

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
INSTITUTO DE FÍSICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA AMBIENTAL**

**AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DE PCHS EM CASCATA NA
QUALIDADE DE ÁGUA DE UM RIO AFLUENTE DO
PANTANAL COM MONITORAMENTO
DE ALTA FREQUÊNCIA**

ANTONIO CARLOS COELHO DA SILVA

ORIENTADOR: PROFº DR. PETER ZEILHOFER

CO-ORIENTADOR: PROFº DR. CARLO RALPH DE MUSIS

**Cuiabá, MT
Outubro/2021**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
INSTITUTO DE FÍSICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA AMBIENTAL**

**AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DE PCHS EM CASCATA NA
QUALIDADE DE ÁGUA DE UM RIO AFLUENTE DO
PANTANAL COM MONITORAMENTO
DE ALTA FREQUÊNCIA**

ANTONIO CARLOS COELHO DA SILVA

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Física Ambiental da Universidade Federal de Mato Grosso, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Física Ambiental.

ORIENTADOR: PROFº DR. PETER ZEILHOFER

CO-ORIENTADOR: PROFº DR. CARLO RALPH DE MUSIS

**Cuiabá, MT
Outubro/2021**

Dados Internacionais de Catalogação na Fonte.

F216i Silva, Antonio Carlos Coelho da.
AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DE PCHS EM CASCATA NA
QUALIDADE DE ÁGUA DE UM RIO AFLUENTE DO
PANTANAL COM MONITORAMENTO DE ALTA
FREQUÊNCIA / Antonio Carlos Coelho da Silva. -- 2021

169 f. : il. color. ; 30 cm.

Orientador: Peter Zeilhofer

Co-orientador: Carlo Ralph de Muis

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Mato Grosso, Instituto
de Física, Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental, Cuiabá,
2021.

Inclui bibliografia.

1. PCH. 2. Qualidade da água. 3. Alta frequência.
4. Reservatórios em cascata. I. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a)
autor(a).

Permitida a reprodução parcial ou total, desde que citada a fonte.

DEDICATÓRIA

Dedico a todos que acreditam que a educação transforma e
que um mundo melhor é possível.

AGRADECIMENTOS

Agradeço:

A UFMT, pelos meus estudos de graduação, mestrado e doutorado.

Ao PPGFA, pela oportunidade de formação profissional de qualidade;

Ao IFMT por garantir o tempo despendido para os estudos.

A ENGIE BRASIL ENERGIA SA. pelos confiança, espaço e dados cedidos para esta pesquisa, que faz parte do projeto REMMAP (Rede de monitoramento ambiental multifuncional do sistema Planalto-Pantanal).

Ao orientador, Professor Peter Zeilhofer, por ter proporcionado estrutura para desenvolver esta pesquisa.

Ao Co-orientador, Carlo Ralph de Muis pela amizade e conhecimentos os quais compartilhou comigo.

Aos professores e técnicos administrativos do PPGFA, pelos conhecimentos adquiridos.

À banca da qualificação pelas suas contribuições.

À minha esposa pela paciência e pelo incentivo.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	1
1.1.	PROBLEMÁTICA	1
1.2.	JUSTIFICATIVA	3
1.3.	RESULTADOS ESPERADOS	4
1.4.	ESTRUTURA DA TESE	5
1.5.	OBJETIVO GERAL.....	5
1.6.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	6
1.7.	HIPÓTESE	6
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	7
2.1.	MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA E A GERAÇÃO HIDRELÉTRICA	7
2.2.	LEGISLAÇÃO SOBRE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA EM RECURSOS HÍDRICOS.....	9
2.3.	PEQUENAS CENTRAIS HIDRELÉTRICA – PCHs	10
2.4.	SISTEMAS EM CASCATA	12
2.5.	CONTEXTO REGIONAL	14
2.6.	ECOSSISTEMAS AQUÁTICOS.....	15
2.6.1.	Sistemas lênticos	15
2.6.2.	Sistemas intermediários.....	15
2.6.3.	Sistemas lóticos	16
2.7.	DADOS DE QUALIDADE DE ÁGUA DE ALTA FREQUÊNCIA ..	18
2.8.	VARIÁVEIS DA QUALIDADE DE ÁGUA	20
2.8.1.	Temperatura da água	20
2.8.2.	Potencial Hidrogeniônico (pH).....	21
2.8.3.	Oxigênio Dissolvido.....	22
2.8.4.	Condutividade elétrica.....	23
2.8.5.	Nitrogênio.....	24
2.8.6.	Carbono - Demanda Química de Oxigênio (DQO).....	24
2.8.7.	Turbidez.....	25
2.9.	RESERVATÓRIOS ARTIFICIAIS NO BRASIL	26
2.10.	QUALIDADE DA ÁGUA	26
2.10.1.	Fatores de influência na qualidade da água	27
2.11.	EFEITOS DA CONSTRUÇÃO DE RESERVATÓRIOS	28
2.12.	ALTERAÇÕES NA HIDROLOGIA DE RIOS COM RESERVATÓRIOS.....	29
2.12.1.	Fluxo base reduzido e aumento de intermitência.....	29
2.12.2.	Inundações reduzidas	30
2.12.3.	Fluxo base aumentado.....	30
2.12.4.	Variabilidade a curto prazo (hidrofasagem).....	30
2.12.5.	Magnitude e frequência de inundação reduzida.....	31
2.12.6.	Área reduzida de inundação	31
2.13.	ALTERAÇÕES NA QUALIDADE FÍSICO-QUÍMICA DA ÁGUA DE RIOS COM RESERVATÓRIOS	32
2.13.1.	Em pequenos reservatórios	33
3.	MATERIAL E MÉTODOS.....	38

