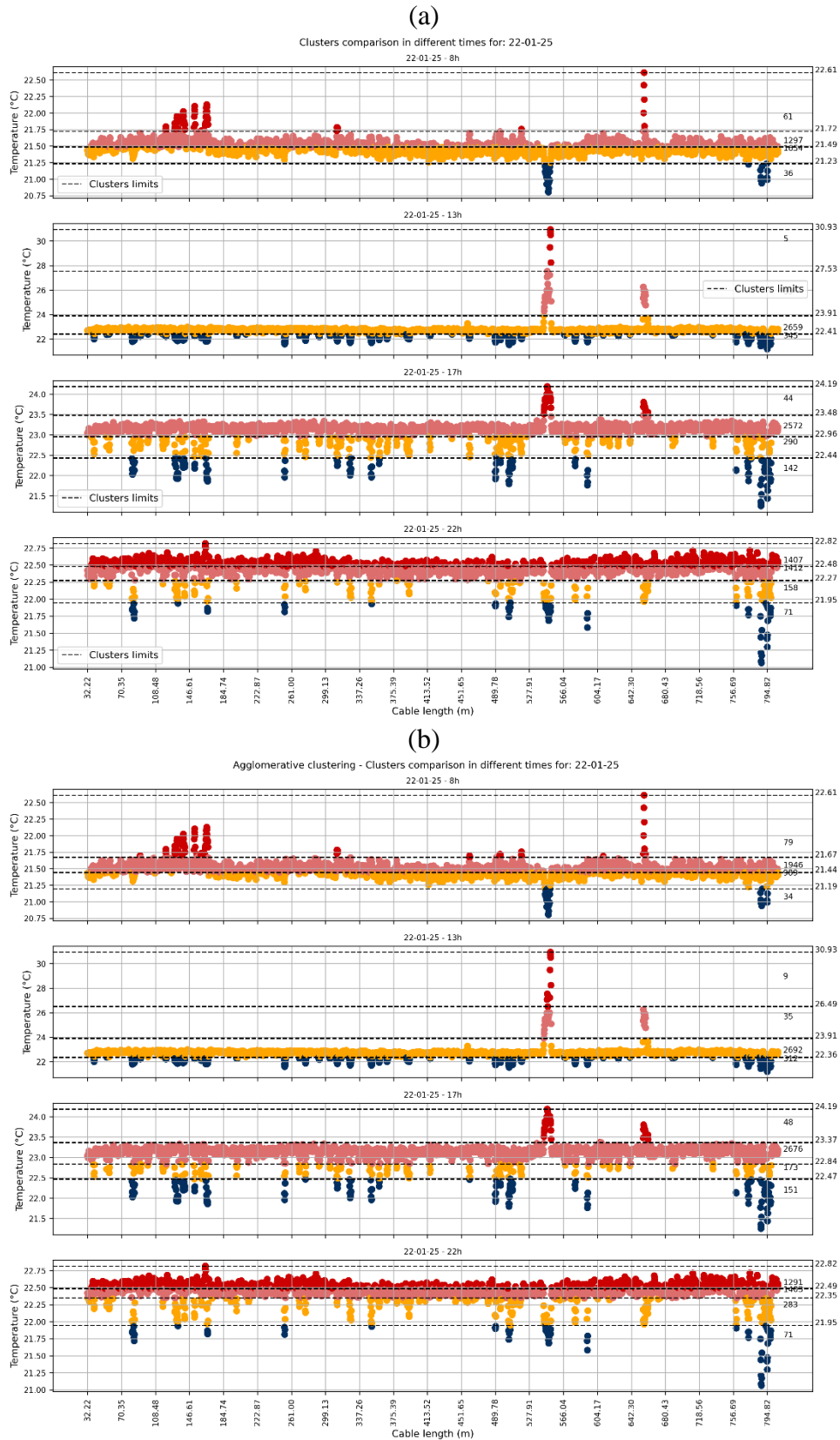
Fonte: Autor (2023)

Figura D-13 - Comparação da formação de clusters pelos algoritmos (a) *K-means* e (b) *Agglomerative clustering*, para os dados da campanha de Primavera, monitorados em diferentes horários do dia 08-12-2021, no trecho de montante



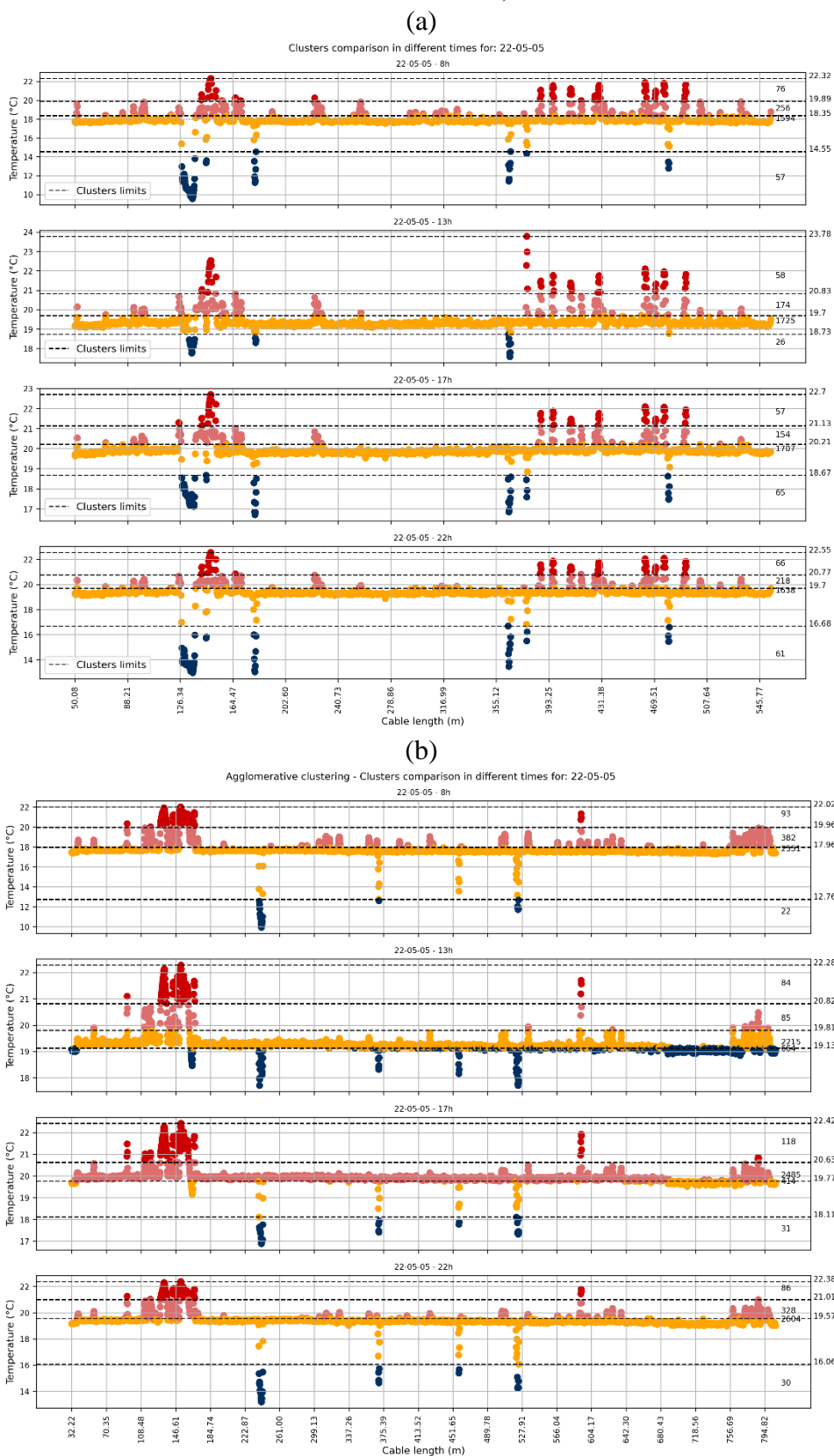
Fonte: Autor (2023)

Figura D-14 - Comparação da formação de clusters pelos algoritmos (a) *K-means* e (b) *Agglomerative clustering*, para os dados da campanha de Verão, monitorados em diferentes horários do dia 25-01-2022, no trecho de montante



Fonte: Autor (2023)

Figura D-15 - Comparação da formação de clusters pelos algoritmos (a) *K-means* e (b) *Agglomerative clustering*, para os dados da campanha de Outono (2), monitorados em diferentes horários do dia 05-05-2022, no trecho de montante



Fonte: Autor (2023)

APÊNDICE E – RESULTADOS GRÁFICOS DA OBSERVAÇÃO DE AMPLITUDES, MÉDIAS E DESVIOS PADRÃO DE TEMPERATURA

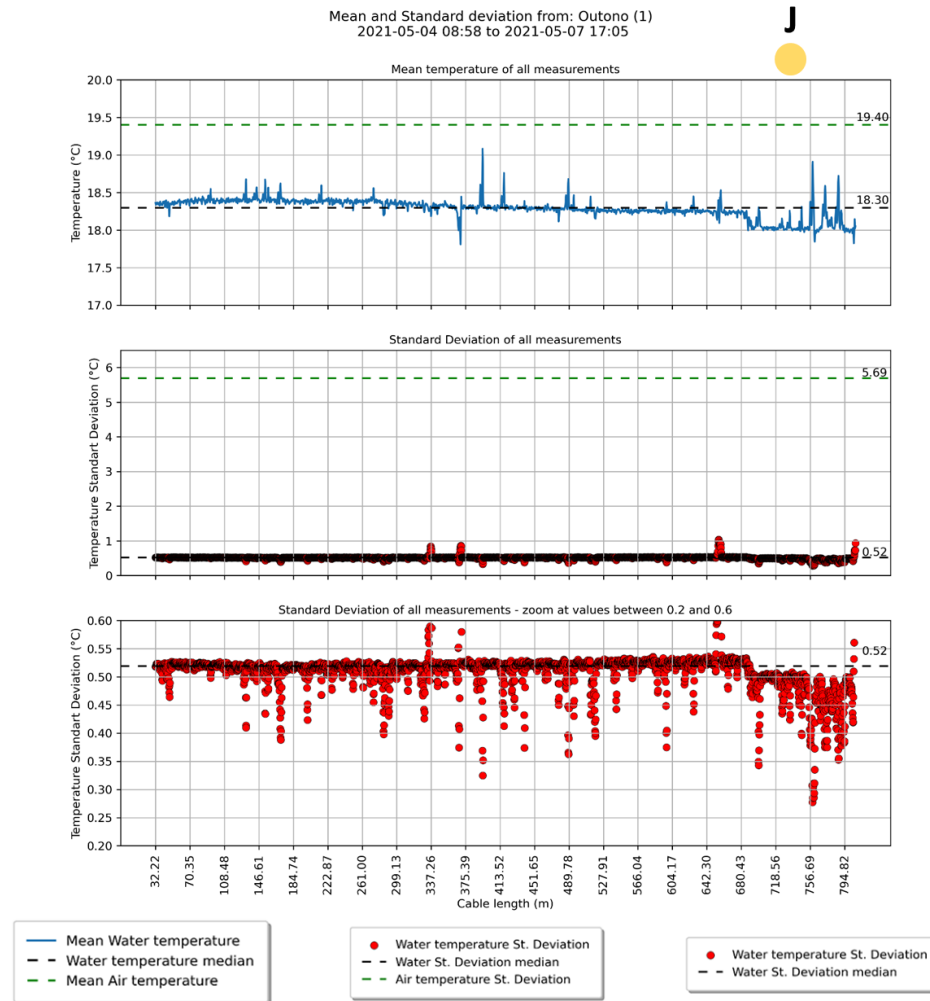
Este apêndice apresenta os resultados em gráficos para as amplitudes térmicas, médias e desvios de temperatura da água, monitoradas nas diferentes campanhas realizadas neste trabalho. Optou-se pela exibição de tais imagens neste apêndice a fim de complementar as discussões apresentadas no tópico 7.2 desta tese, onde tais resultados estatísticos foram avaliados como ferramenta de diferenciação dos fluxos de água subterrânea que contribuem ao meio superficial.

As Figuras E-1 a E-6 apresentam os dados de média e desvio padrão das temperatura em cada um dos pontos monitorados. Cada imagem é representativa de uma campanha de monitoramento realizada. A imagem da esquerda é referente ao trecho de jusante (maior comprimento ao longo do eixo x), enquanto a imagem da direita se refere ao trecho de montante. A campanha de Outono (1) (Figura E-1) não possui dados monitorados para o trecho de montante. O quadro superior de cada imagem apresenta os valores de temperatura média, em cada ponto monitorado. A mediana das temperaturas médias (linha tracejada preta) e a temperatura média do ar ao longo da campanha (linha tracejada verde) também são indicadas. O quadro central apresenta uma visão geral dos desvios padrões das temperaturas monitoradas ao longo da extensão da fibra ótica. O objetivo principal neste quadro é destacar a proximidade dos desvios dos trechos de cabo expostos ao ar à variação da temperatura do ar, também exibida pela linha tracejada verde. O quadro inferior restringe o intervalo de exibição dos valores de desvio padrão das temperaturas médias da água, de forma a diferenciar as zonas de interação com diferentes comportamentos. O intervalo de exibição variou para cada uma das campanhas e pode ser visto no subtítulo do gráfico do terceiro quadro.

Já as Figuras E-7 a E-12 apresentam os dados de amplitude térmica, em cada um dos pontos monitorados. Os dados são exibidos tanto em escala de campanha (“*all measured days*”) quanto em escala diária, indicada pelas linhas com diferentes cores. Datas com asterisco na legenda indicam dias que não tiveram monitoramento de todas as 24 horas, em virtude do início e término das campanhas de monitoramento ou em virtude de descontinuidade no levantamento dos dados, o que pode afetar os valores de amplitude visualizados. Cada imagem exhibe os dados dos trechos de jusante, à esquerda, e de montante, à direita. O quadro superior apresenta uma visão geral de todos os dados, em ambas as escalas temporais consideradas. O quadro central apresenta os dados de

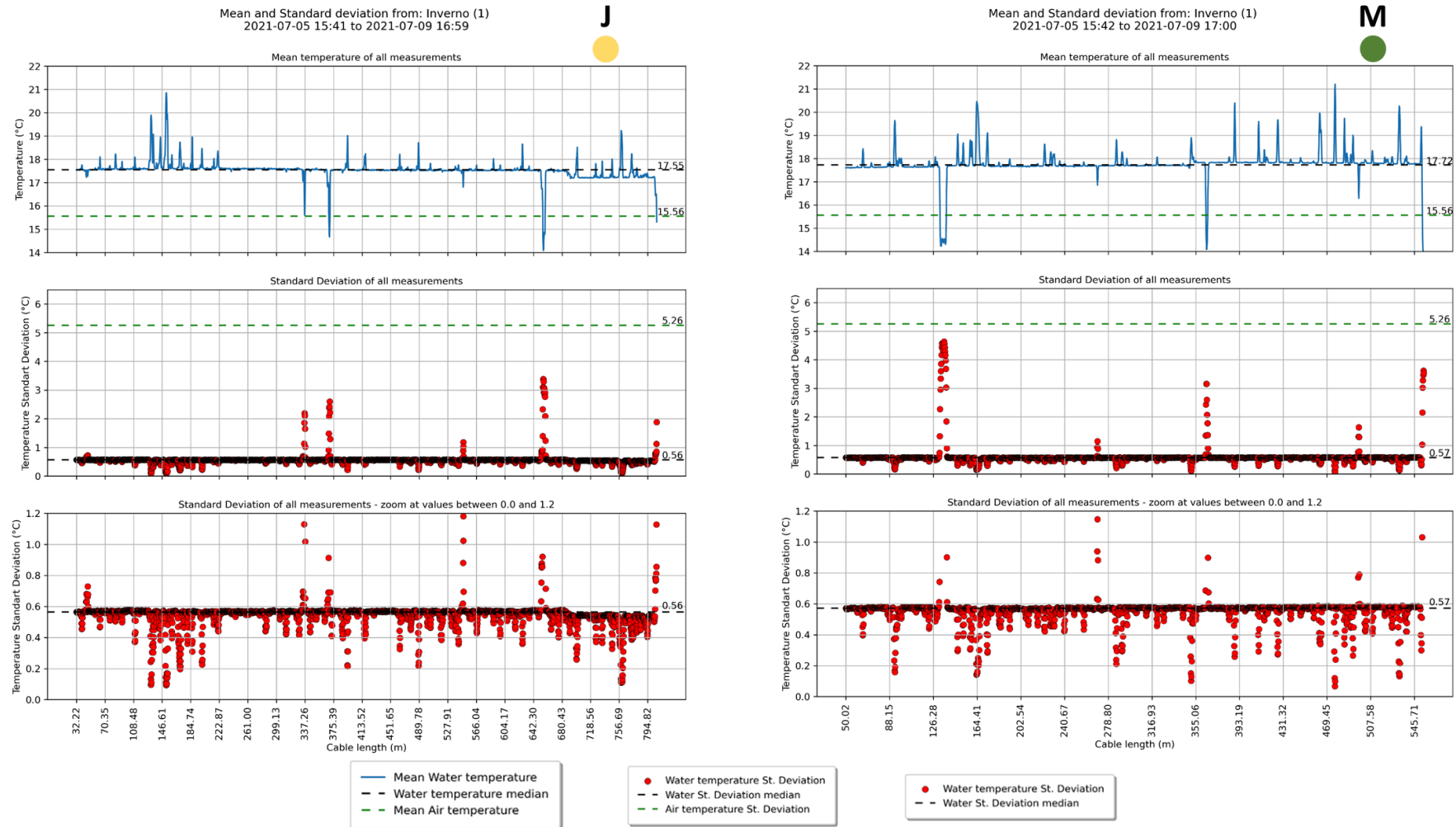
amplitude térmica em escala de campanha, enquanto o quadro inferior apresenta os dados de amplitude térmica em escala diária. Junto às legendas, são apresentados os valores numéricos das amplitudes térmicas observadas para a temperatura do ar, na escala da campanha e na escala diária, em cores semelhantes às linhas exibidas no gráfico.

Figura E-1 – Média e desvio padrão das temperaturas monitoradas na campanha de Outono (1), para o trecho de jusante



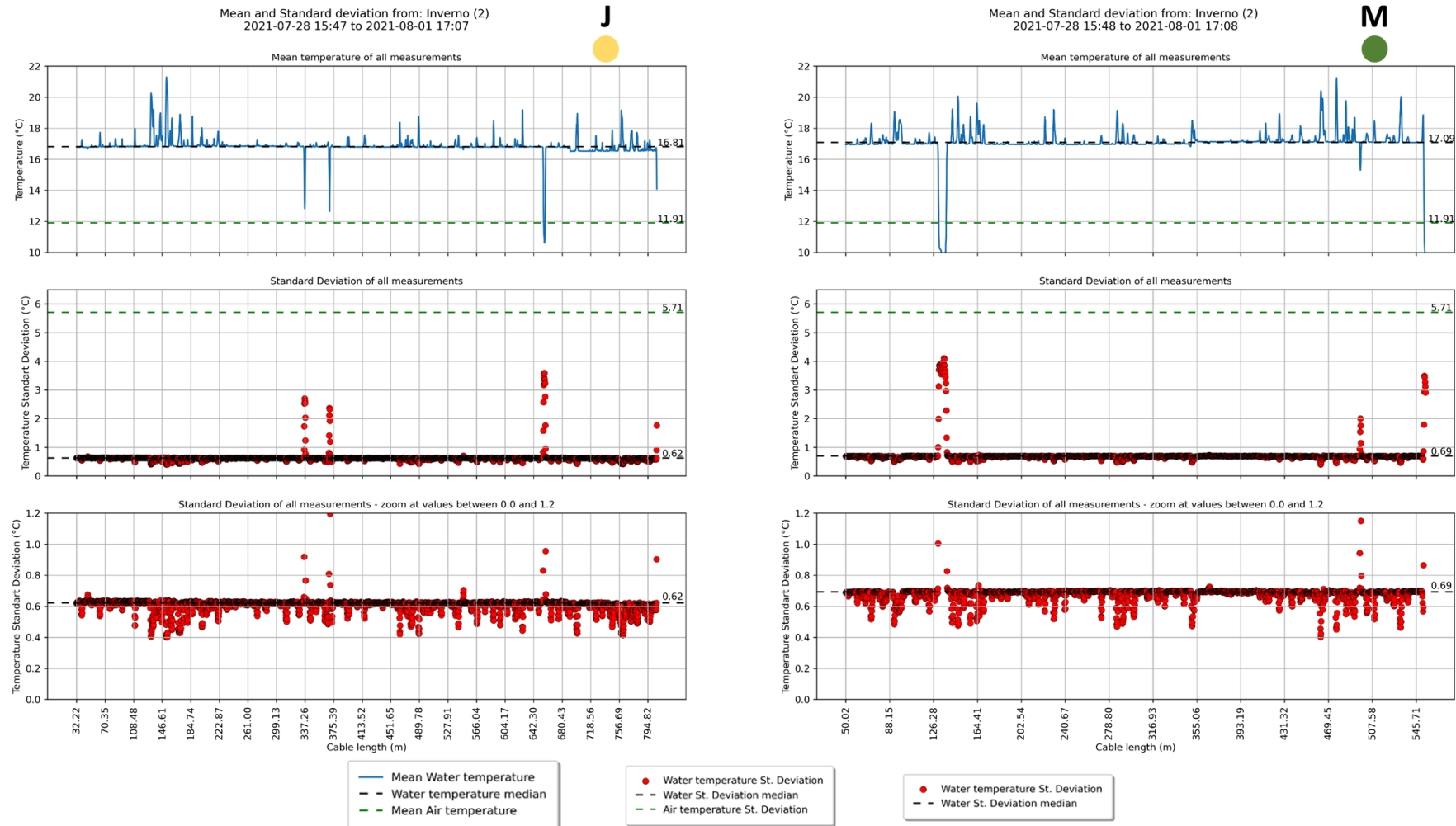
Fonte: Autor (2023)

Figura E-2 – Média e desvio padrão das temperaturas monitoradas na campanha de Inverno (1), para o trecho de jusante e montante



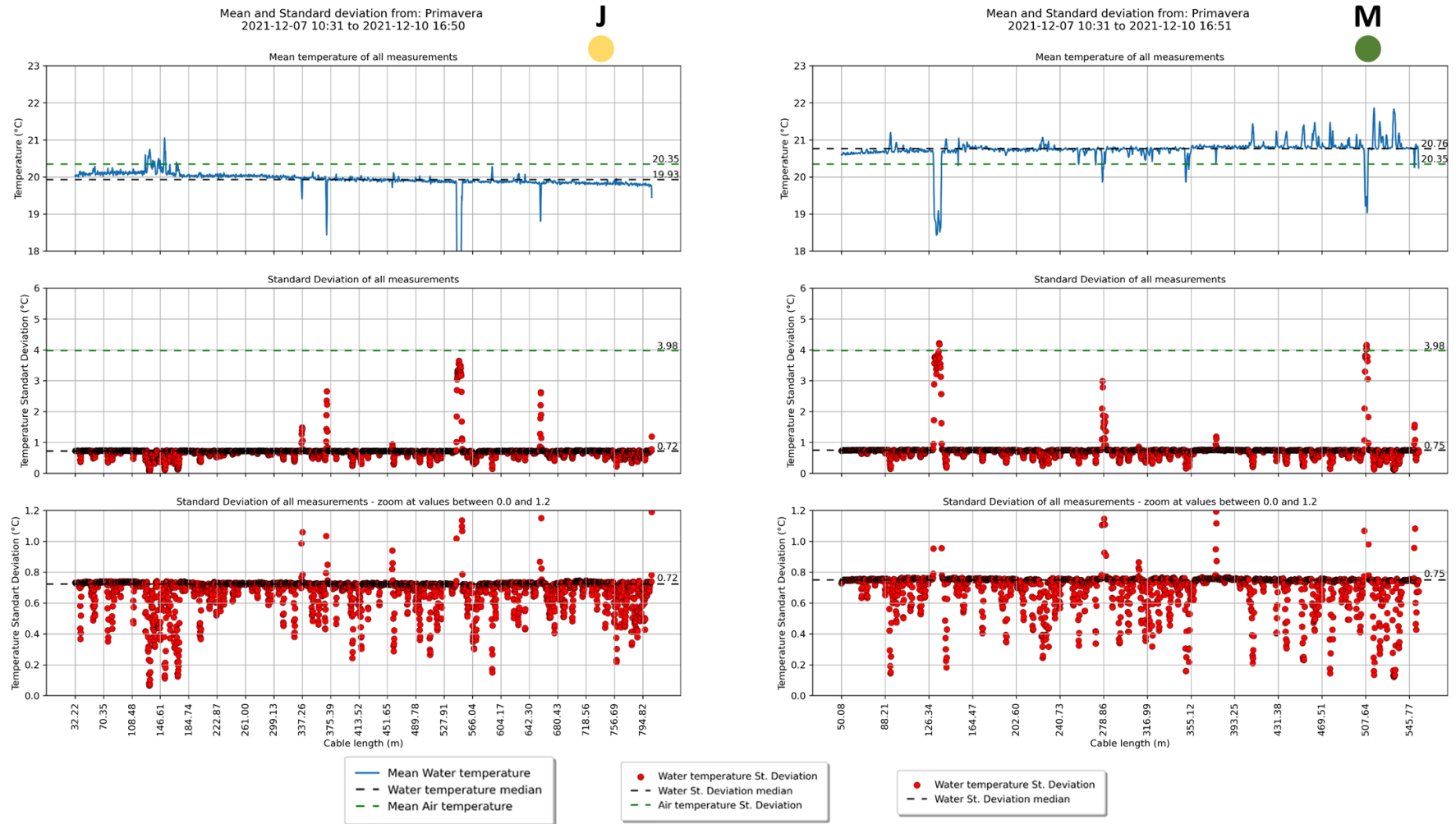
Fonte: Autor (2023)

Figura E-3 – Média e desvio padrão das temperaturas monitoradas na campanha de Inverno (2), para o trecho de jusante e montante



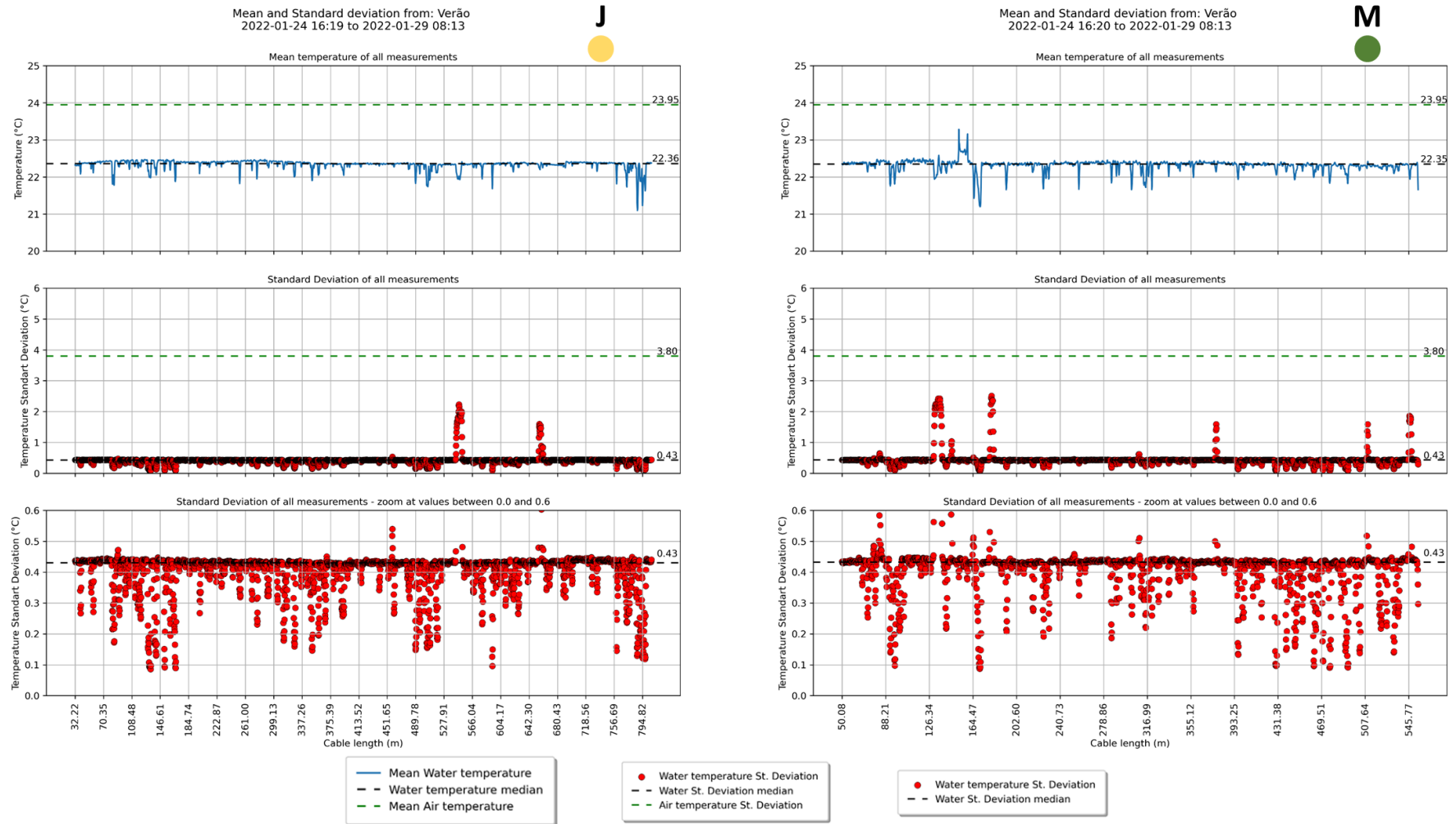
Fonte: Autor (2023)

Figura E-4 – Média e desvio padrão das temperaturas monitoradas na campanha de Primavera, para o trecho de jusante e montante



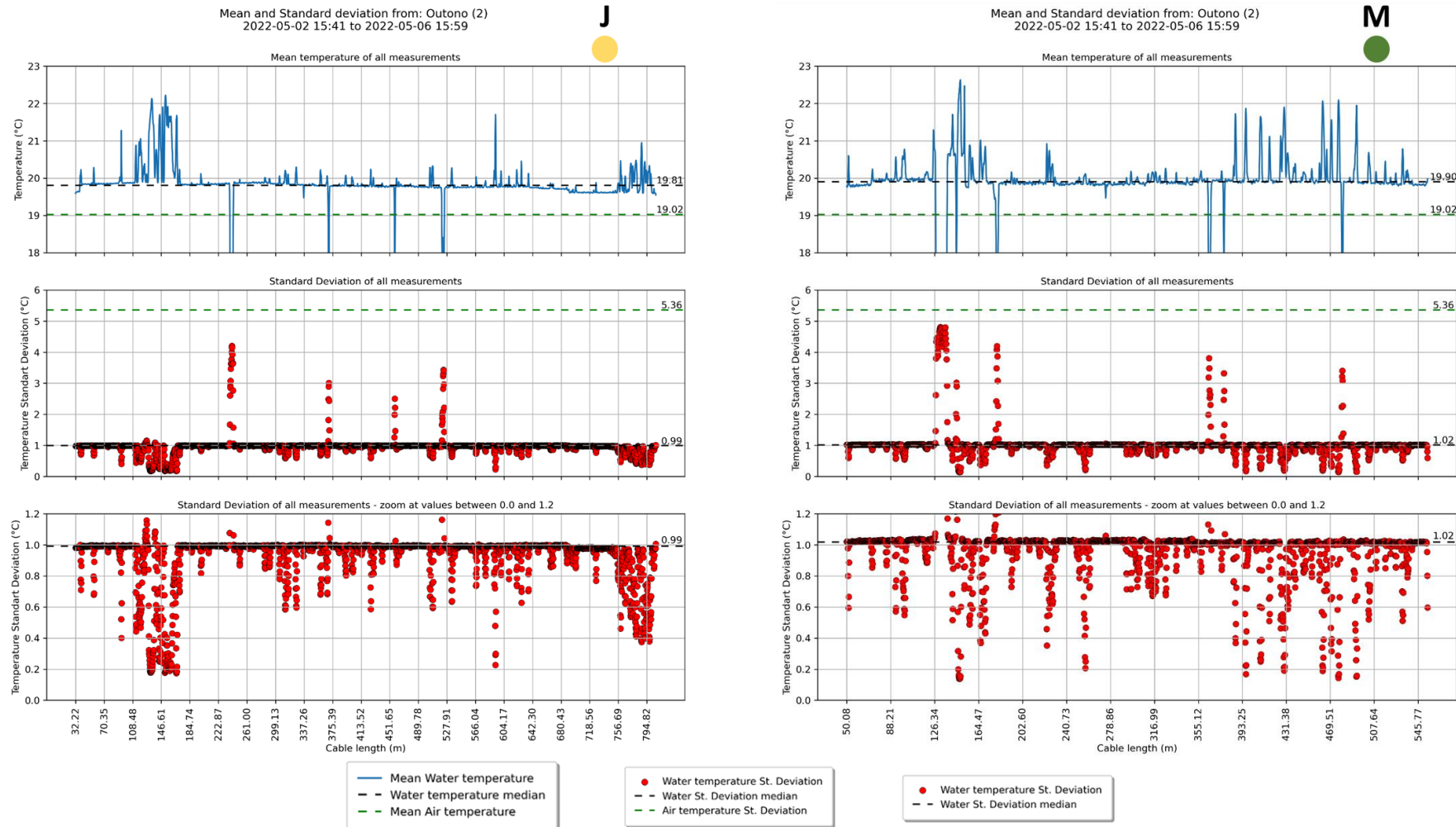
Fonte: Autor (2023)

Figura E-5 – Média e desvio padrão das temperaturas monitoradas na campanha de Verão, para o trecho de jusante e montante



Fonte: Autor (2023)

Figura E-6 – Média e desvio padrão das temperaturas monitoradas na campanha de Outono (2), para o trecho de jusante e montante



Fonte: Autor (2023)

Figura E-7 – Amplitudes térmicas diárias e em escala de campanha, para o monitoramento de Outono (1), para o trecho de jusante

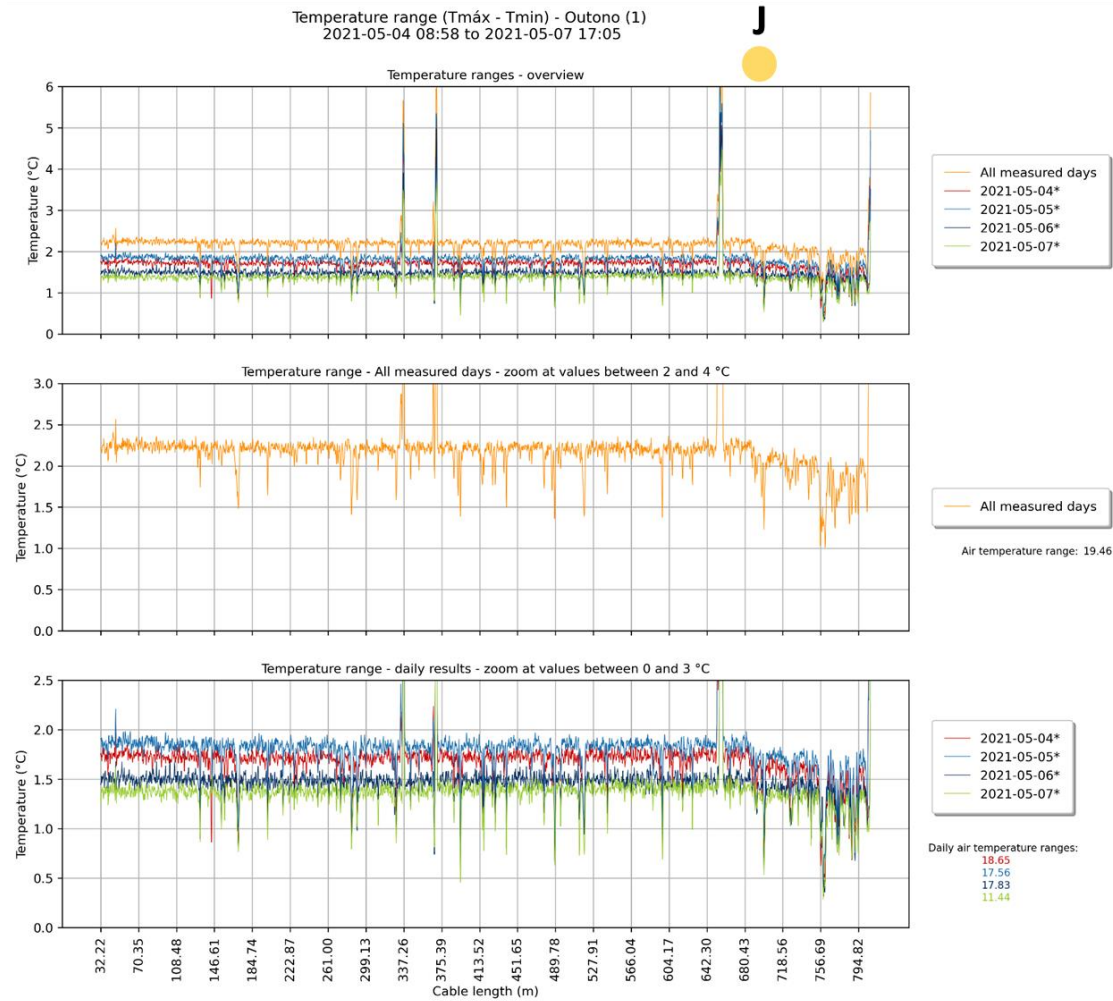
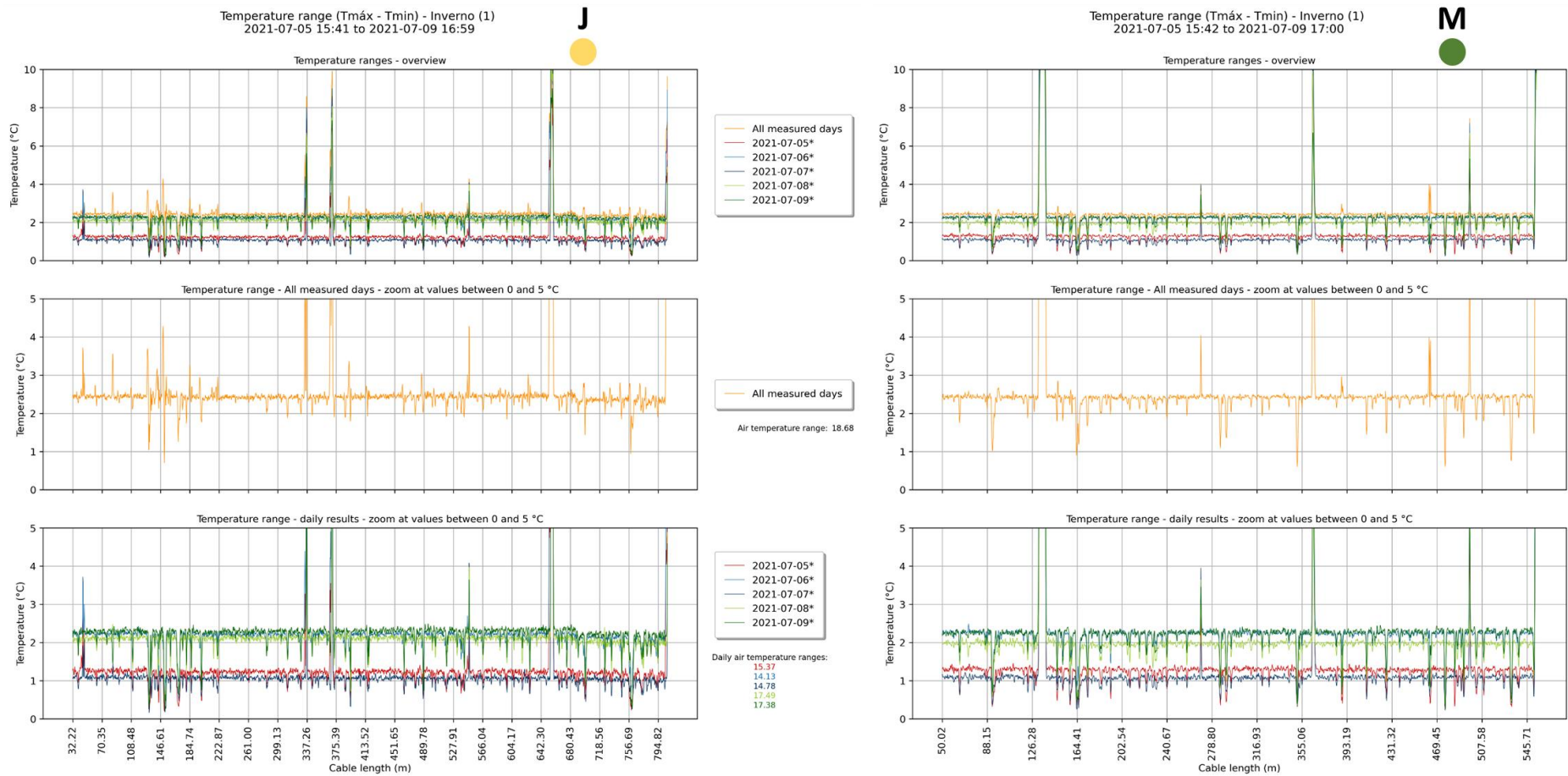
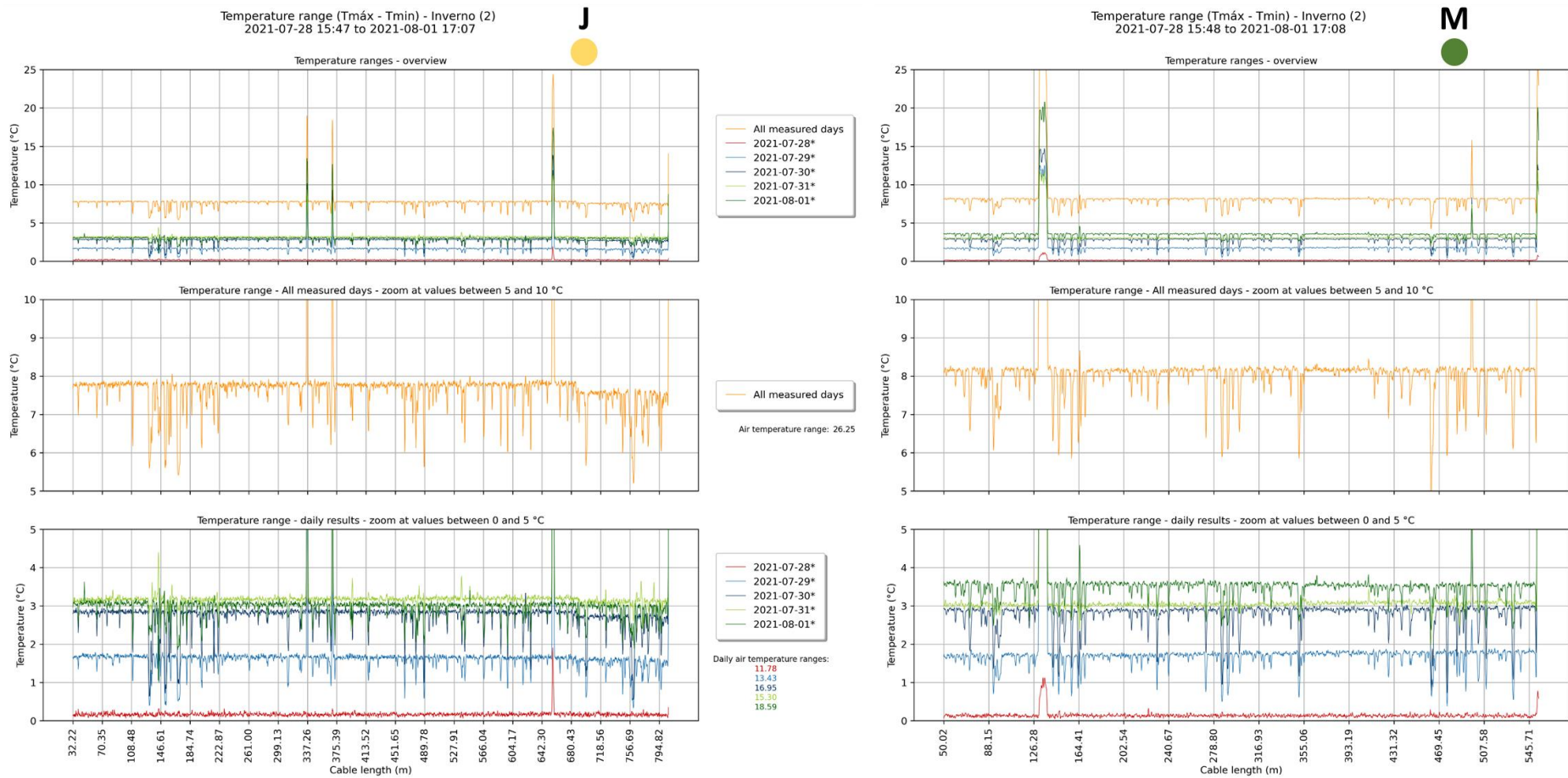


Figura E-8 – Amplitudes térmicas diárias e em escala de campanha, para o monitoramento de Inverno (1), para o trecho de jusante e montante



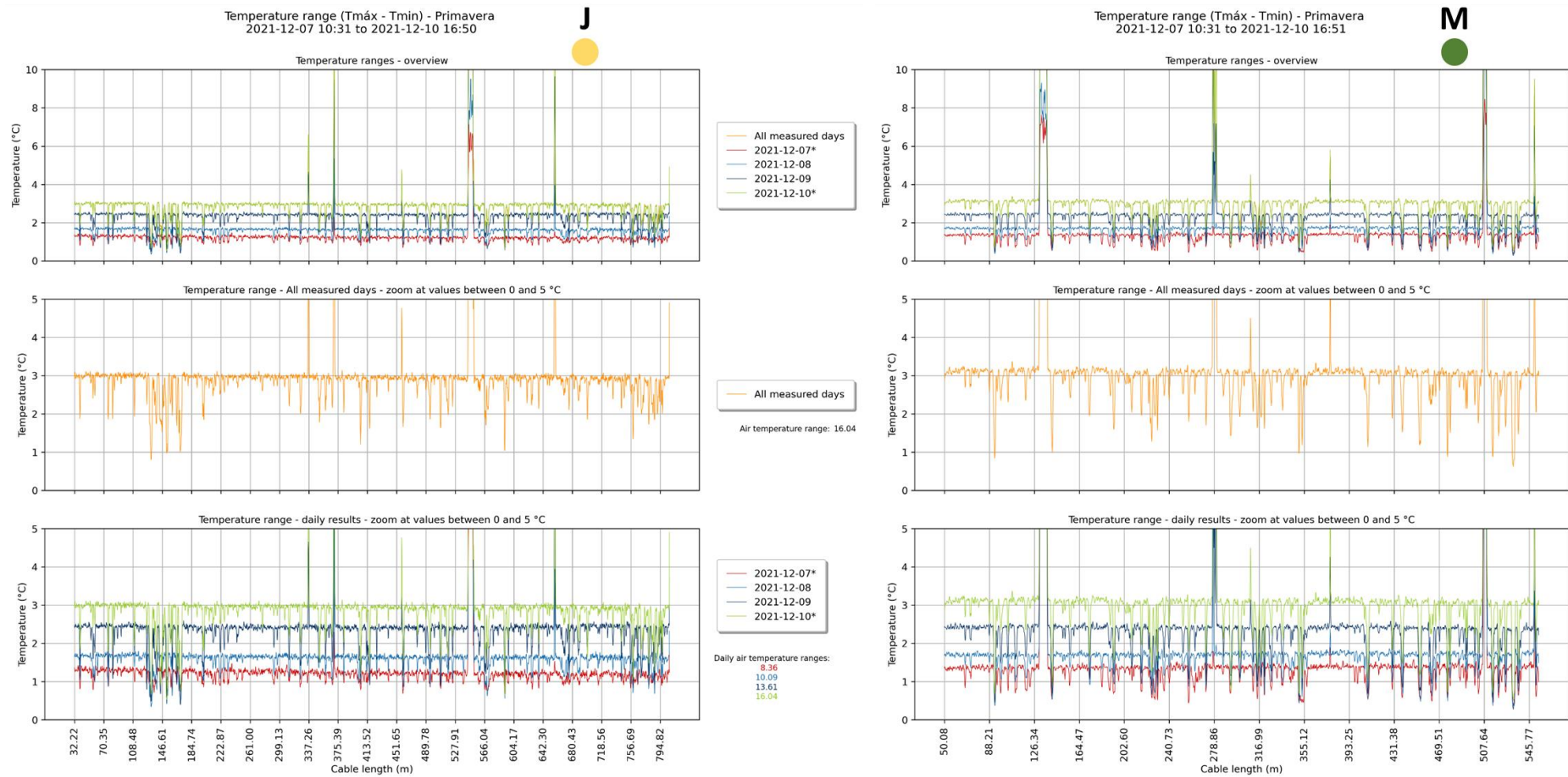
Fonte: Autor (2023)

Figura E-9 – Amplitudes térmicas diárias e em escala de campanha, para o monitoramento de Inverno (2), para o trecho de jusante e montante



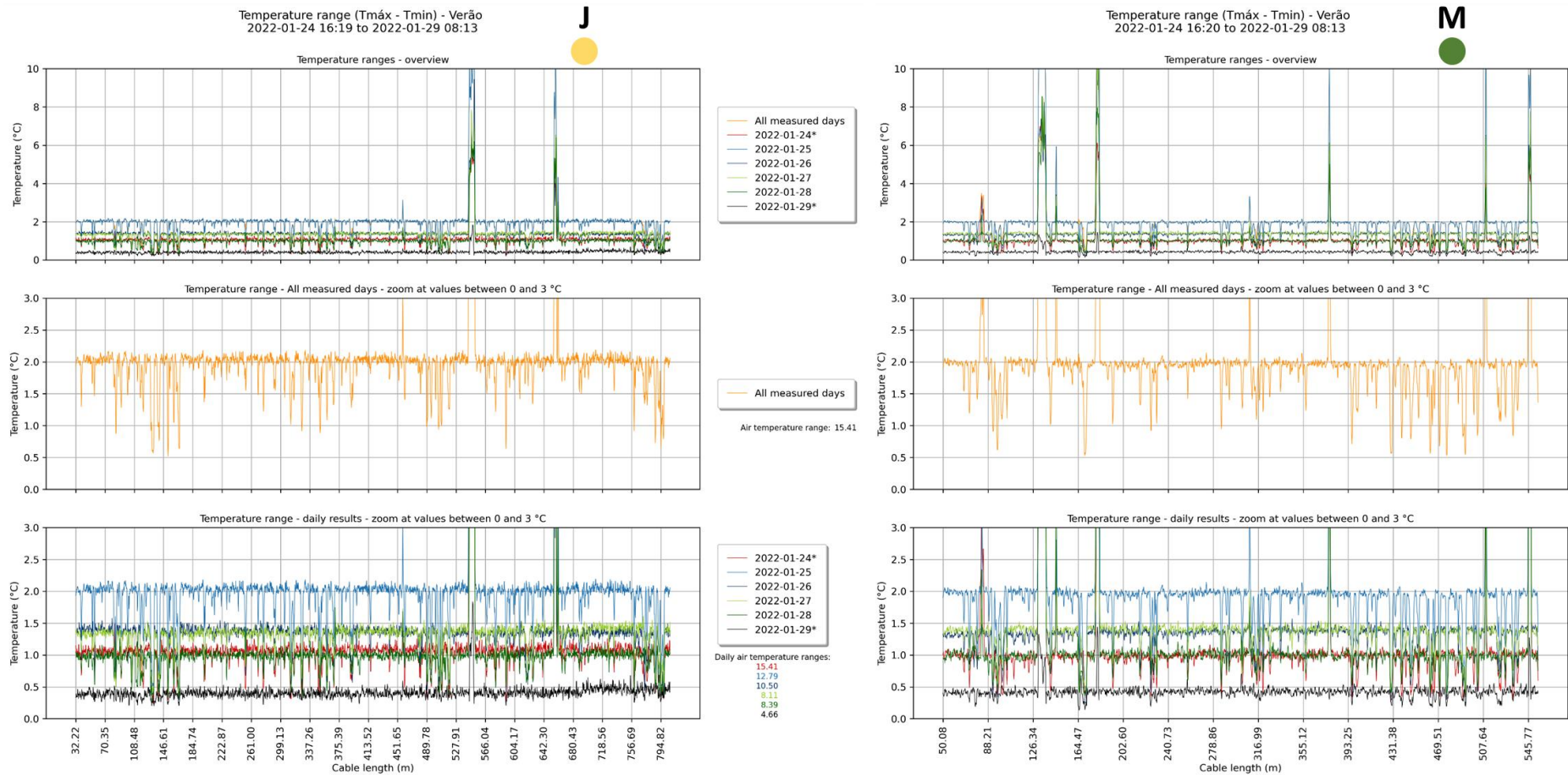
Fonte: Autor (2023)

Figura E-10 – Amplitudes térmicas diárias e em escala de campanha, para o monitoramento de Primavera, para o trecho de jusante e montante



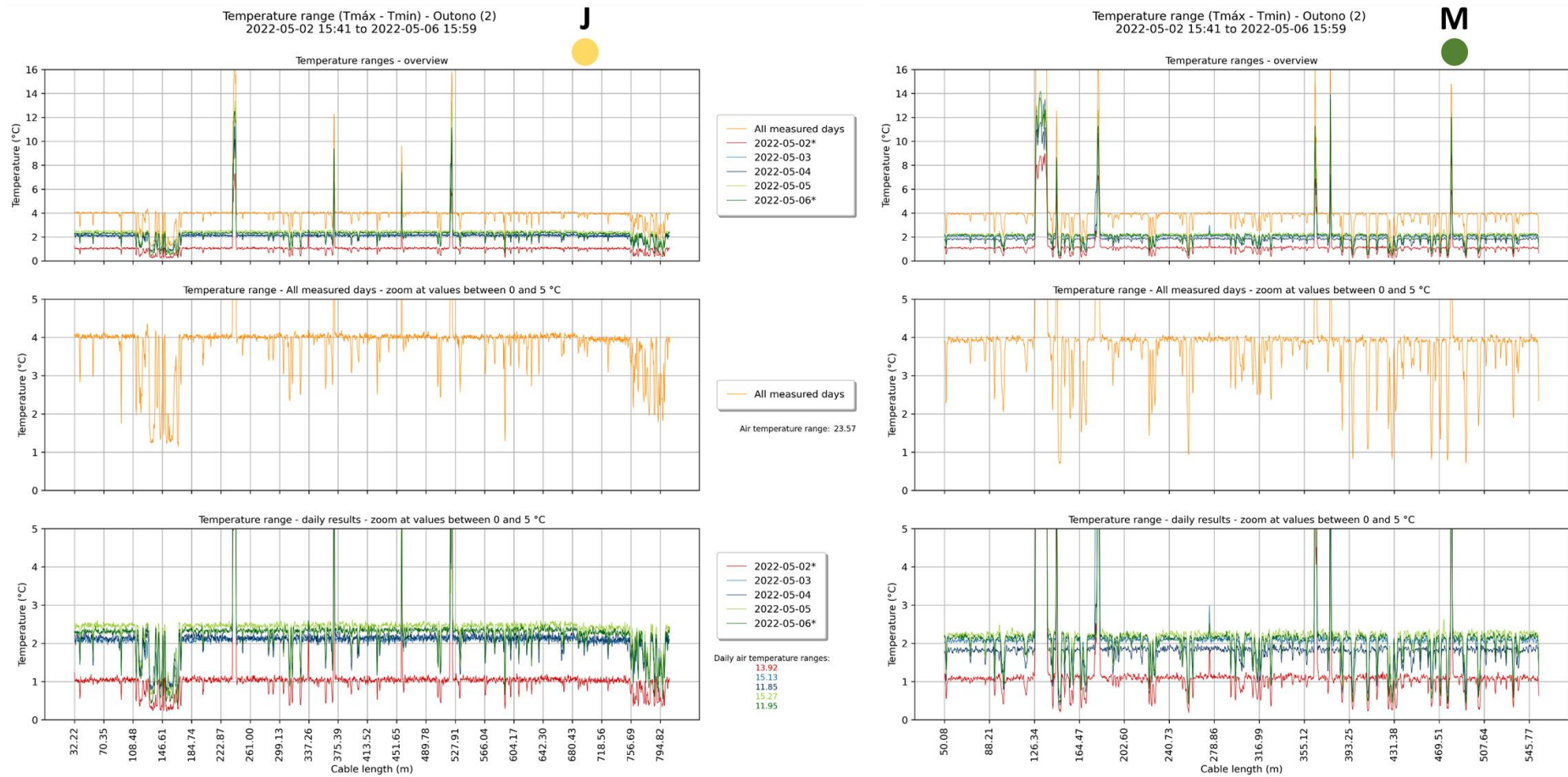
Fonte: Autor (2023)

Figura E-11 – Amplitudes térmicas diárias e em escala de campanha, para o monitoramento de Verão, para o trecho de jusante e montante



Fonte: Autor (2023)

Figura E-12 – Amplitudes térmicas diárias e em escala de campanha, para o monitoramento de Outono (2), para o trecho de jusante e montante



Fonte: Autor (2023)

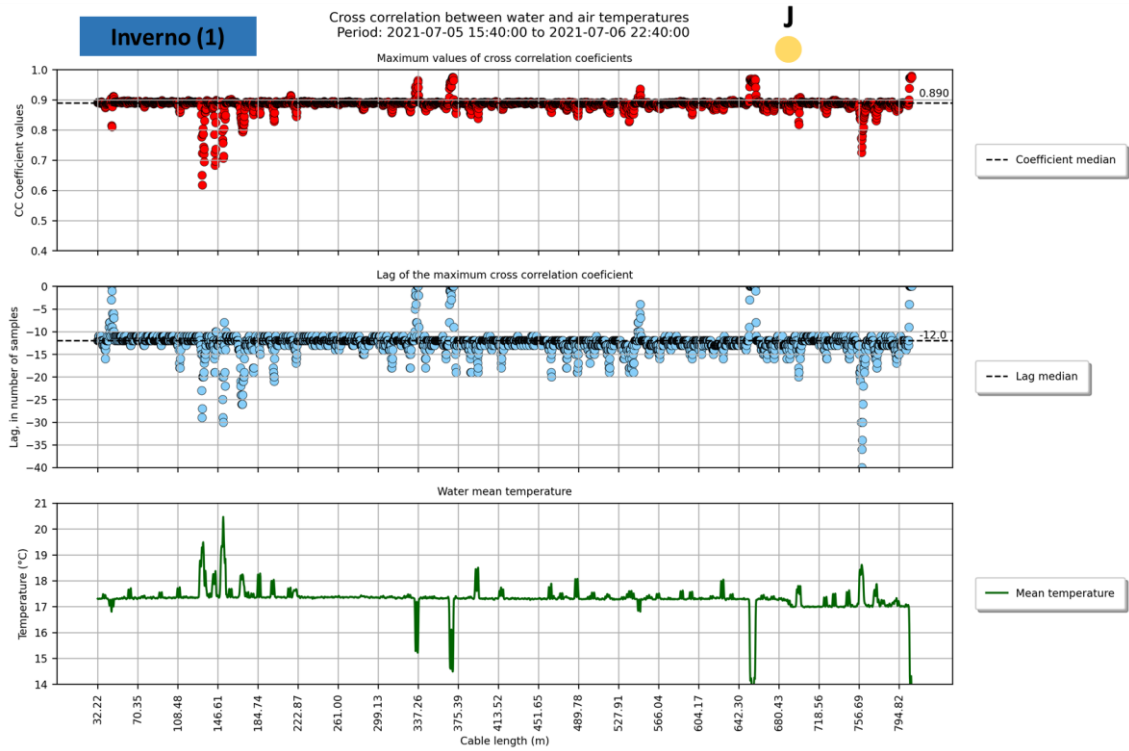
APÊNDICE F – RESULTADOS GRÁFICOS DA CORRELAÇÃO CRUZADA

Este apêndice apresenta os resultados em gráficos para os valores máximos dos coeficientes de correlação cruzada e os respectivos deslocamentos relativos feitos nas séries, para obtenção de tais coeficientes. Estes resultados são apresentados para cada um dos pontos monitorados ao longo do comprimento da fibra ótica e são indicativos da similaridade entre a série temporal de temperatura da água e a série temporal de temperatura do ar. Para as campanhas de Inverno (1) e Inverno (2), foram escolhidos os períodos com maior quantidade de dados contínuos. Para as campanhas de Primavera, Verão e Outono (2), que foram executadas de forma contínua, todo o conjunto de dados foi utilizado para a determinação dos coeficientes e dos deslocamentos.

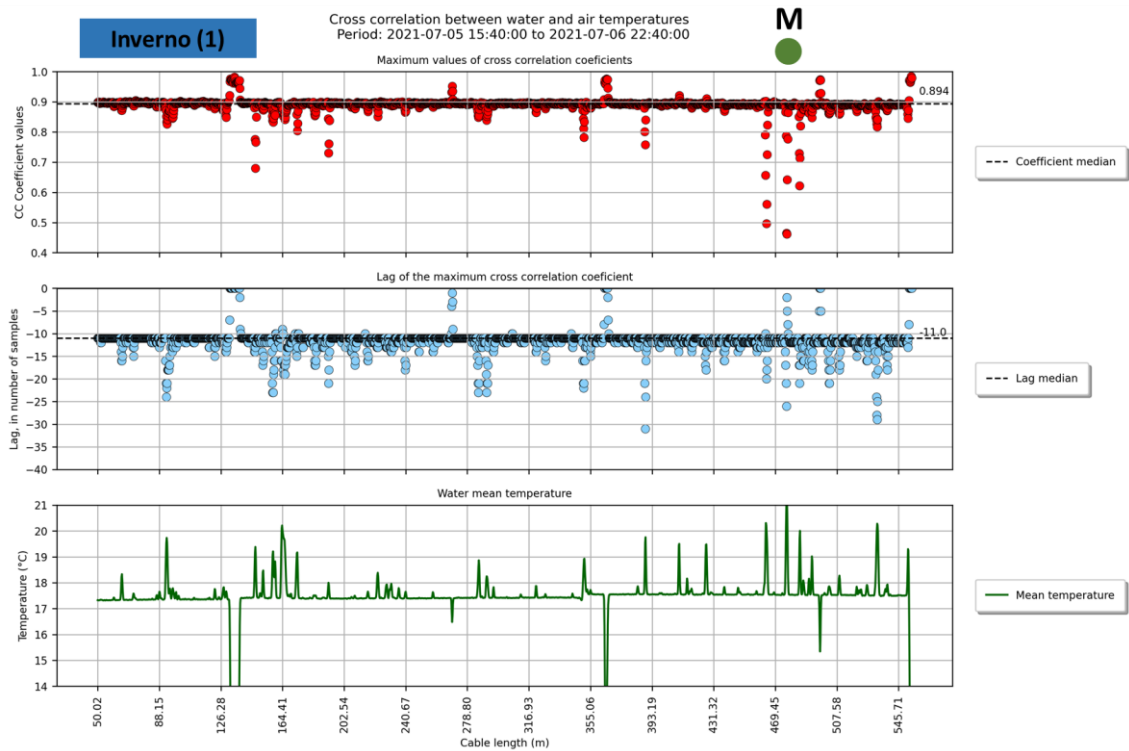
As Figuras F-1 a F-5 apresentam tais resultados, da seguinte forma: cada figura contém duas imagens, uma para cada trecho de monitoramento (jusante e montante). Cada imagem contém três quadros: o quadro superior apresenta os valores máximos dos coeficientes de correlação cruzada. Já o quadro central apresenta os valores de deslocamento relativo (*lag*) aplicado a série de temperatura da água para obtenção da máxima correlação com a série de temperatura do ar. Já o quadro inferior apresenta os valores de temperatura média, em cada um dos pontos monitorados. As anomalias de temperatura podem ser diretamente relacionadas aos outros dois parâmetros, permitindo a distinção do comportamento das diferentes zonas de interação.

Figura F-1 – Correlação cruzada para a campanha de Inverno (1) - dados monitorados entre 05 e 06 de julho de 2021 (31h) para o trecho de (a) jusante e (b) montante

(a)



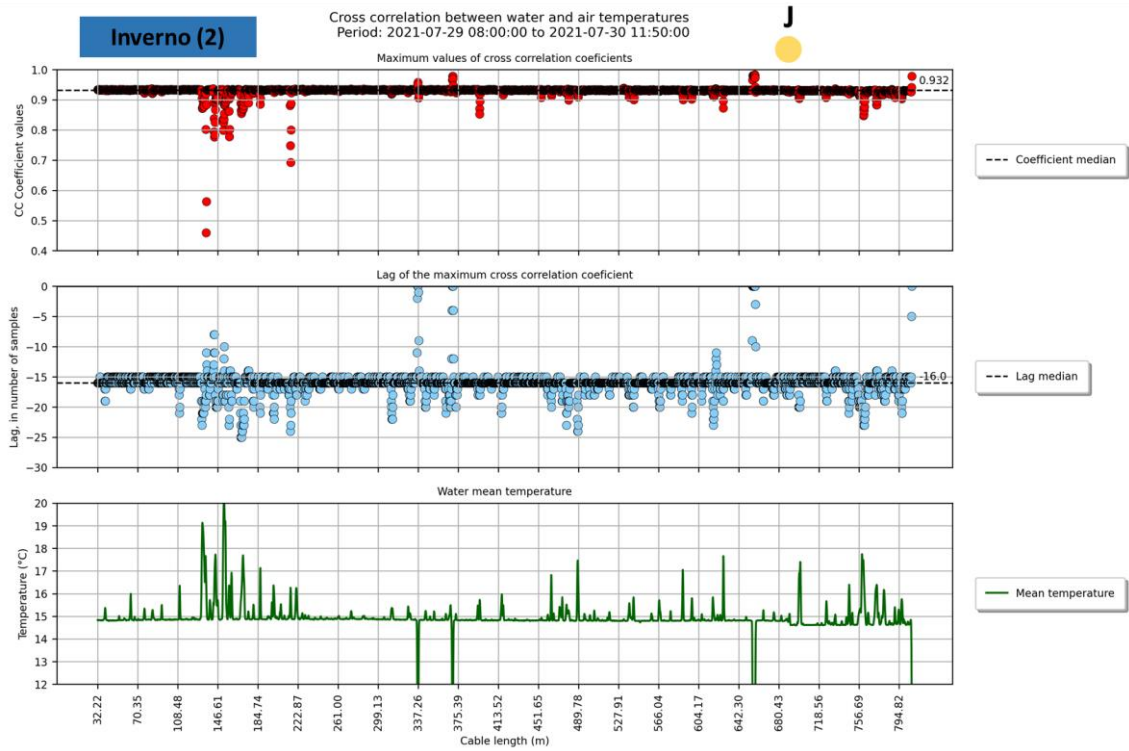
(b)



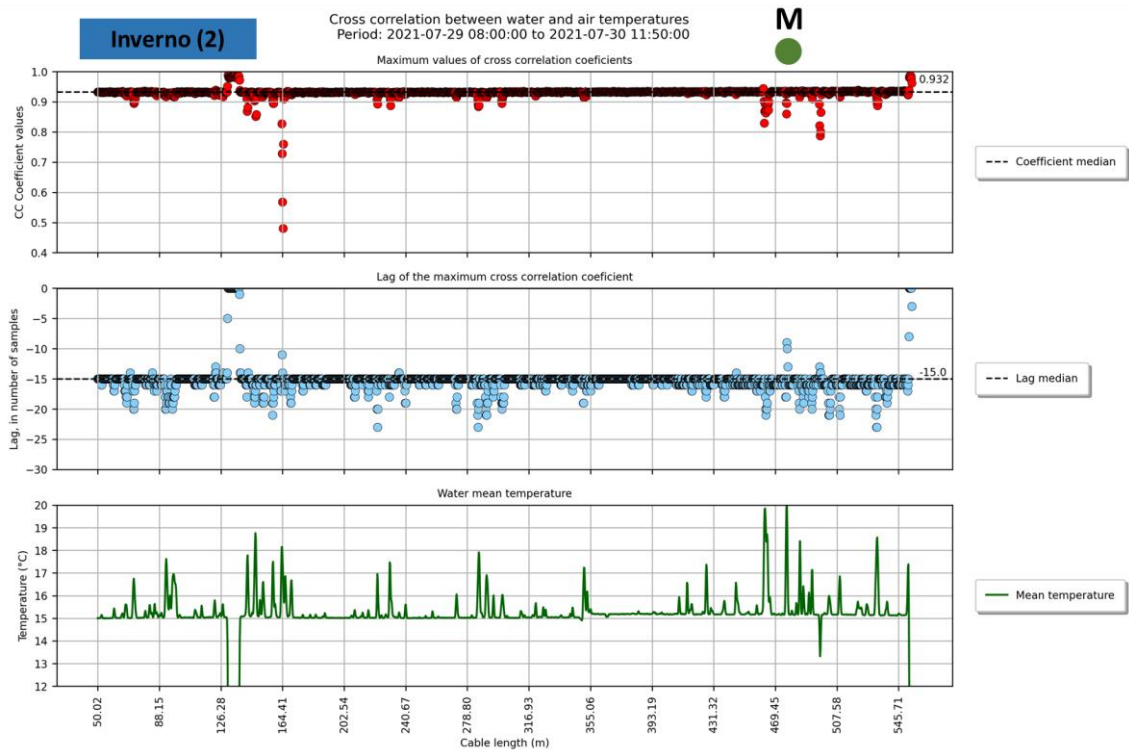
Fonte: Autor (2023)

Figura F-2 – Correlação cruzada para a campanha de Inverno (2) - dados monitorados entre 29 e 30 de julho de 2021 (28h) para o trecho de (a) jusante e (b) montante

(a)



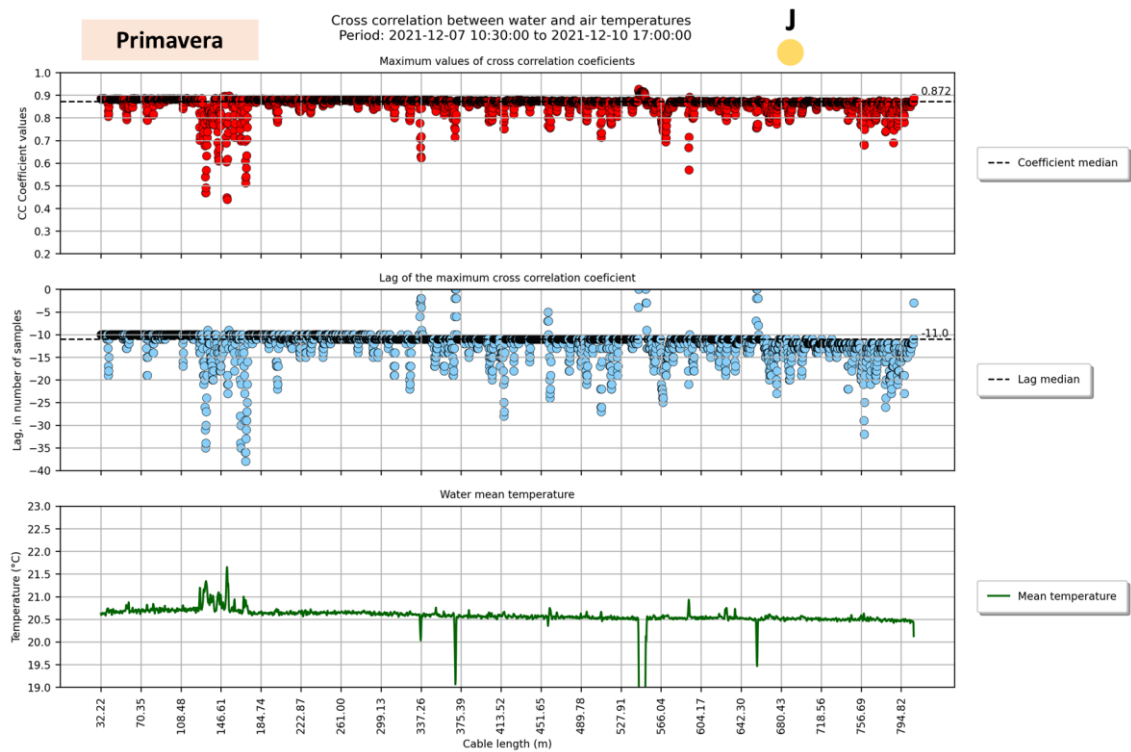
(b)



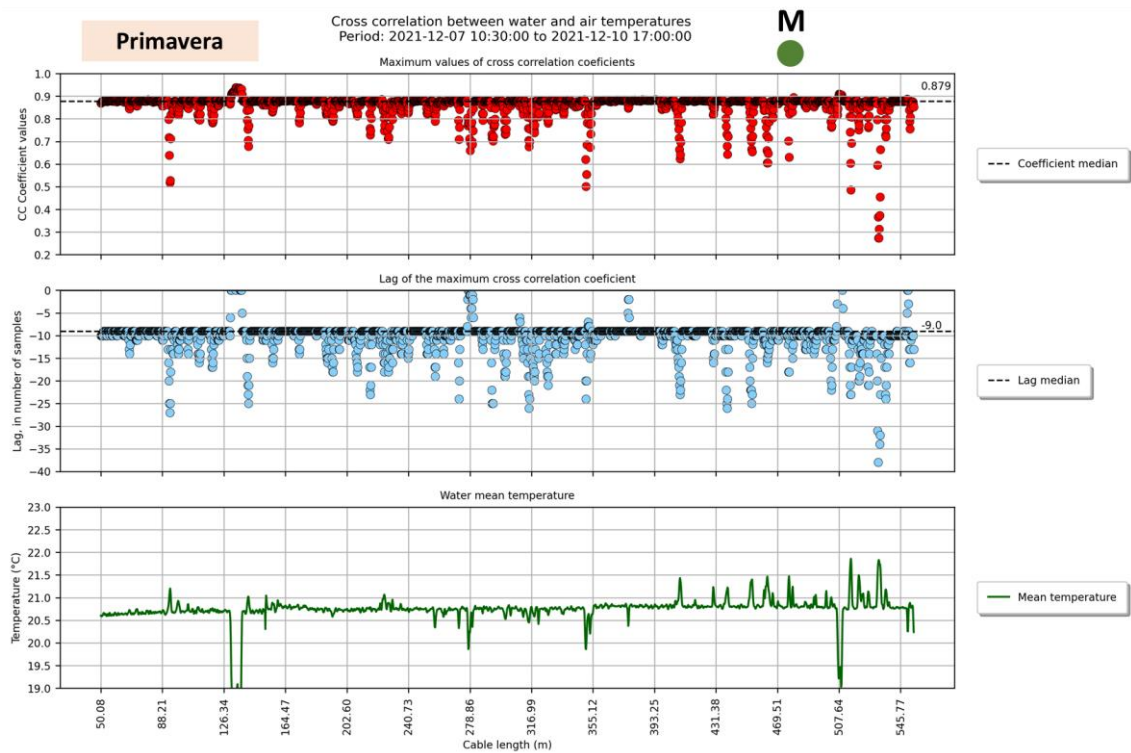
Fonte: Autor (2023)

Figura F-3 – Correlação cruzada para a campanha de Primavera - dados monitorados entre 07 e 10 de dezembro de 2021 (82h) para o trecho de (a) jusante e (b) montante

(a)



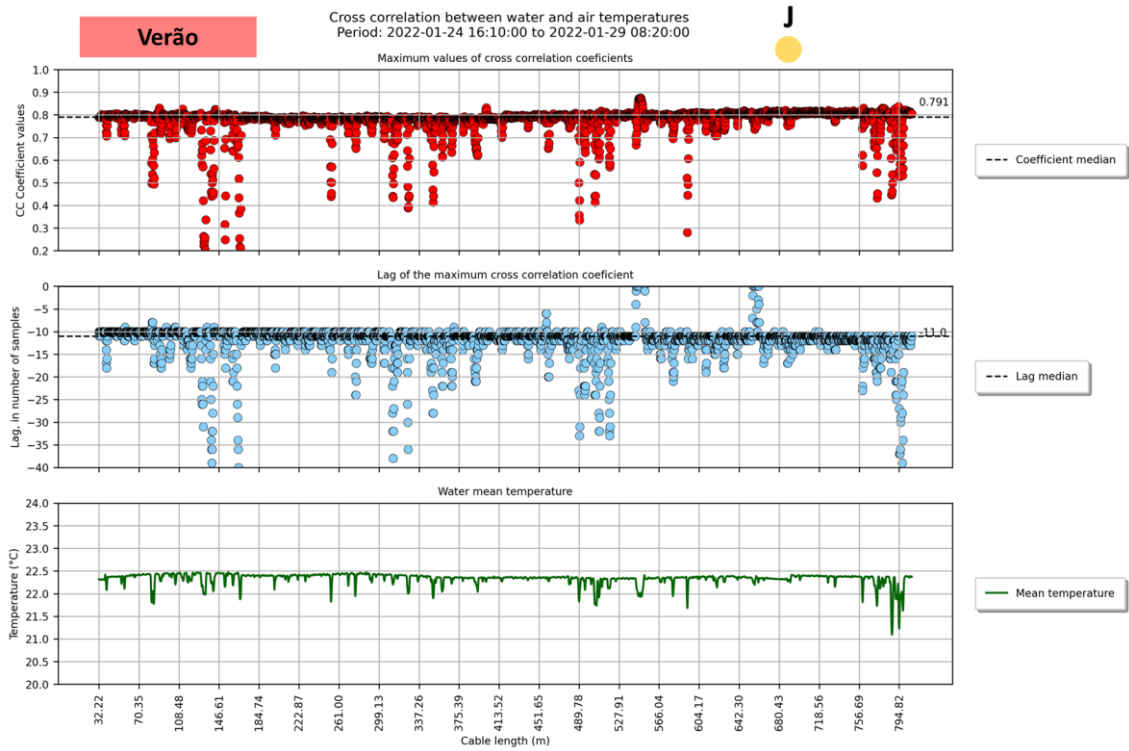
(b)



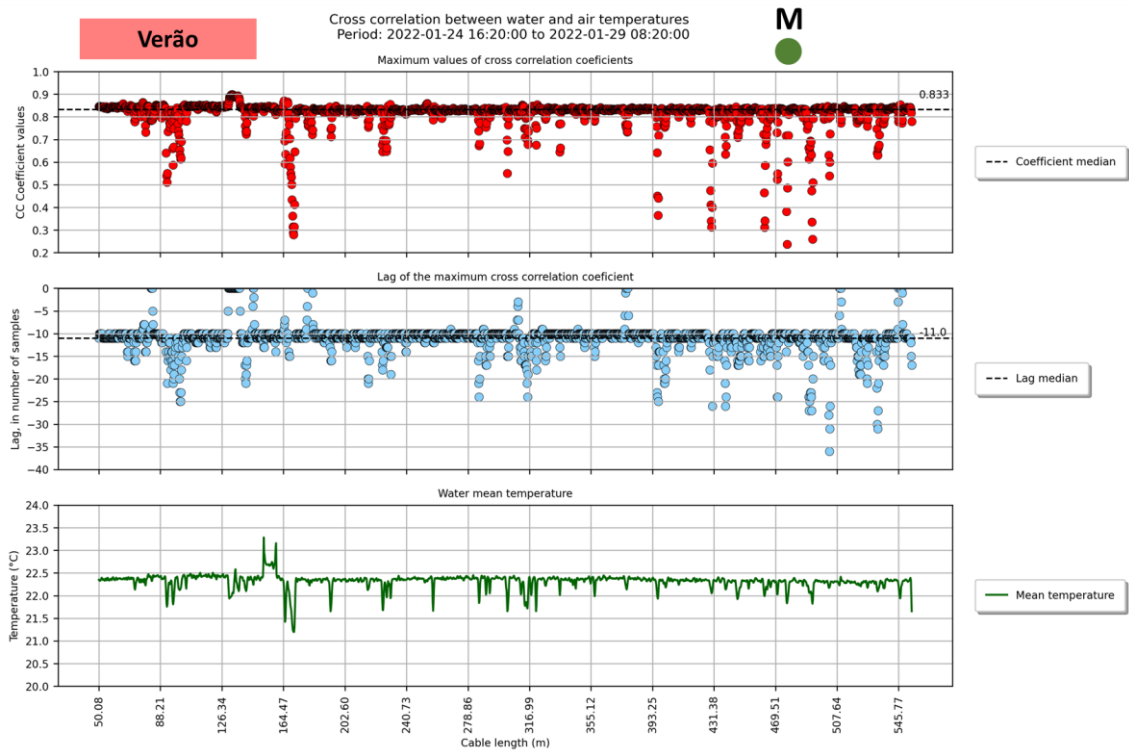
Fonte: Autor (2023)

Figura F-4 – Correlação cruzada para a campanha de Verão - dados monitorados entre 24 e 29 de julho de 2021 (112h) para o trecho de (a) jusante e (b) montante

(a)



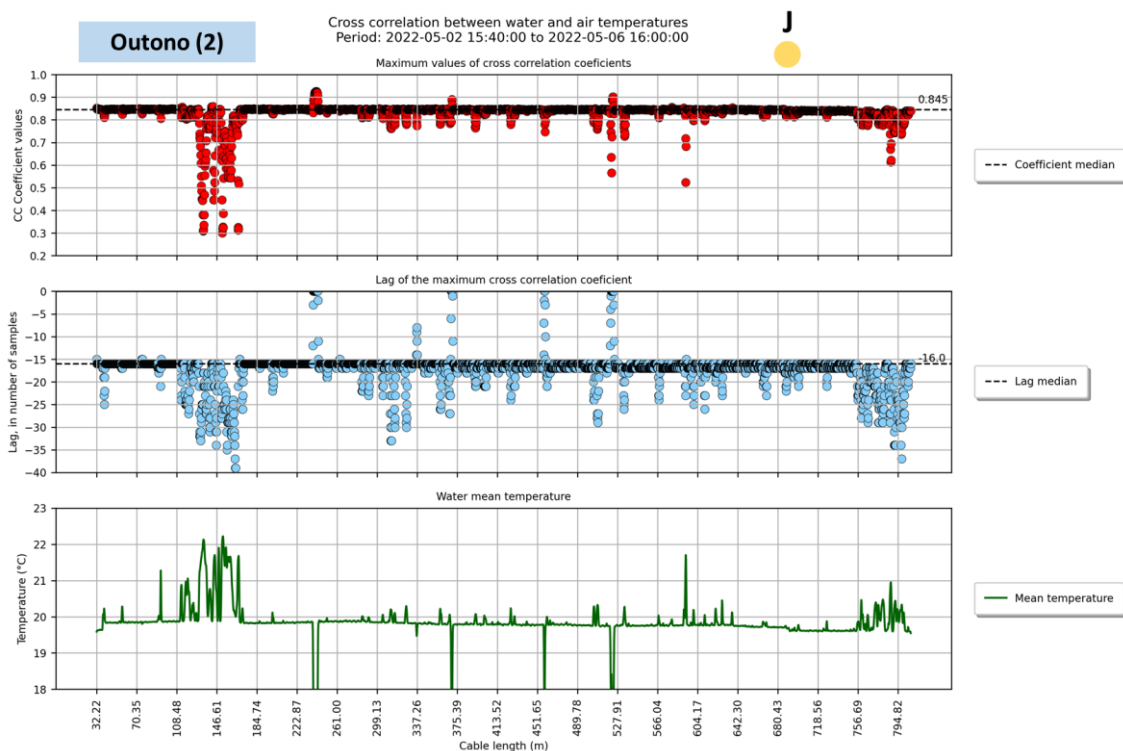
(b)



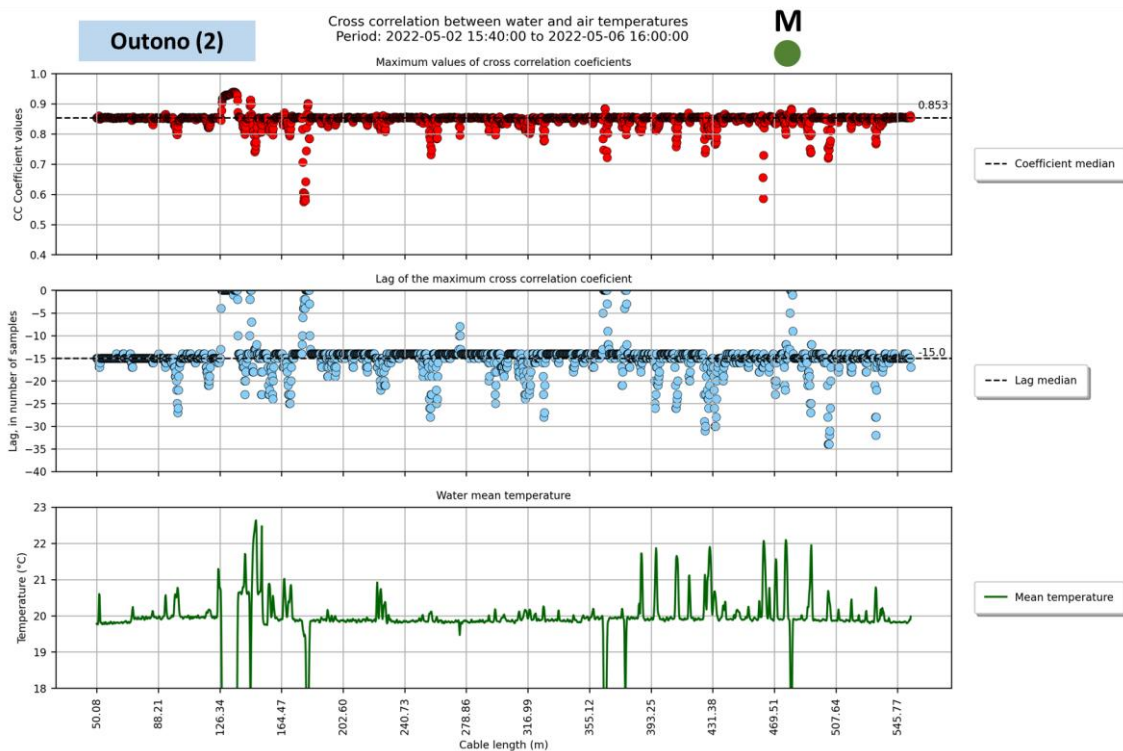
Fonte: Autor (2023)

Figura F-5 – Correlação cruzada para a campanha de Outono (2) - dados monitorados entre 02 e 06 de maio de 2022 (96h) para o trecho de (a) jusante e (b) montante

(a)



(b)



Fonte: Autor (2023)

APÊNDICE G – RESULTADOS GRÁFICOS DA RAZÃO ENTRE AS AMPLITUDES E O TEMPO DE RETARDAMENTO ENTRE OS SINAIS DE TEMPERATURA

Este apêndice apresenta os resultados em gráficos para as razões entre as amplitudes e o tempo de retardamento (*lag-time*) obtidos a partir da comparação dos sinais de temperatura da água e do ar, monitoradas nas diferentes campanhas realizadas neste trabalho. Optou-se pela exibição de tais imagens neste apêndice a fim de complementar as discussões apresentadas no tópico 7.4 desta tese, onde tais resultados foram avaliados como ferramenta de diferenciação dos fluxos de água subterrânea que contribuem ao meio superficial. Para cada campanha de monitoramento, foi escolhido um período contínuo de 24 horas de monitoramento, para a correta obtenção dos parâmetros indicados. Tais períodos são listados na Tabela G-1. Como não atende a tal critério, a campanha de Outono (1) foi excluída desta análise.

Tabela G-1 – Períodos representativos utilizados para a análise dos sinais de temperatura

Campanha	Período utilizado na análise
Inverno (1)	Das 22h de 05-07-21 às 22h de 06-07-21
Inverno (2)	Das 08h de 29-07-21 às 08h de 30-07-21
Primavera	Entre 0h de 08-12-21 às 0h de 09-12-21
Verão	Entre 0h de 27-01-22 às 0h de 28-01-22
Outono (2)	Entre 0h de 05-05-22 às 0h de 06-05-22

Fonte: Autor (2023)

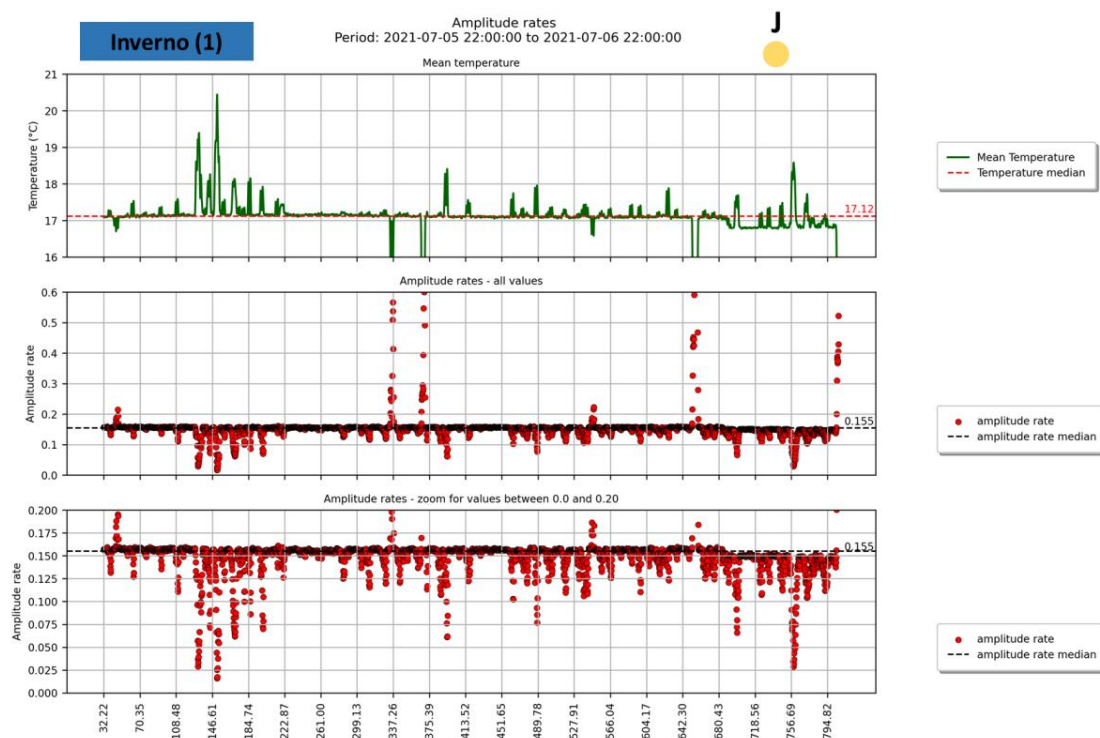
As Figuras G-1 a G-5 apresentam os resultados das razões entre as amplitudes dos sinais de temperatura, comparados entre cada ponto monitorado ao longo da fibra e a temperatura do ar. As figuras são divididas em duas imagens, sendo uma para cada um dos trechos monitorados (jusante e montante). Cada imagem é subdividida em três quadros: o quadro superior apresenta a temperatura média do período avaliado, de forma a realçar as anomalias de temperatura e as áreas de interação; o quadro central apresenta uma visão geral dos resultados de razão entre as amplitudes, enquanto o quadro inferior apresenta tais valores em um intervalo reduzido (entre 0 e 0,2), que permitem distinguir o comportamento das diferentes zonas de interação e a definição das origens da água subterrânea que contribuem àquela zona.

As Figuras G-6 a G-10 apresentam os dados relativos ao tempo de retardamento entre os sinais de temperatura, obtidos a partir da comparação entre as fases de tais sinais e a respectiva ocorrência de seus picos. De forma análoga, tais figuras são divididas em duas imagens, sendo cada uma delas relativas a um dos trechos monitorados (jusante e montante). Cada imagem é subdividida em dois quadros: o quadro superior apresenta a temperatura média da água, em cada um dos pontos monitorados, ao longo do período considerado na análise, realçando as anomalias de temperatura e permitindo o cruzamento rápido com os resultados de *lag-time*. O quadro inferior apresenta a hora de ocorrência das temperaturas máximas do ar e da cada um dos pontos ao longo do comprimento longitudinal do rio. O eixo secundário das abcissas permite observar qual a diferença de tempo para esta ocorrência entre os sinais comparados (ar e água).

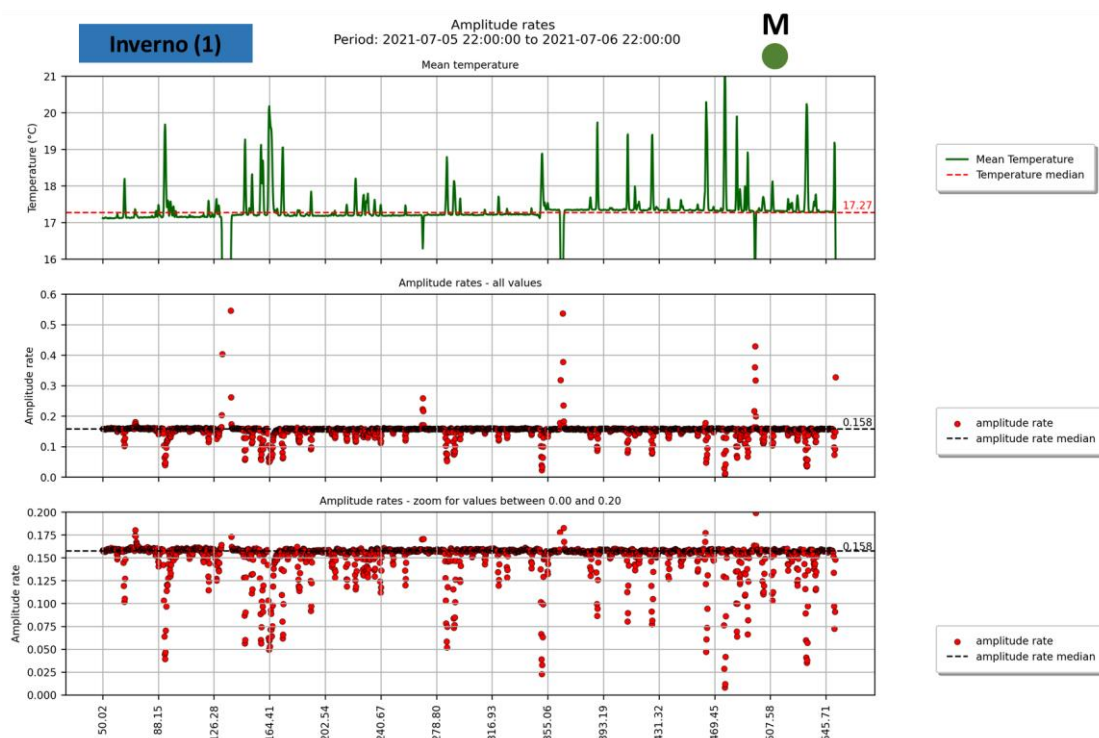
Por fim, as Figuras G-11 a G-15 apresenta um comparativo do comportamento dos sinais de temperatura da água, nas diferentes zonas de interação definidas neste trabalho (fluxo de água profunda, fluxo de água rasa, zonas de baixa interação / tendência influente, cabo exposto ao ar), em cada uma das campanhas de monitoramento realizadas. Esta análise é apresentada apenas para o trecho de jusante e permite observar as variações do sinal de temperatura da água e suas semelhanças/diferenças com o sinal de temperatura do ar, evidenciando os diferentes comportamentos das zonas de interação, que ocorrem de forma recorrente ao longo de todas as estações do ano.

Figura G-1 – Razão entre as amplitudes dos sinais de temperatura da água e do ar, para a campanha de Inverno (1), levantados entre 05 e 06 de julho de 2021 para o trecho de (a) jusante e (b) montante

(a)



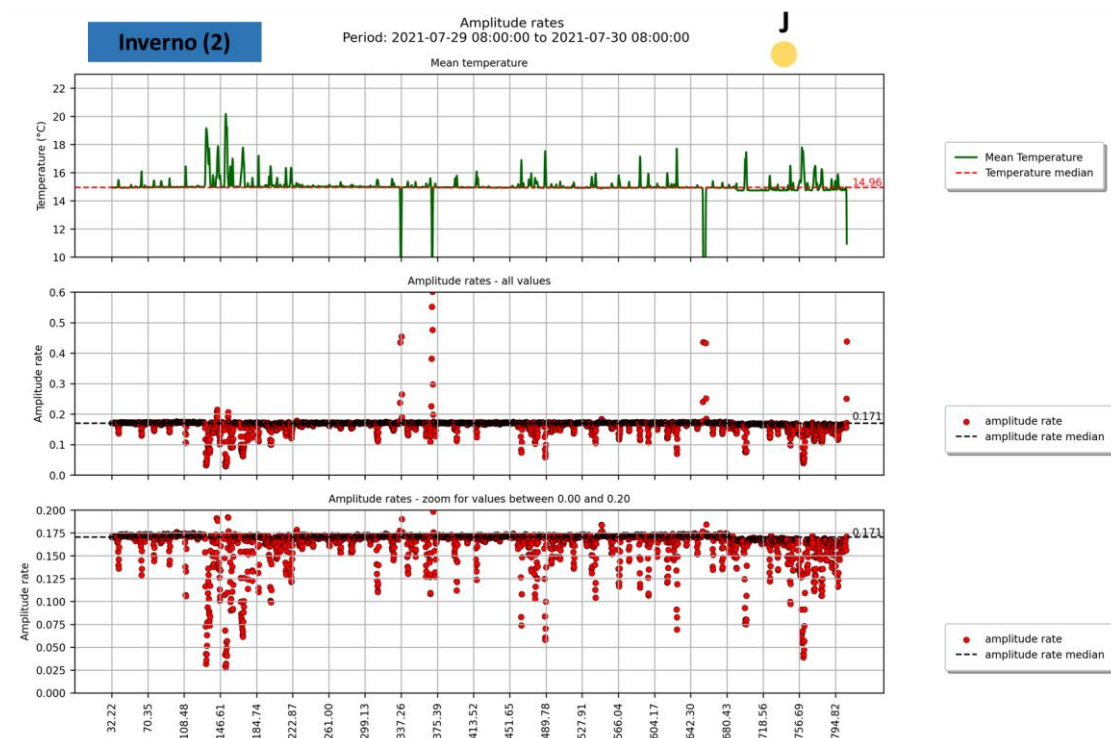
(b)



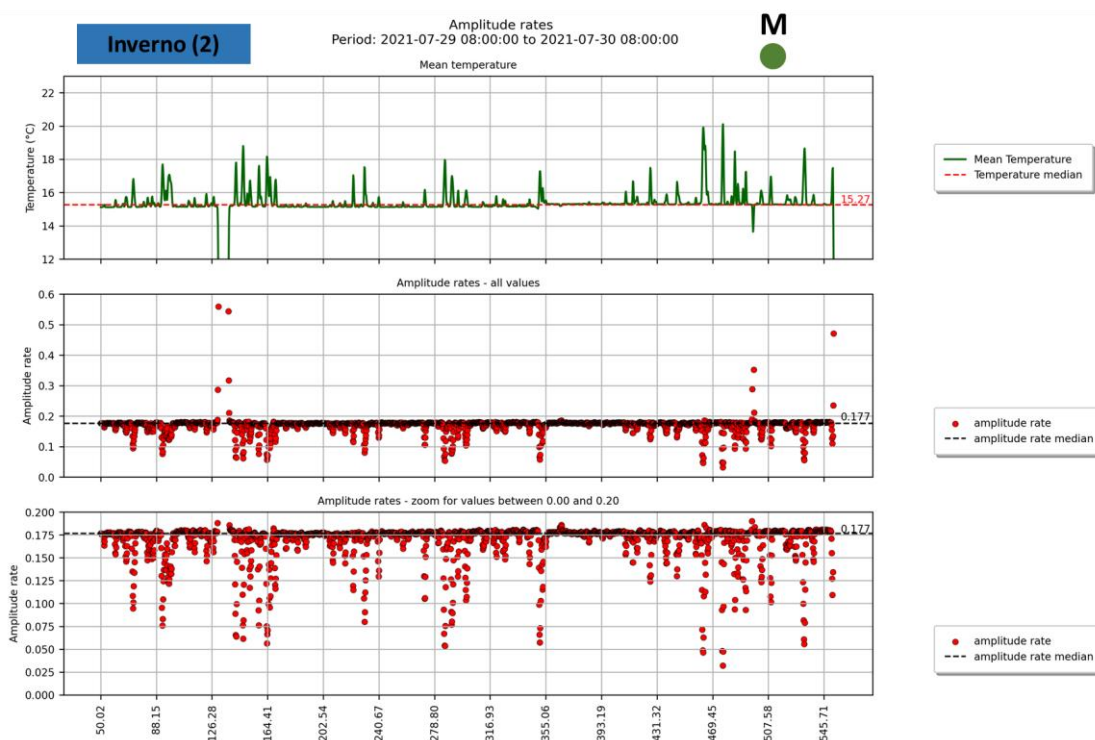
Fonte: Autor (2023)

Figura G-2 – Razão entre as amplitudes dos sinais de temperatura da água e do ar, para a campanha de Inverno (2), levantados entre 29 e 30 de julho de 2021 para o trecho de (a) jusante e (b) montante

(a)



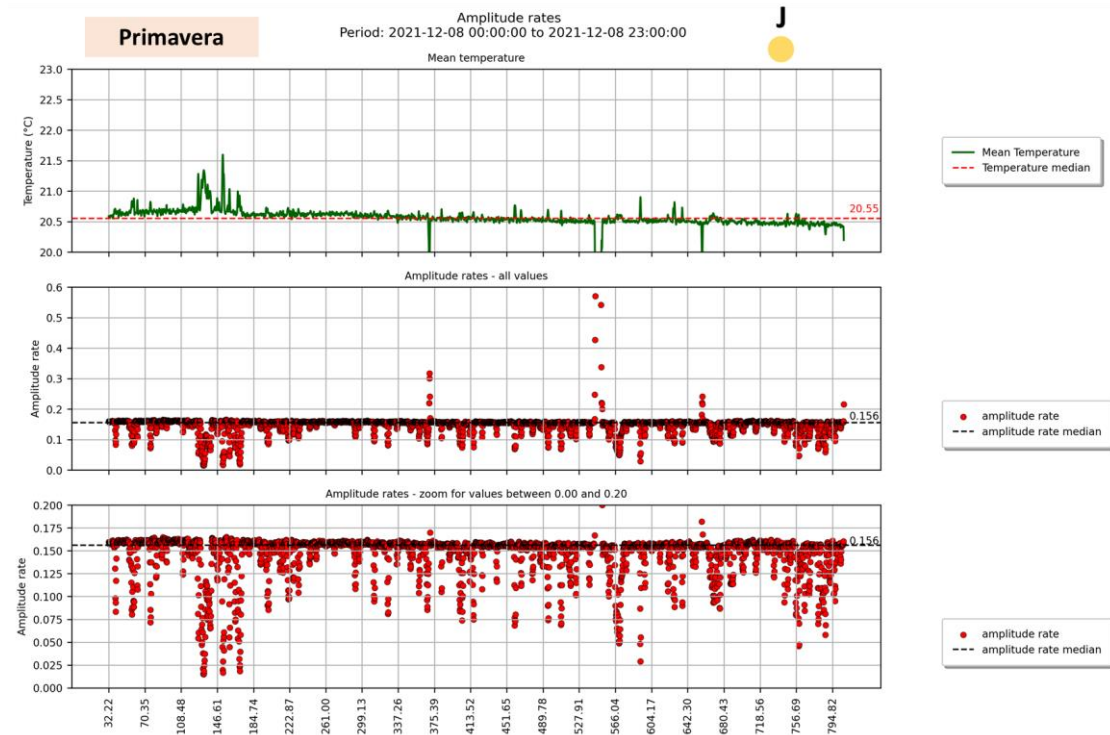
(b)



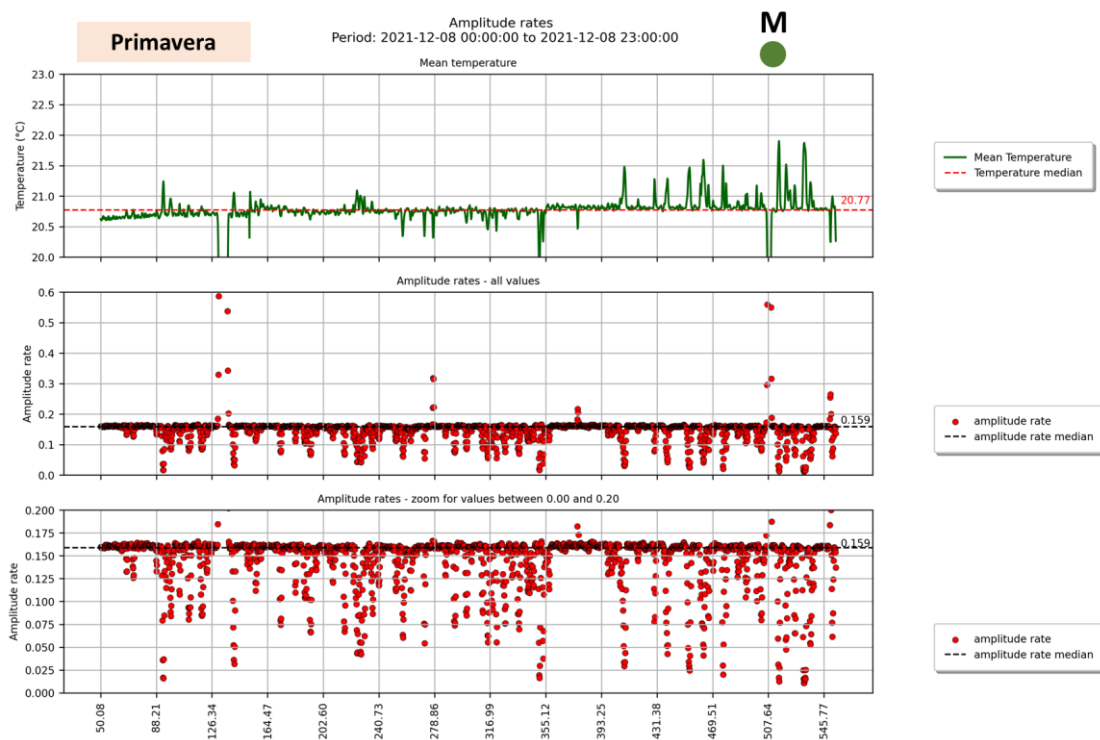
Fonte: Autor (2023)

Figura G-3 – Razão entre as amplitudes dos sinais de temperatura da água e do ar, para a campanha de Primavera, levantados entre 08 de dezembro de 2021 para o trecho de (a) jusante e (b) montante

(a)



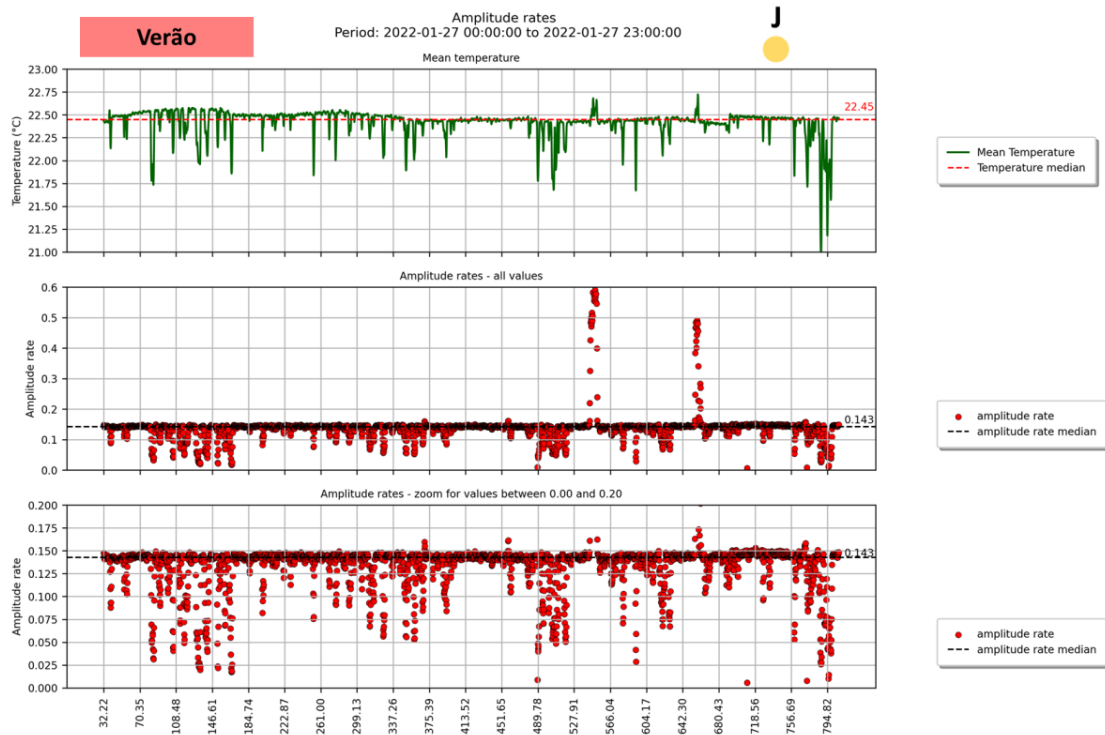
(b)



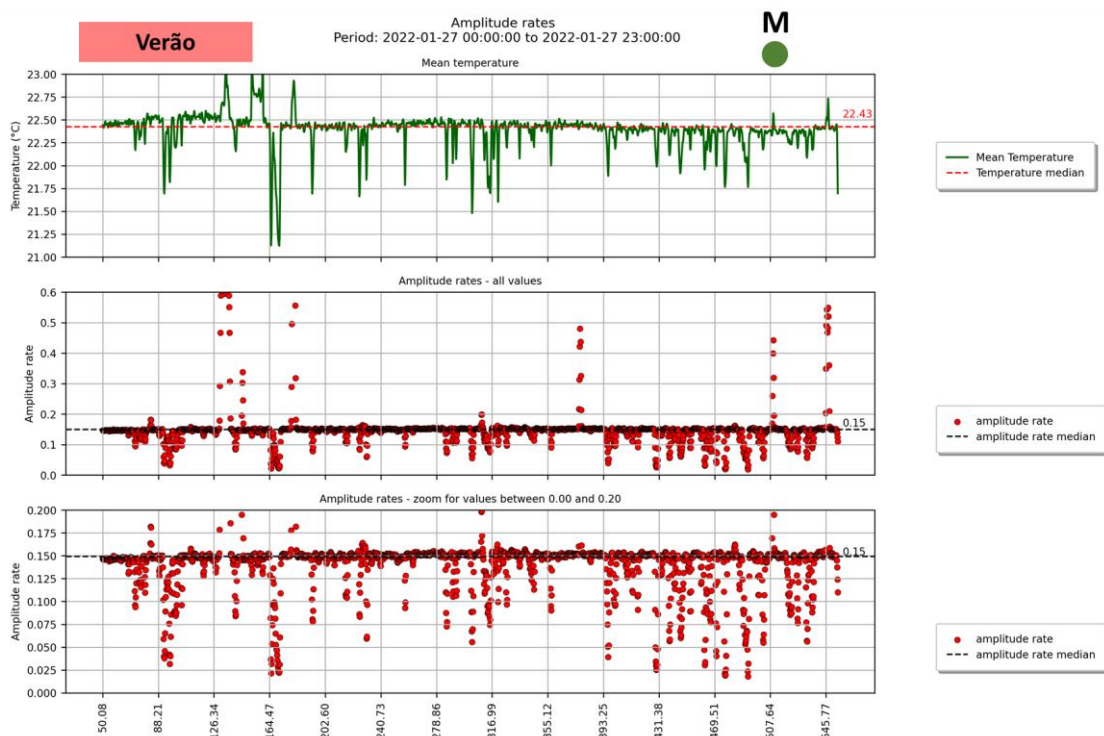
Fonte: Autor (2023)

Figura G-4 – Razão entre as amplitudes dos sinais de temperatura da água e do ar, para a campanha de Verão, levantados entre 27 de janeiro de 2022 para o trecho de (a) jusante e (b) montante

(a)



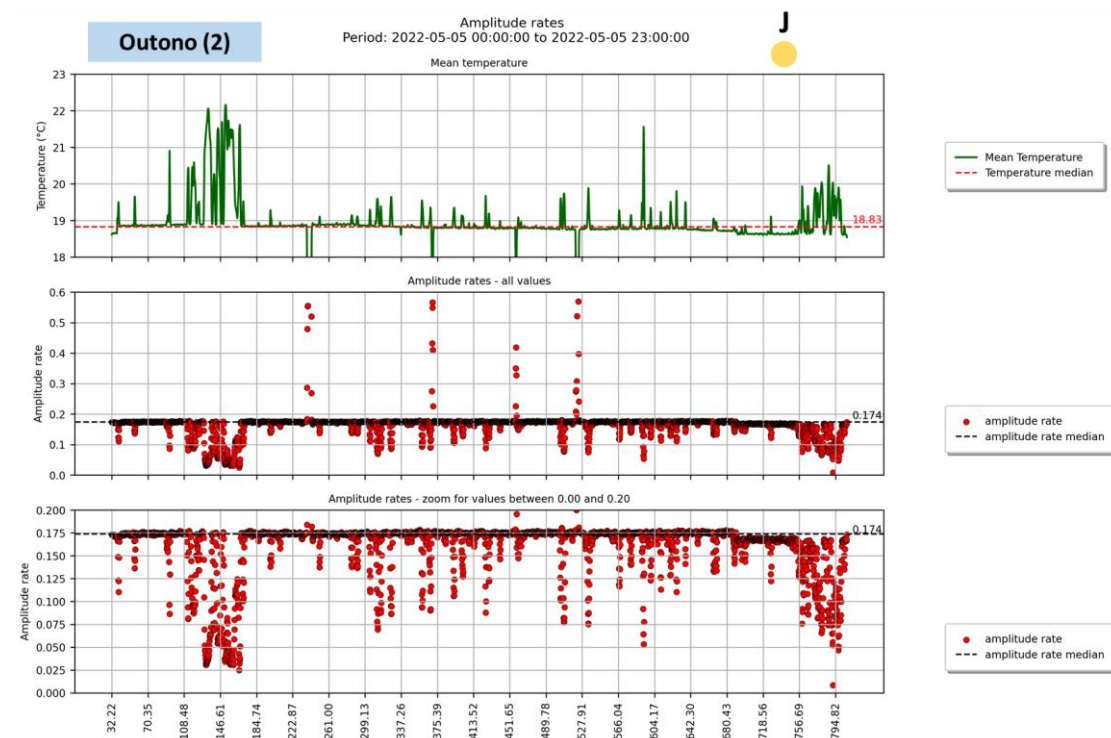
(b)



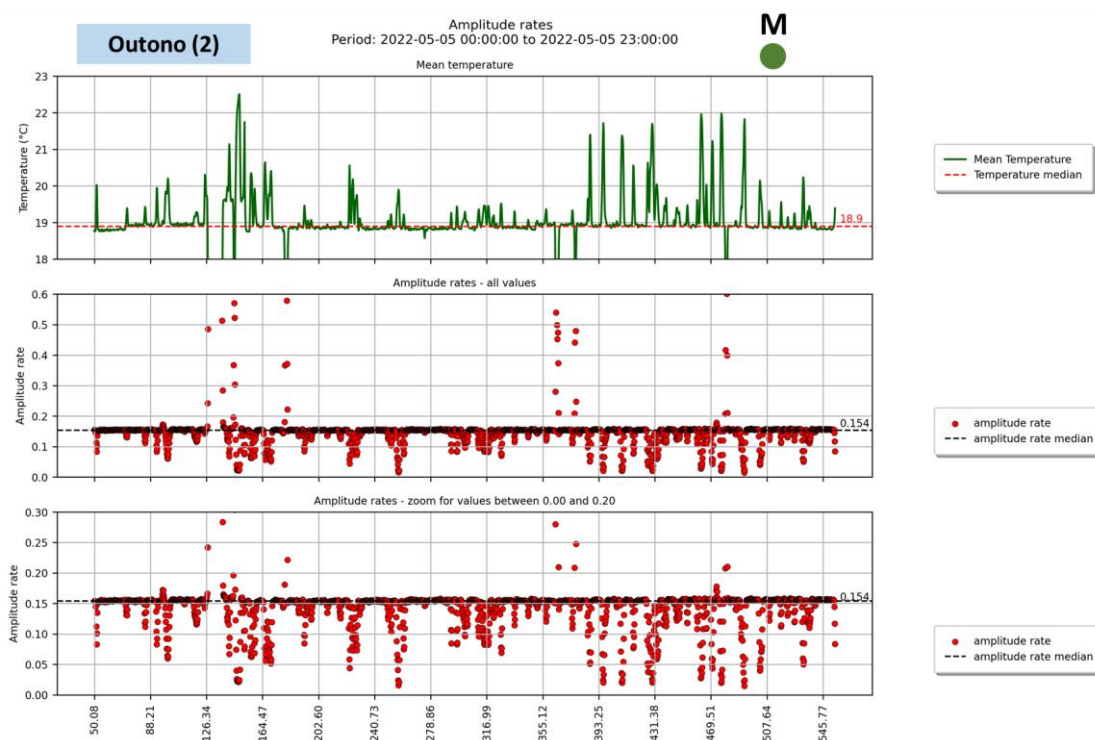
Fonte: Autor (2023)

Figura G-5 – Razão entre as amplitudes dos sinais de temperatura da água e do ar, para a campanha de Outono (2), levantados entre 05 de maio de 2022 para o trecho de (a) jusante e (b) montante

(a)

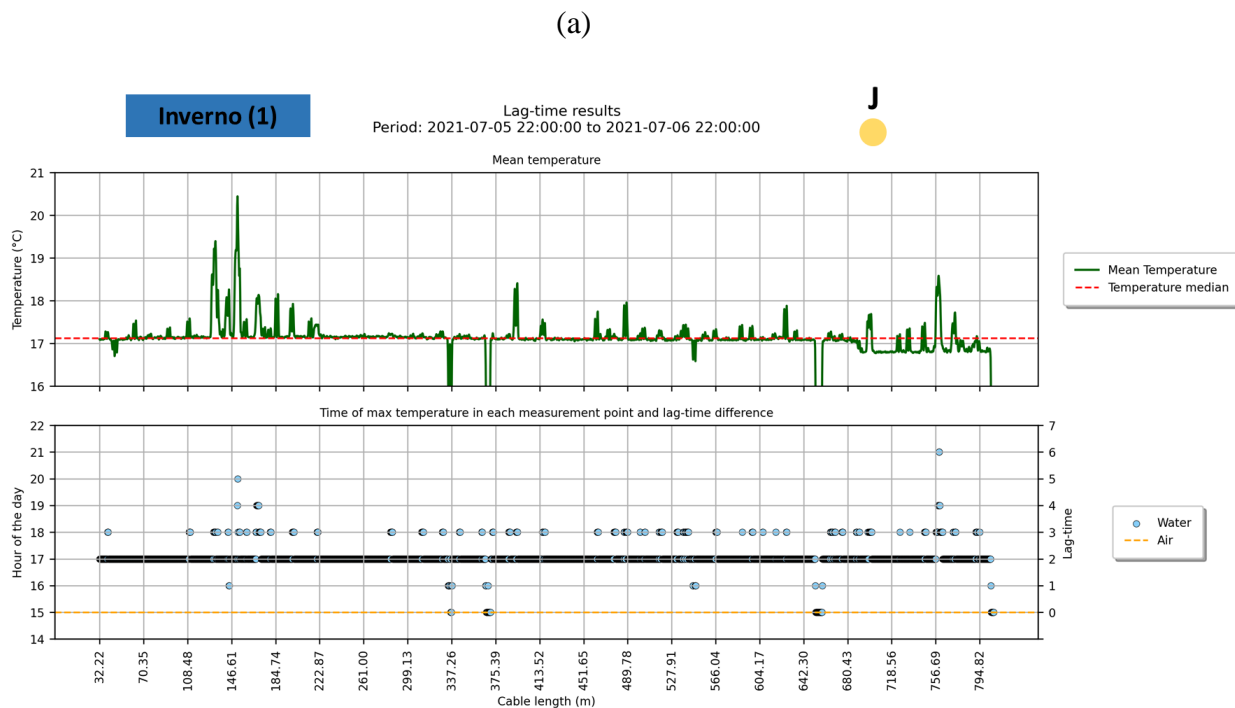


(b)

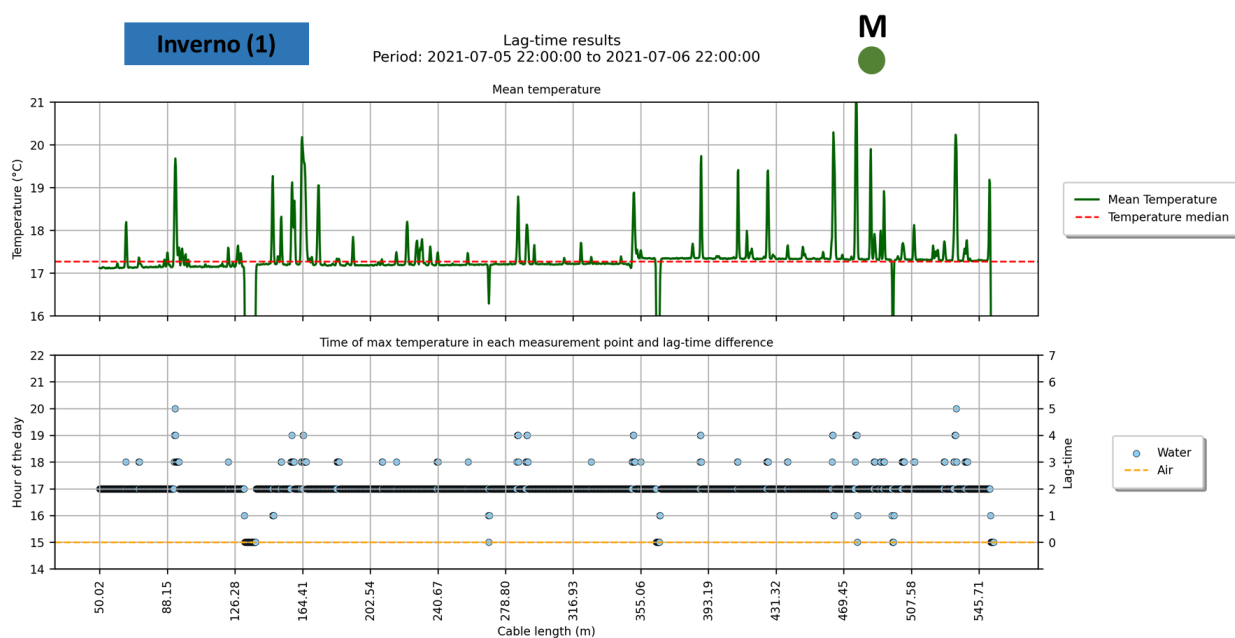


Fonte: Autor (2023)

Figura G-6 – Hora de ocorrência das temperaturas máximas e tempo de retardamento (*lag-time*) entre os sinais de temperatura da água e do ar, para a campanha de Inverno (1), levantados entre 05 e 06 de julho de 2021 para o trecho de (a) jusante e (b) montante

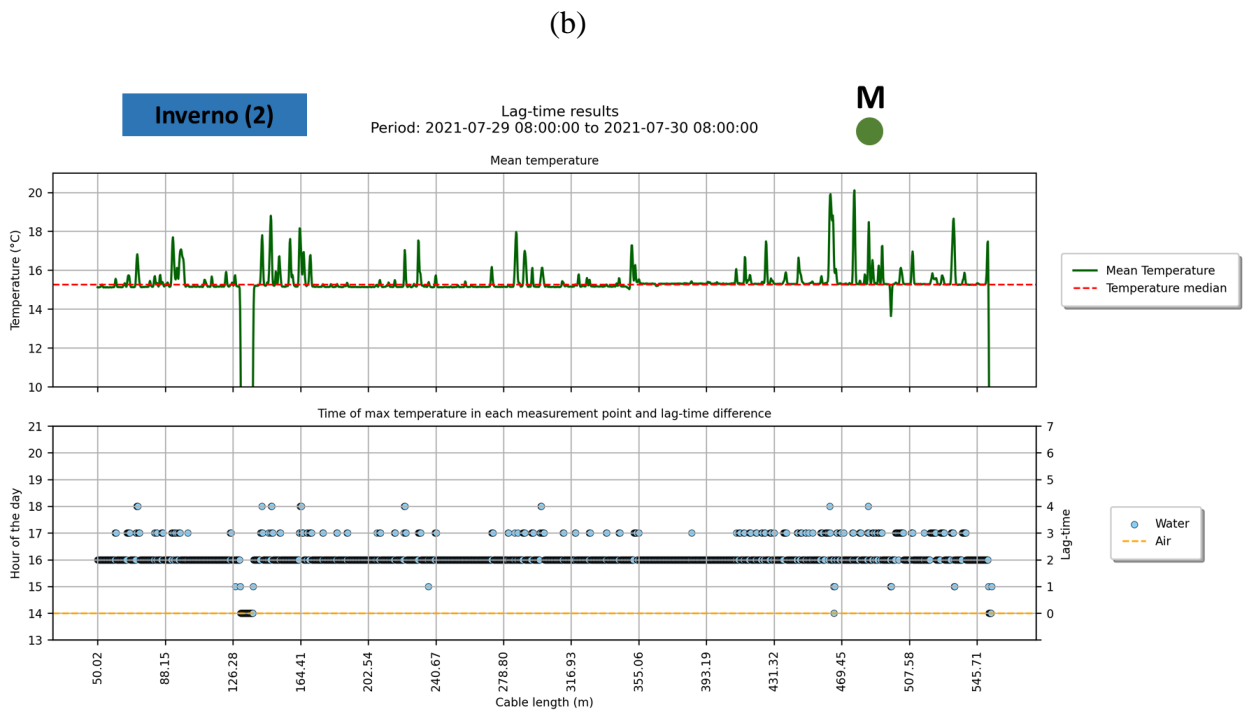
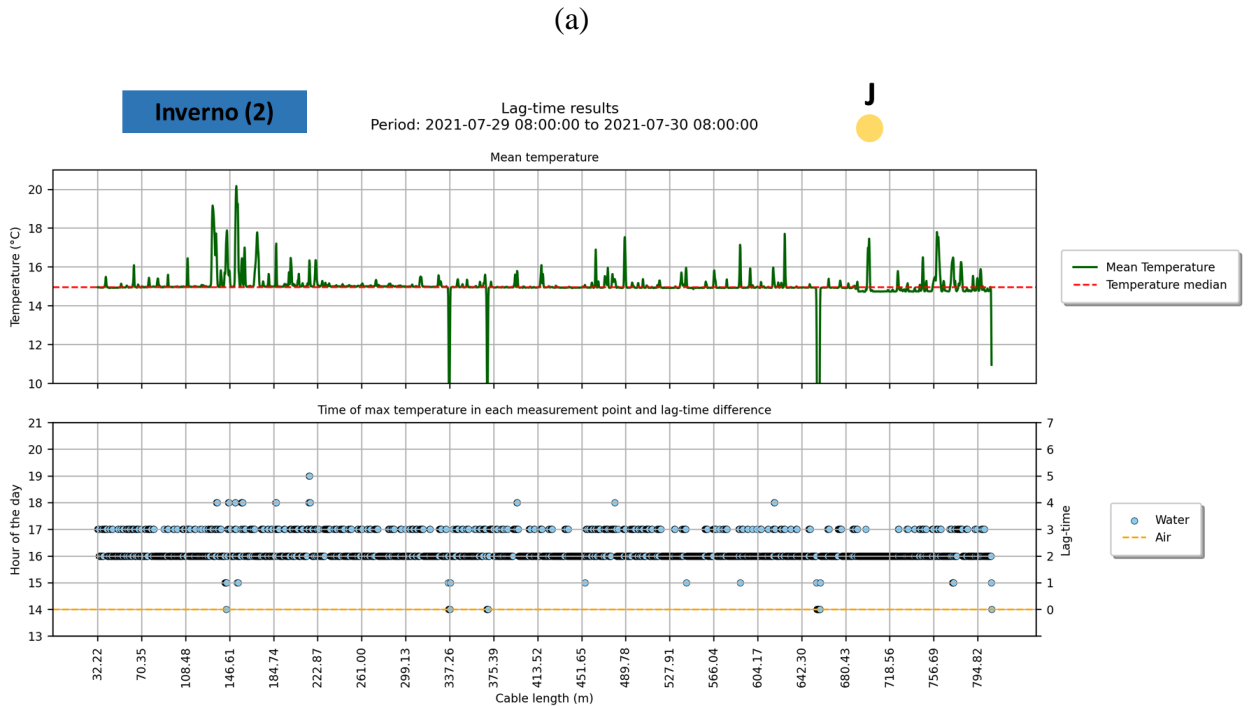


(b)



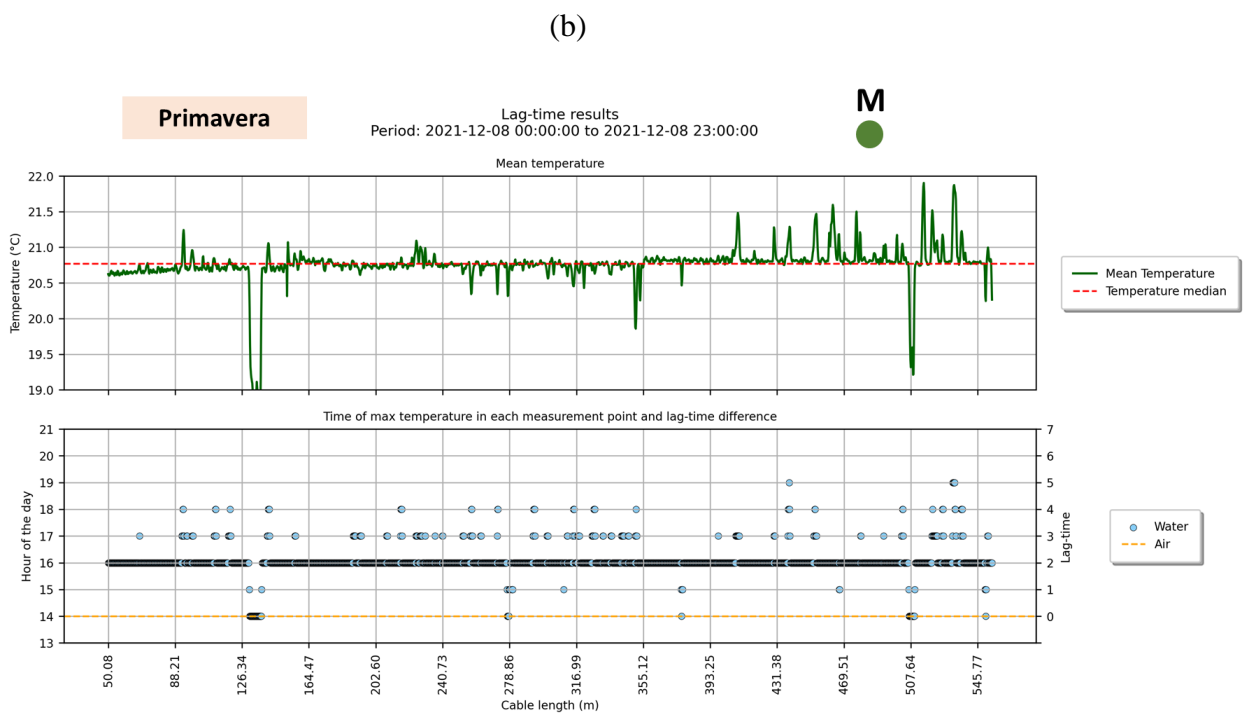
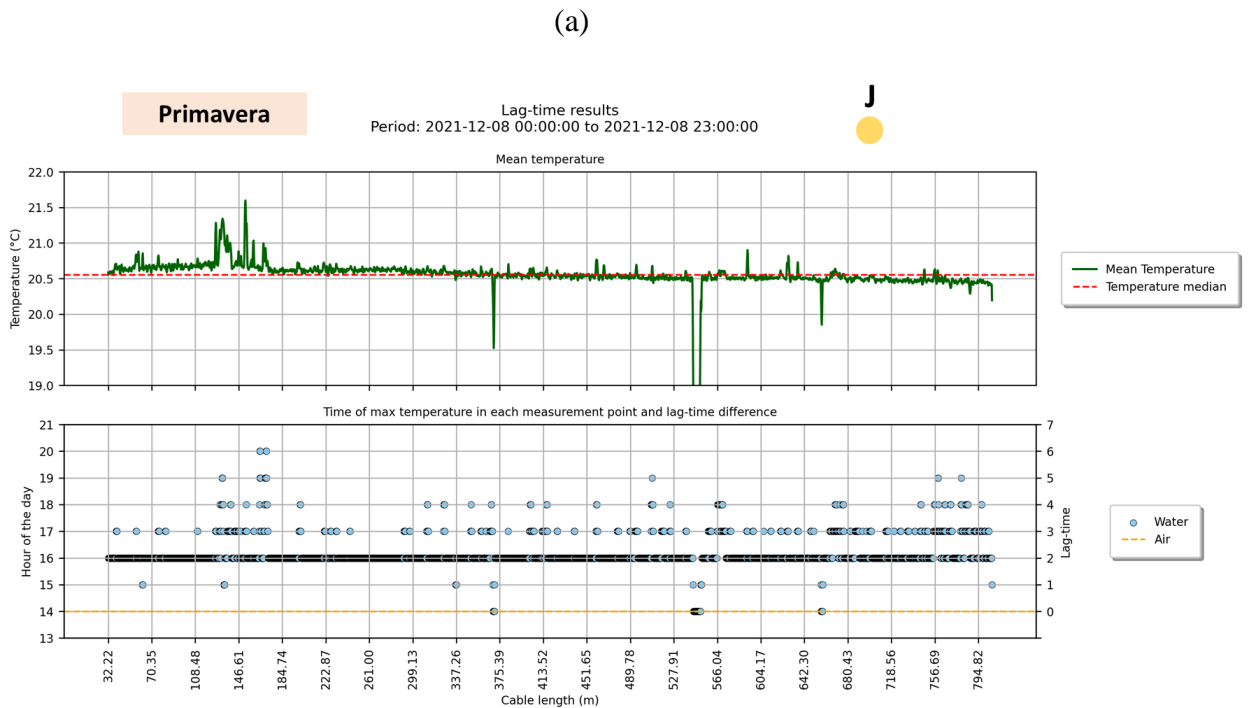
Fonte: Autor (2023)

Figura G-7 – Hora de ocorrência das temperaturas máximas e tempo de retardamento (*lag-time*) entre os sinais de temperatura da água e do ar, para a campanha de Inverno (2), levantados entre 29 e 30 de julho de 2021 para o trecho de (a) jusante e (b) montante



Fonte: Autor (2023)

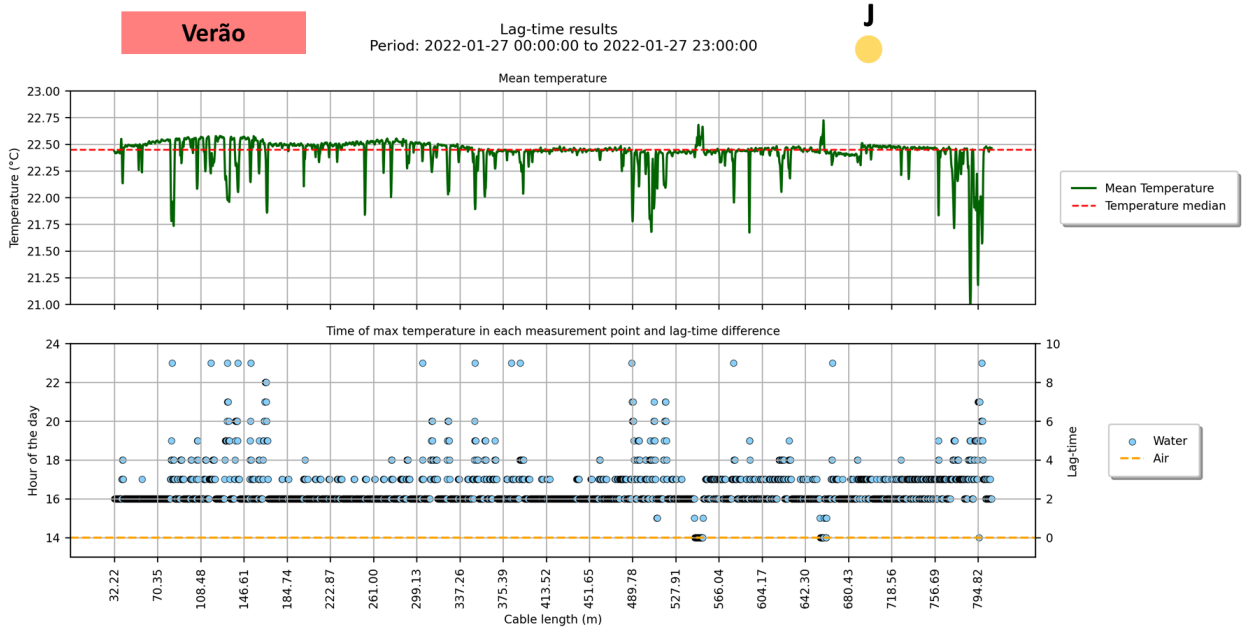
Figura G-8 – Hora de ocorrência das temperaturas máximas e tempo de retardamento (*lag-time*) entre os sinais de temperatura da água e do ar, para a campanha de Primavera, levantados entre 08 de dezembro de 2021 para o trecho de (a) jusante e (b) montante



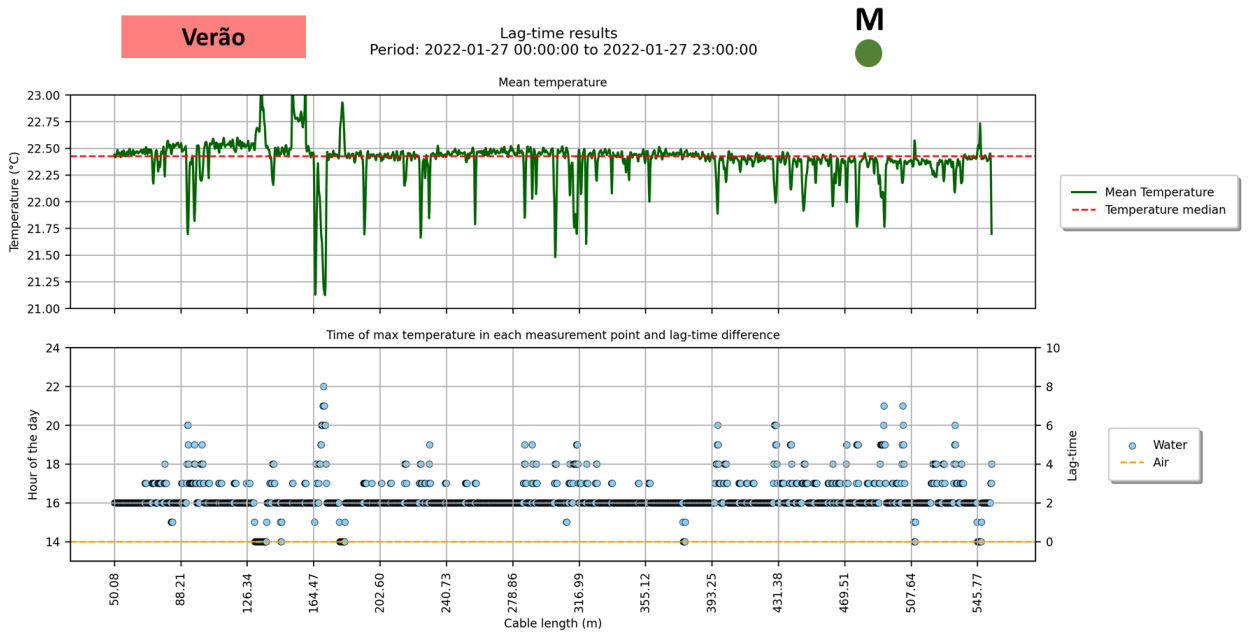
Fonte: Autor (2023)

Figura G-9 – Hora de ocorrência das temperaturas máximas e tempo de retardamento (*lag-time*) entre os sinais de temperatura da água e do ar, para a campanha de Verão, levantados entre 27 de janeiro de 2022 para o trecho de (a) jusante e (b) montante

(a)

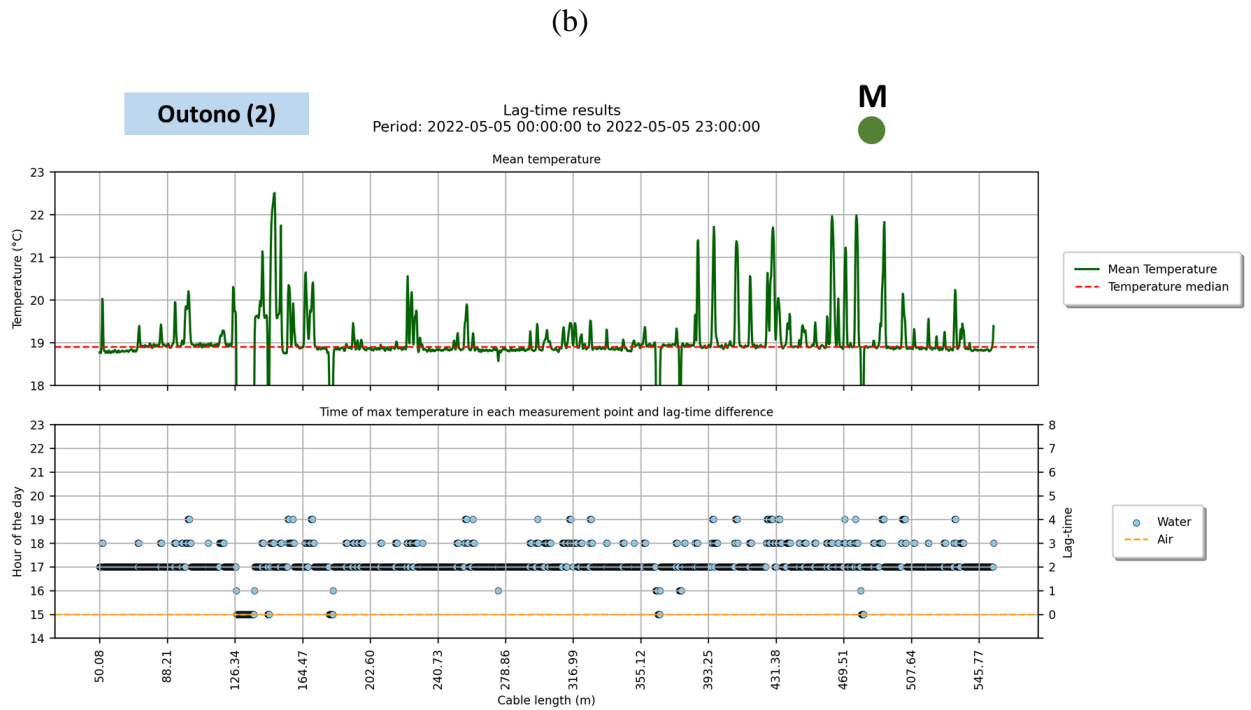
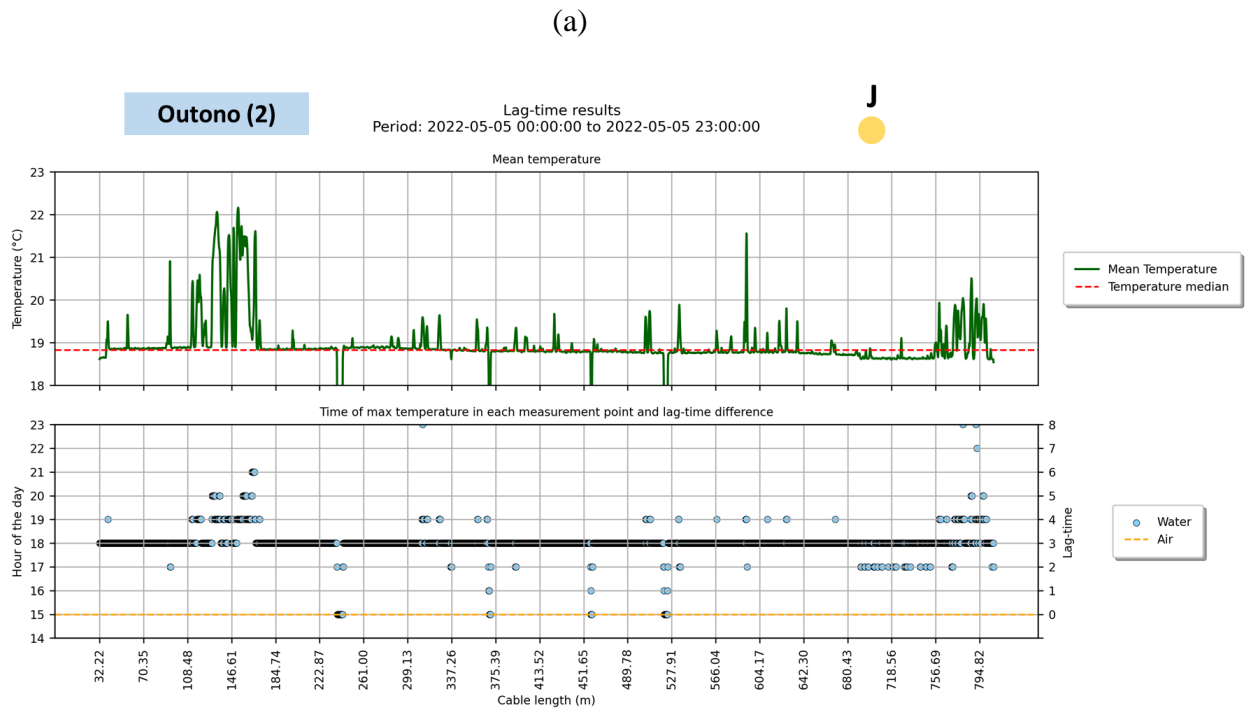


(b)



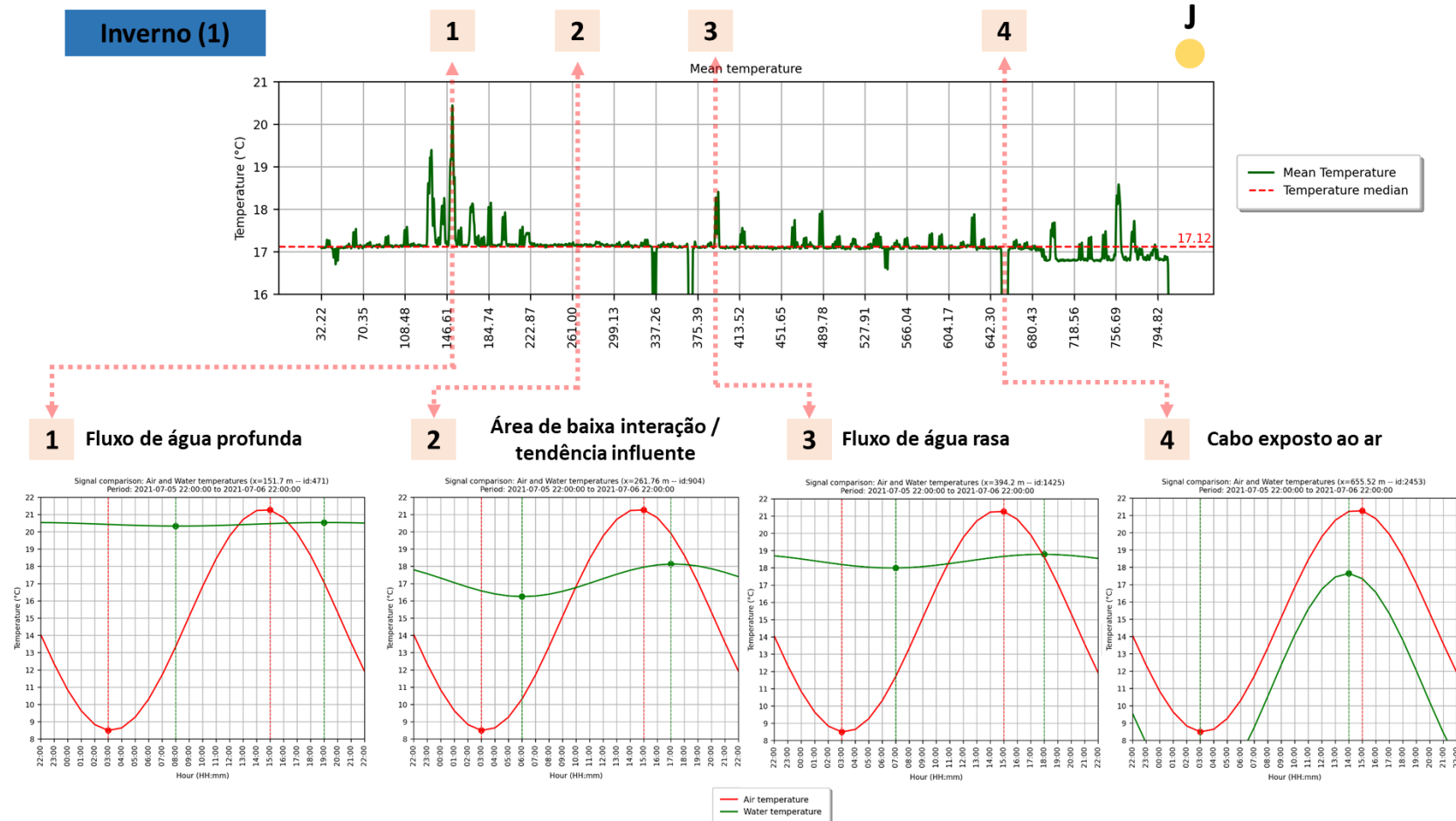
Fonte: Autor (2023)

Figura G-10 – Hora de ocorrência das temperaturas máximas e tempo de retardamento (*lag-time*) entre os sinais de temperatura da água e do ar, para a campanha de Outono (2), levantados entre 05 de maio de 2022 para o trecho de (a) jusante e (b) montante



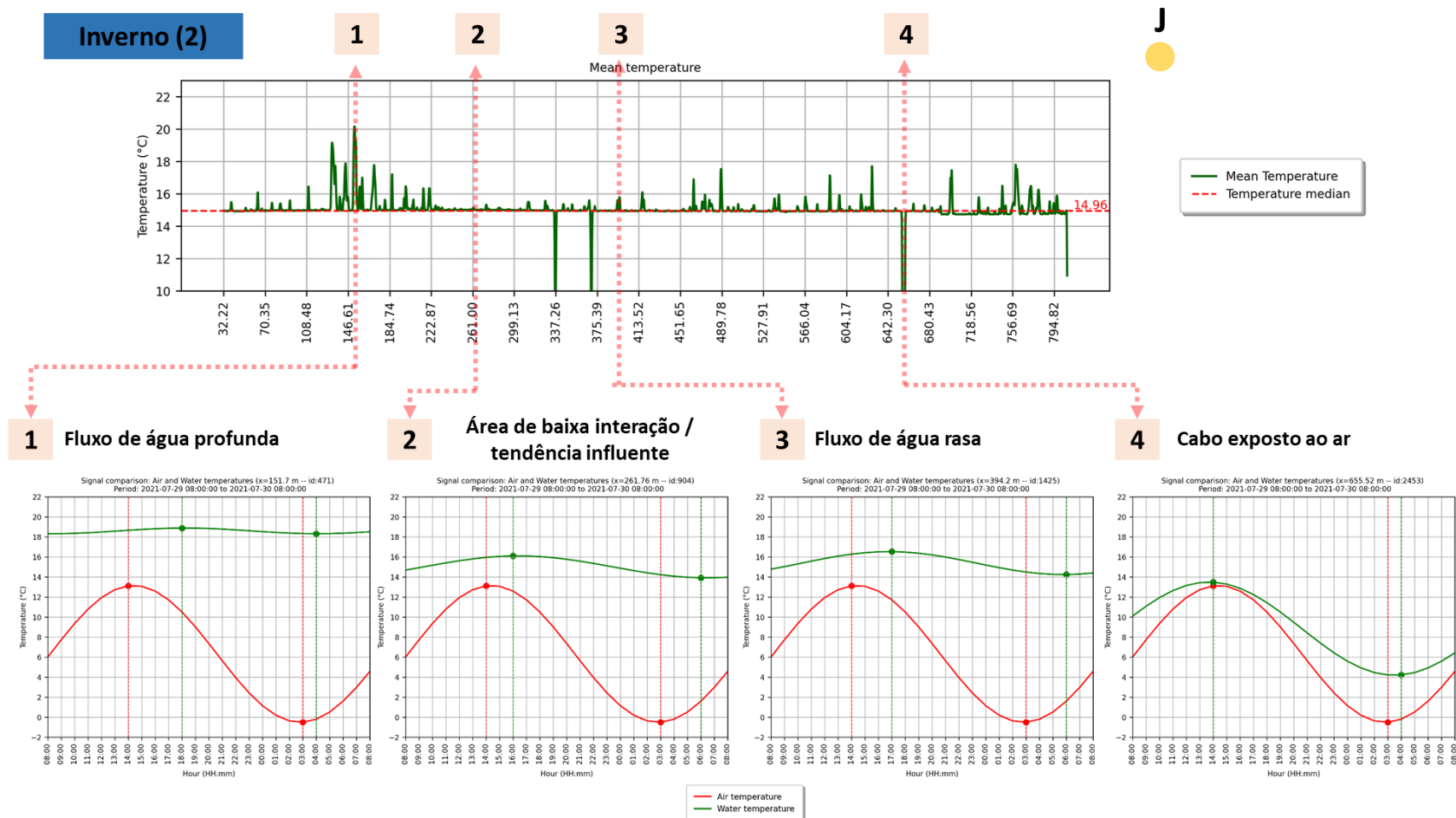
Fonte: Autor (2023)

Figura G-11 – Comparação do comportamento dos sinais de temperatura da água e do ar, em diferentes zonas de interação rio-aquífero, para os dados para a campanha de Inverno (1), levantados entre 05 e 06 de julho de 2021 para o trecho de jusante



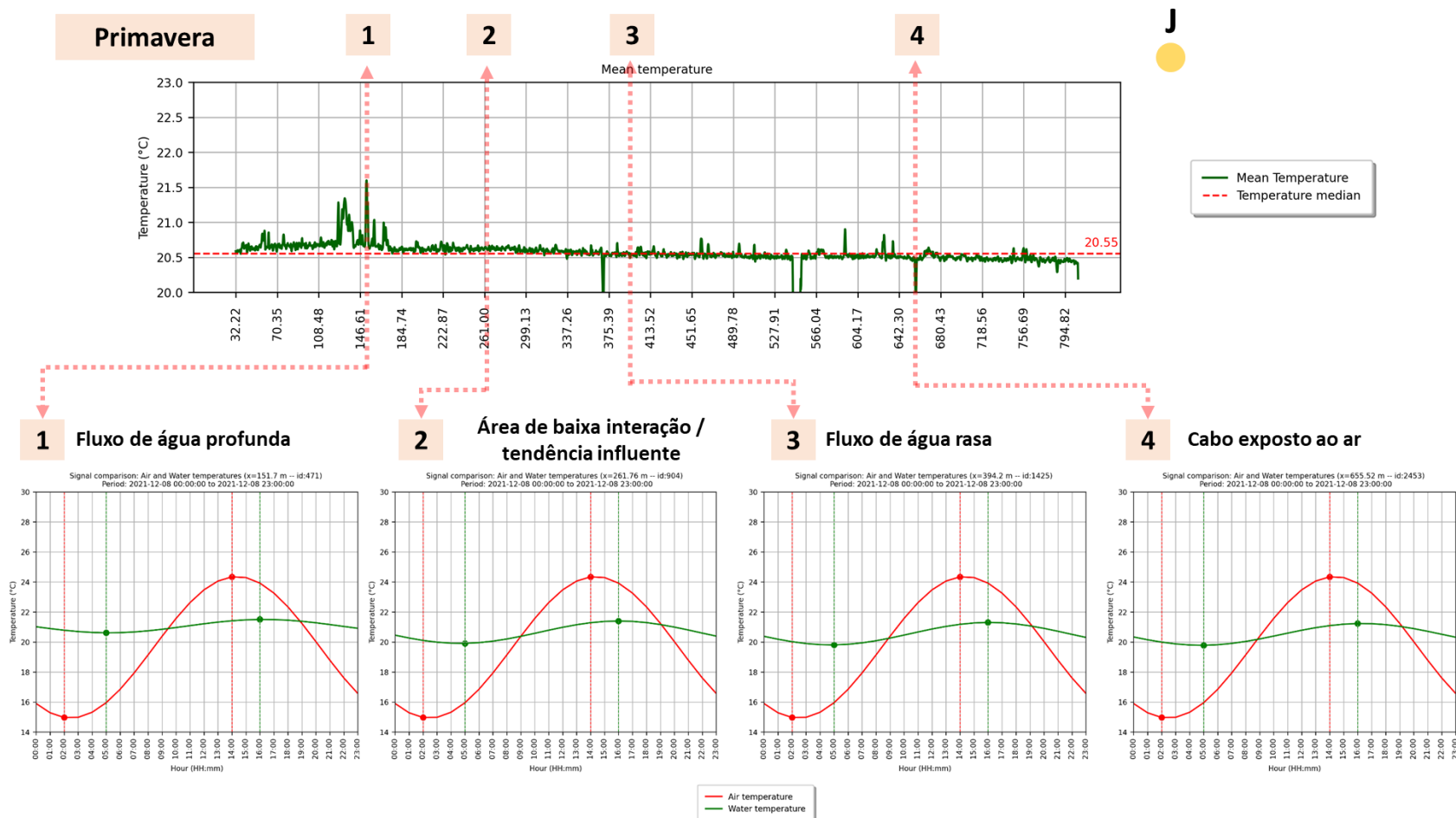
Fonte: Autor (2023)

Figura G-12 – Comparação do comportamento dos sinais de temperatura da água e do ar, em diferentes zonas de interação rio-aquífero, para os dados para a campanha de Inverno (2), levantados entre 29 e 30 de julho de 2021 para o trecho de jusante



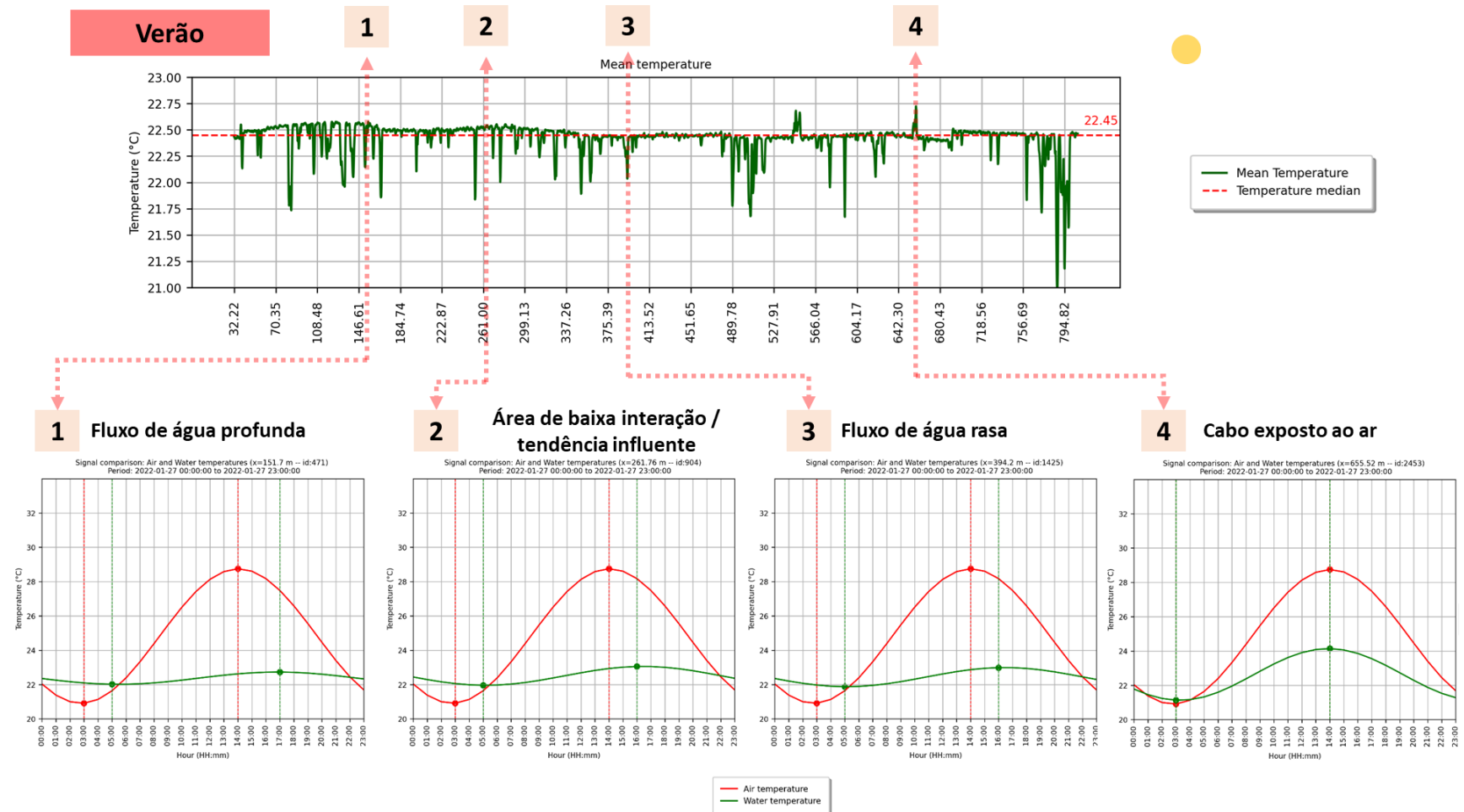
Fonte: Autor (2023)

Figura G-13 – Comparação do comportamento dos sinais de temperatura da água e do ar, em diferentes zonas de interação rio-aquífero, para os dados para a campanha de Primavera, levantados entre 08 de dezembro de 2021, para o trecho de jusante



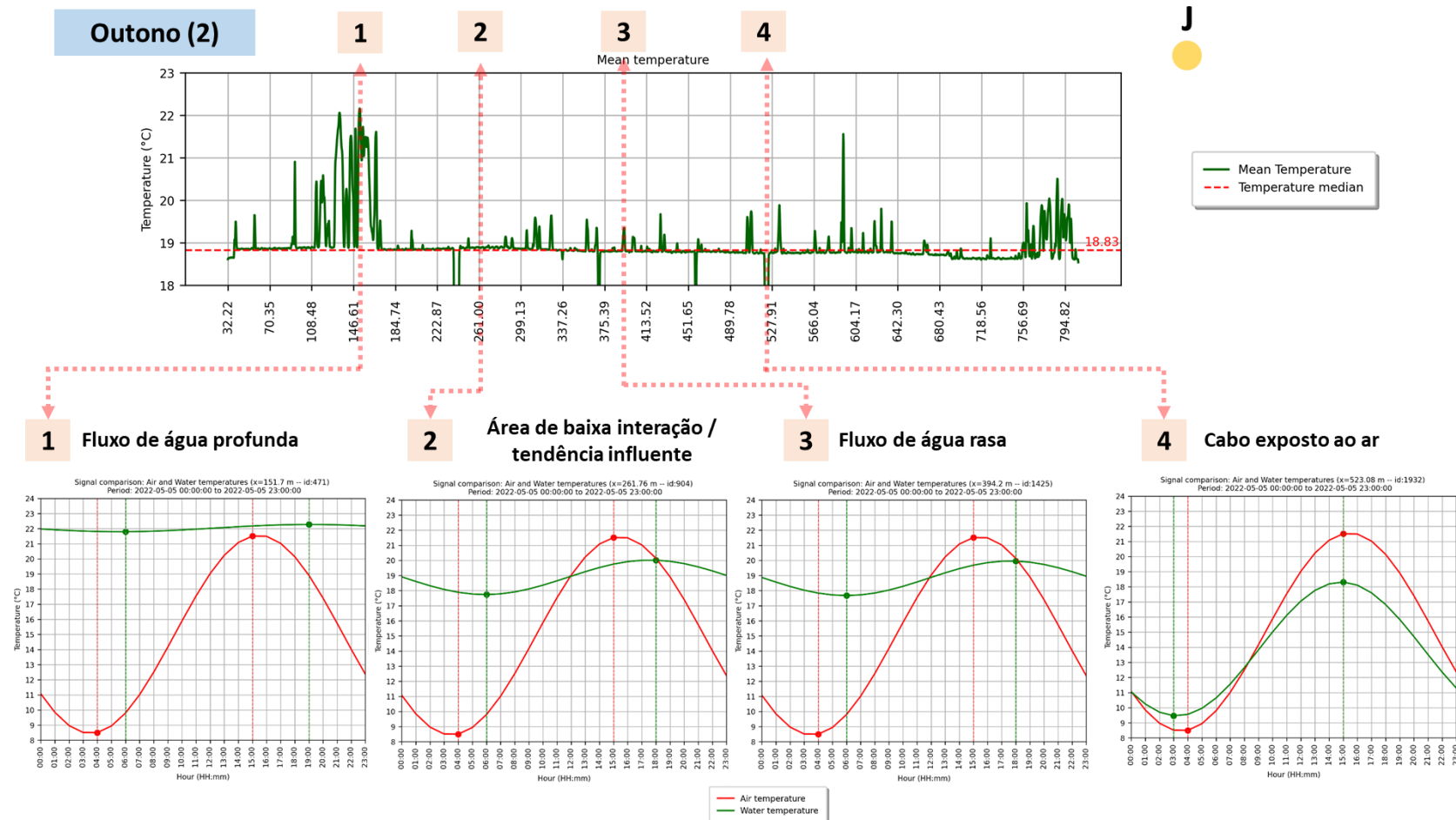
Fonte: Autor (2023)

Figura G-14 – Comparação do comportamento dos sinais de temperatura da água e do ar, em diferentes zonas de interação rio-aquífero, para os dados para a campanha de Verão, levantados entre 27 de janeiro de 2022, para o trecho de jusante



Fonte: Autor (2023)

Figura G-15 – Comparação do comportamento dos sinais de temperatura da água e do ar, em diferentes zonas de interação rio-aquífero, para os dados para a campanha de Outono (2), levantados entre 05 de maio de 2022, para o trecho de jusante



Fonte: Autor (2023)

APÊNDICE H – RESULTADOS GRÁFICOS DO TESTE DE GRANGER

Este apêndice apresenta os resultados em gráficos do teste de causalidade de Granger, avaliado para os sinais de temperatura da água e do ar, monitoradas nas diferentes campanhas realizadas neste trabalho. Optou-se pela exibição de tais imagens neste apêndice a fim de complementar as discussões apresentadas no tópico 7.5 desta tese, onde tais resultados foram avaliados como ferramenta de diferenciação dos fluxos de água subterrânea que contribuem ao meio superficial. Para cada campanha de monitoramento, foi escolhido um período contínuo de 24 horas de monitoramento, que coincidem com os períodos avaliados para a determinação da razão entre as amplitudes e o tempo de retardamento (Tópico 7.4 e Apêndice G). Tais períodos são listados na Tabela H-1. Como não atendeu a tal critério, a campanha de Outono (1) foi excluída desta análise.

Tabela H-1 – Períodos representativos utilizados para o Teste de Granger

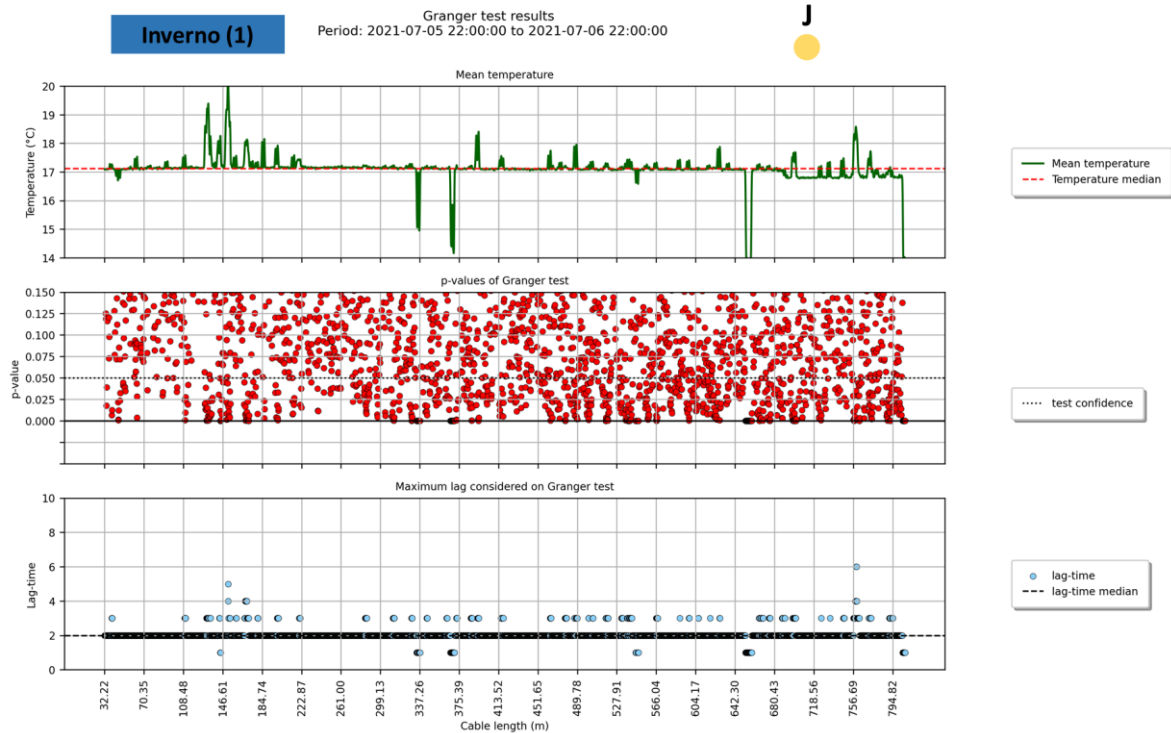
Campanha	Período utilizado na análise
Inverno (1)	Das 22h de 05-07-21 às 22h de 06-07-21
Inverno (2)	Das 08h de 29-07-21 às 08h de 30-07-21
Primavera	Entre 0h de 08-12-21 às 0h de 09-12-21
Verão	Entre 0h de 27-01-22 às 0h de 28-01-22
Outono (2)	Entre 0h de 05-05-22 às 0h de 06-05-22

Fonte: Autor (2023)

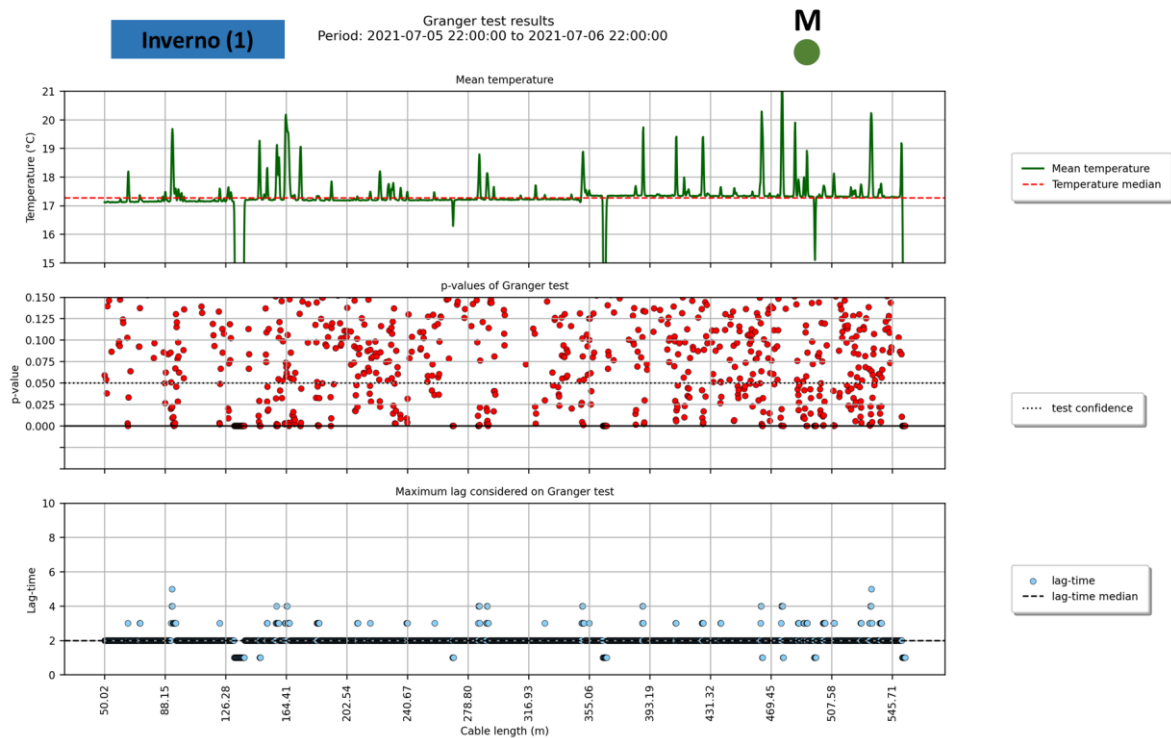
As Figuras H-1 a H-5 apresentam os dados resultantes da aplicação do teste de Granger. As figuras são divididas em duas imagens, sendo uma para cada um dos trechos monitorados (jusante e montante). Cada imagem é subdividida em três quadros: o quadro superior apresenta a temperatura média do período avaliado, de forma a realçar as anomalias de temperatura e as áreas de interação; o quadro central apresenta os resultados de p-valor obtidos a partir da aplicação do teste de Granger. A causalidade é confirmada para valores inferiores à 0,05, enquanto a rejeição ocorre quando o p-valor supera 0,05 (valor correspondente ao nível de significância considerado). Já o quadro inferior apresenta o valor de lag-time (ou defasagem) inserido como dado de entrada para a execução do teste de Granger. Tal valor se baseia no tempo de retardamento observado em cada uma das amostras avaliadas, sendo que a execução do teste só acontece para valores não-nulos deste parâmetro e valores inferiores à 6 horas, em virtude do tamanho da amostra avaliada em cada cenário.

Figura H-1 – Resultados do teste de causalidade de Granger, para a campanha de Inverno (1), levantados entre 05 e 06 de julho de 2021 para o trecho de (a) jusante e (b) montante

(a)



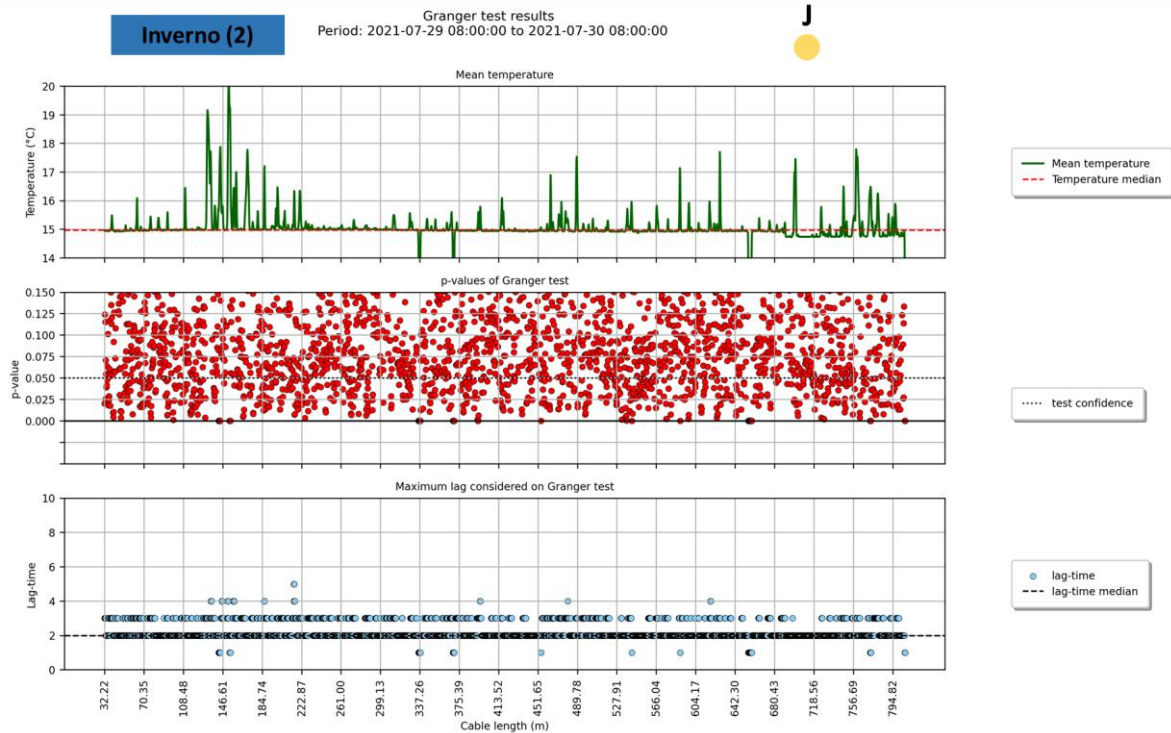
(b)



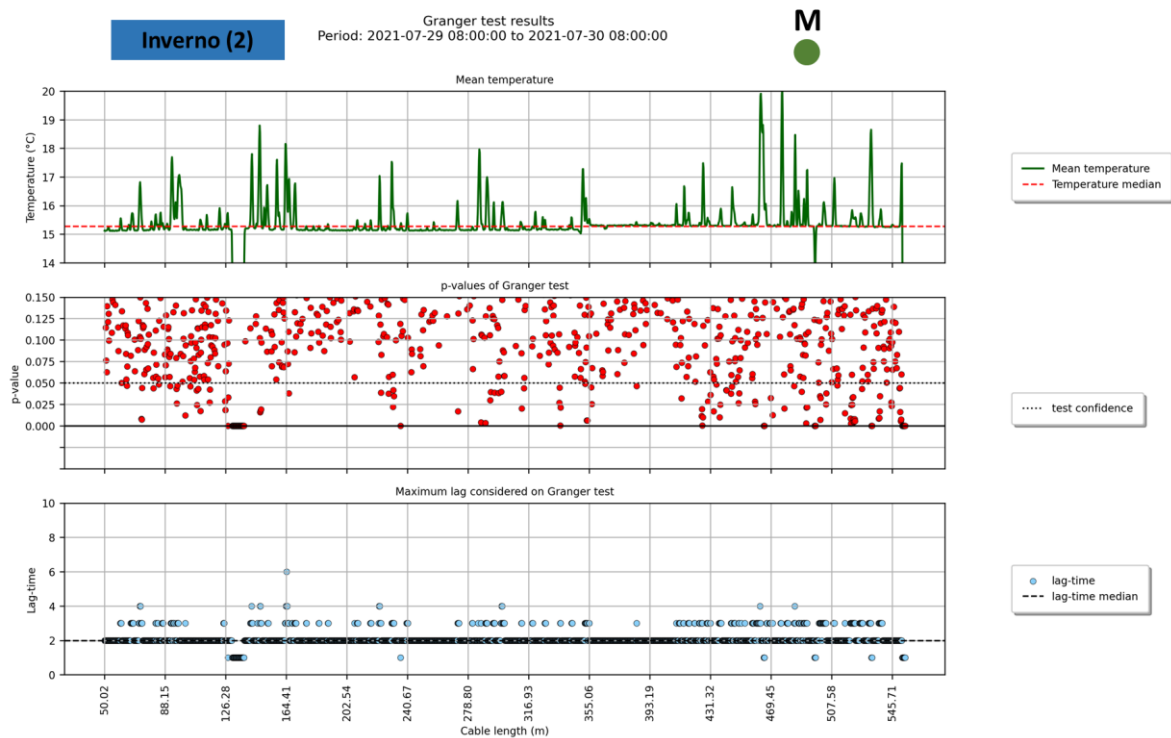
Fonte: Autor (2023)

Figura H-2 – Resultados do teste de causalidade de Granger, para a campanha de Inverno (2), levantados entre 29 e 30 de julho de 2021 para o trecho de (a) jusante e (b) montante

(a)



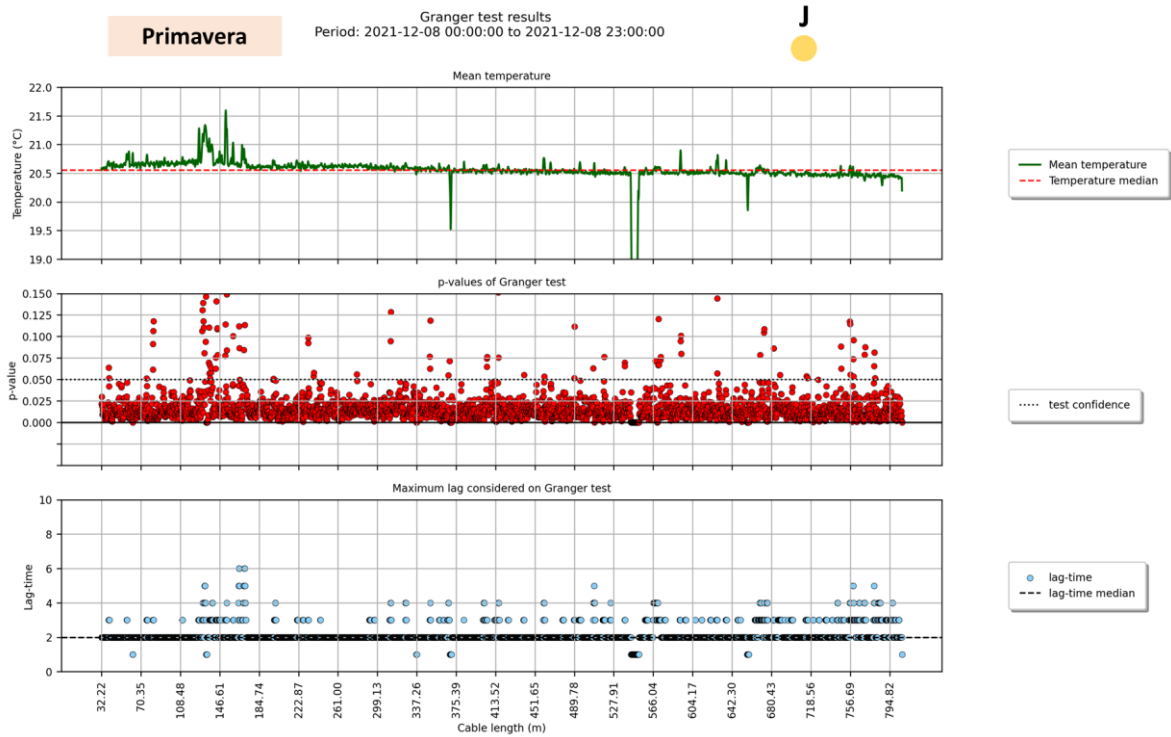
(b)



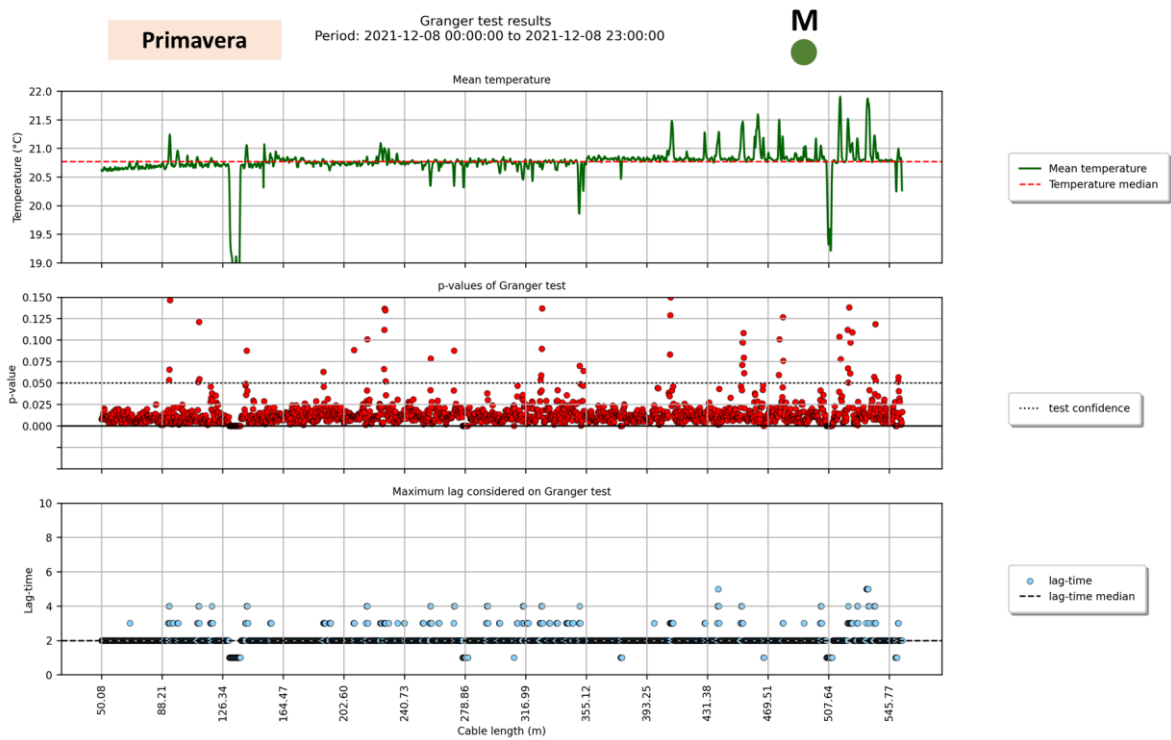
Fonte: Autor (2023)

Figura H-3 – Resultados do teste de causalidade de Granger, para a campanha de Verão, levantados entre 27 de janeiro de 2022 para o trecho de (a) jusante e (b) montante

(a)



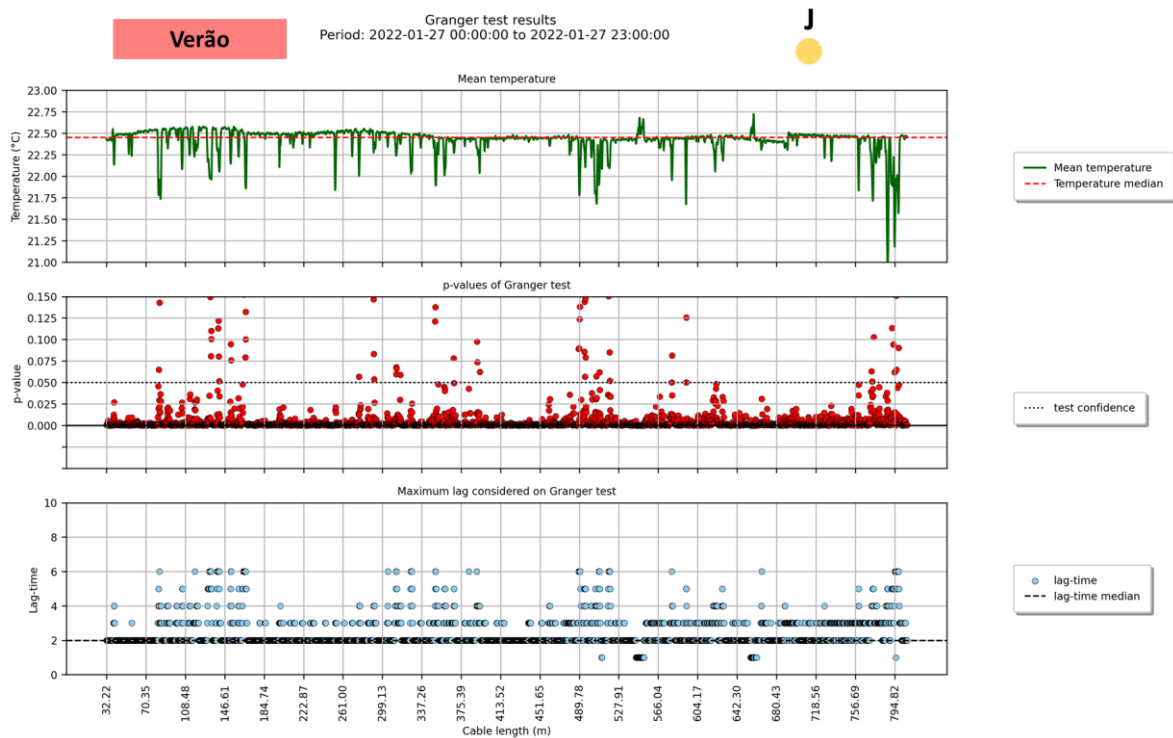
(b)



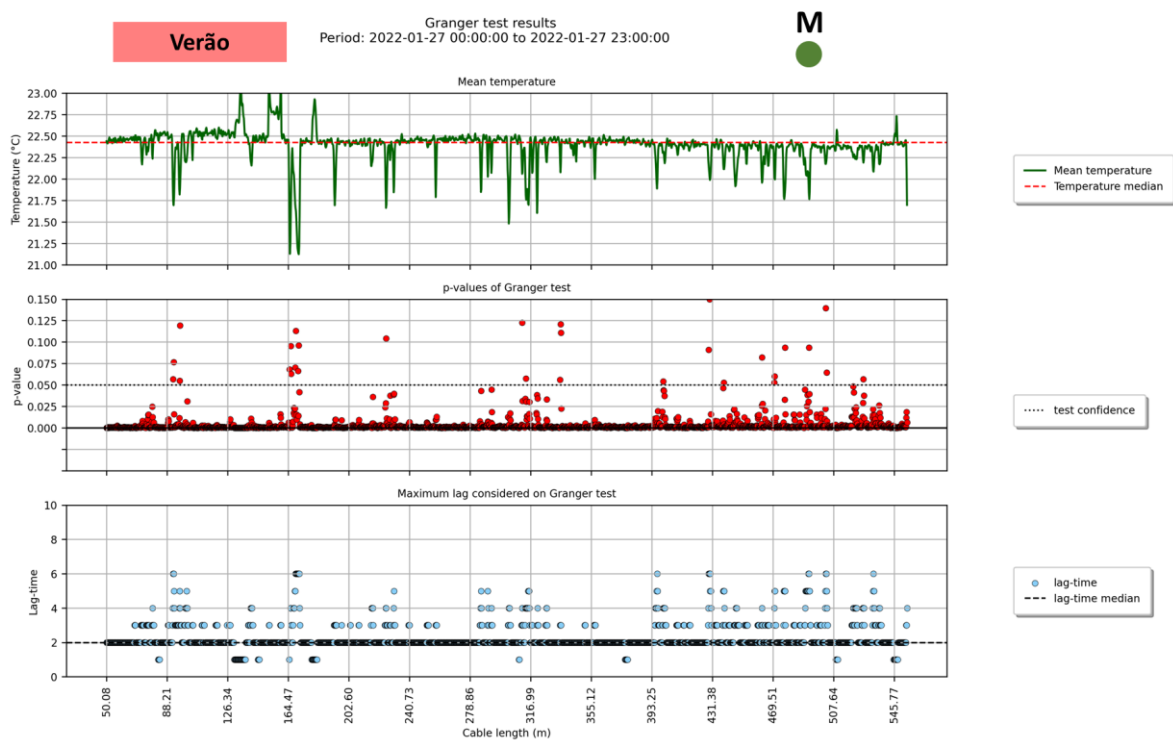
Fonte: Autor (2023)

Figura H-4 – Resultados do teste de causalidade de Granger, para a campanha de Verão, levantados entre 27 de janeiro de 2022 para o trecho de (a) jusante e (b) montante

(a)



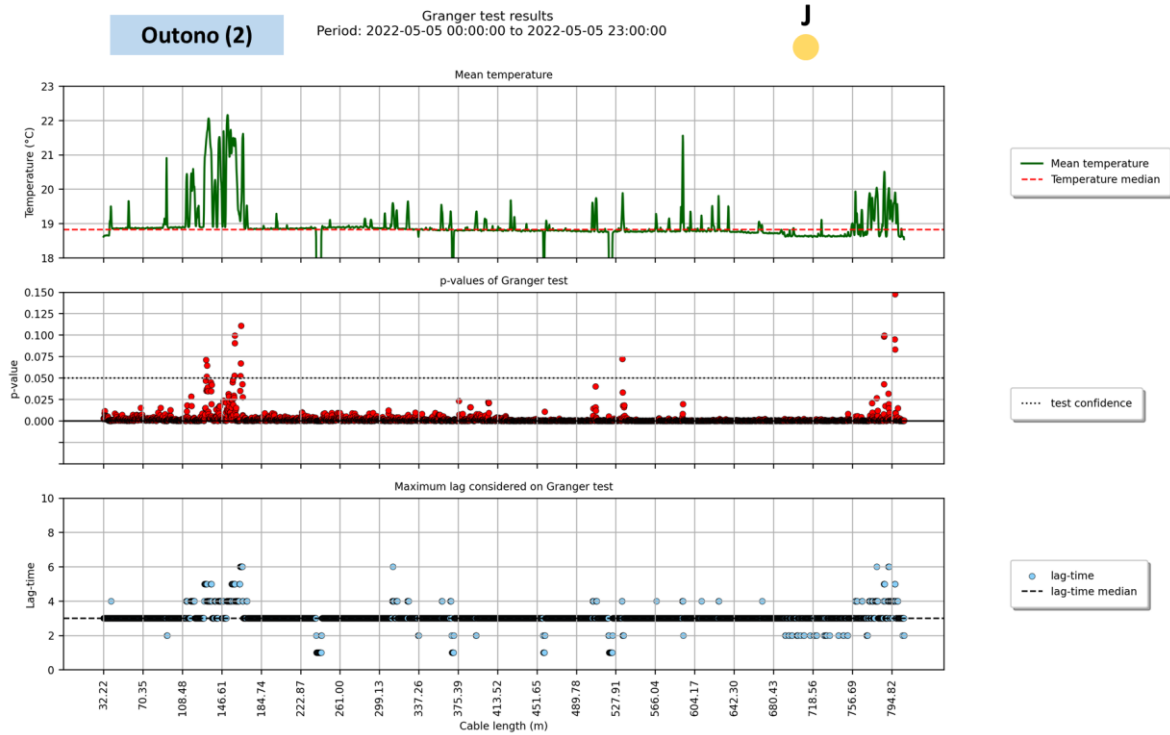
(b)



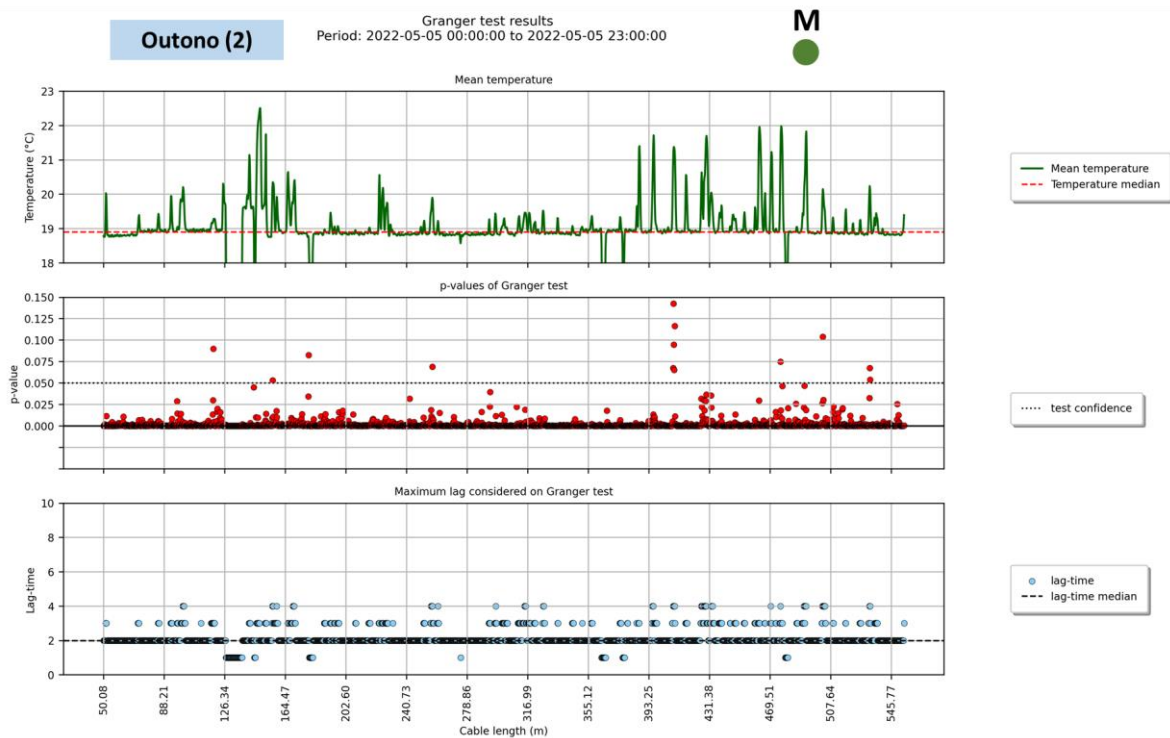
Fonte: Autor (2023)

Figura H-5 - Resultados do teste de causalidade de Granger, para a campanha de Outono (2), levantados entre 05 de maio de 2022 para o trecho de (a) jusante e (b) montante

(a)



(b)



Fonte: Autor (2023)



EESC • USP