3.1. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO E ESTAÇÕES DE AMOSTRAGEM.....	38
3.1.1. Equipamentos utilizados.....	42
3.2. DADOS DE QUALIDADE DE ÁGUA.....	45
3.2.1. Dados das estações de alta frequência.....	45
3.2.2. Instalação das estações de alta frequência.....	46
3.3. DADOS HIDROLÓGICOS	47
3.3.1. Dados das estações de ANA.....	47
3.4. DADOS METEOROLÓGICOS.....	48
3.5. CONSOLIDAÇÃO DO BANCO DE DADOS COLETADO	49
3.5.1. Técnicas de preenchimento de falhas	49
3.5.2. Dados com inconsistência aparente.....	51
3.6. ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	51
3.6.1. Análise da interferência da vazão sobre variáveis de qualidade pelo coeficiente de correlação cruzada destendenciada (ρ_{DCCA}).....	52
3.6.2. Análise das relações entre parâmetros a partir da correlação de Spearman	55
3.6.3. Análise de componentes principais (PCA).....	59
3.6.4. Análise de variância - ANOVA.....	62
3.6.5. Changepoints e outliers	64
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	66
4.1. ANÁLISE DE COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO CRUZADA DESTENDENCIADA	66
4.1.1. pH	66
4.1.2. Oxigênio Dissolvido (OD)	67
4.1.3. Temperatura da água	68
4.1.4. Condutividade.....	70
4.1.5. NO ₃ - (Nitrato).....	71
4.1.6. DQO	72
4.1.7. Turbidez.....	73
4.2. MATRIZ DE CORRELAÇÃO	74
4.2.1. A1 – Montante da PCH Eng ^o José Gelázio da Rocha	74
4.2.2. A2 – Jusante da PCH Eng ^o José Gelázio da Rocha.....	76
4.2.3. A3 – Jusante da PCH Eng ^o José Gelázio da Rocha.....	78
4.3. ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS (PCA).....	80
4.3.1. A1 estação seca – Montante da PCH Eng ^o José Gelázio da Rocha	81
4.3.2. A1 estação chuvosa – Montante da PCH Eng ^o José Gelázio da Rocha	84
4.3.3. A1 estação seca e chuvosa – Montante da PCH Eng ^o José Gelázio da Rocha	87
4.3.4. A2 estação seca – Jusante da PCH Eng ^o José Gelázio da Rocha ..	90
4.3.5. A2 estação chuva – Jusante da PCH Eng ^o José Gelázio da Rocha	93
4.3.6. A2 estação seca e chuvosa – Jusante da PCH Eng ^o José Gelázio da Rocha	96
4.3.7. A3 estação seca – Jusante da PCH Rondonópolis.....	99
4.3.8. A3 estação chuvosa – Jusante da PCH Rondonópolis.....	102
4.3.9. A3 estação seca e chuvosa – Jusante da PCH Rondonópolis.....	105
4.4. ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA)	108

4.4.1. PH.	108
4.4.2. OD	111
4.4.3. Temperatura da água	113
4.4.4. Condutividade.....	115
4.4.5. Nitrato.....	118
4.4.6. DQO	120
4.4.7. Turbidez.....	123
4.5. ANÁLISE DA VARIAÇÃO DAS VARIÁVEIS DEVIDO AO USO DA COMPORTA DE LIMPEZA. PARADA DE GERAÇÃO E DE CHUVAS SAZONAIS	125
4.5.1. Movimentação da comporta em 29/03/2018	126
4.5.2. Movimentação da comporta em 02/04/2018	128
4.5.3. Movimentação da comporta em 03/04/2018	129
4.5.4. Movimentação da comporta em 06/04/2018	131
4.5.5. Parada de geração de PCH José Gelázio em 25/05/2018 a 26/05/2018	132
4.5.6. Chuva em 24/12/2018.....	133
4.5.7. Chuva em 01/05/2019.....	135
4.5.8. Movimentação da comporta em 03/05/2019.	136
4.5.9. Movimentação da comporta em 26/07/2019	138
4.6. ANÁLISE DA VARIAÇÃO NATURAL DAS VARIÁVEIS DA QUALIDADE DA ÁGUA	140
4.7. ANÁLISE DA VARIAÇÃO DAS VARIÁVEIS DA QUALIDADE DA ÁGUA DEVIDO AS PCHS	142
4.7.1. Alterações em A1	144
4.7.2. Alterações em A2	145
4.7.3. Alterações em A3	146
4.7.4. Alterações no pH	147
4.7.5. Alterações no OD	148
4.7.6. Alterações na Temperatura da Água	148
4.7.7. Alterações na Condutividade.....	149
4.7.8. Alterações no Nitrato.....	150
4.7.9. Alterações no DQO	151
4.7.10. Alterações na Turbidez	151
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.	153
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	157

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: Localização das PCHs Eng. José Gelázio e Rondonópolis e das estações de qualidade de água na bacia hidrográfica do Ribeirão Ponte de Pedra sub-bacia do Rio Vermelho. MT Brasil	38
FIGURA 2: Perfil de Quedas com localização das PCHs Eng. José Gelázio. Rondonópolis e João Basso (não instalada).	40
FIGURA 3: Localização da bacia hidrográfica do ribeirão Ponte de Pedra, na Bacia	41
do rio São Lourenço/Alto Paraguai e América do Sul.	41
FIGURA 4: Arranjo espacial das PCHs Eng. José Gelázio da Rocha e Rondonópolis, estações de monitoramento de qualidade da. REMAPP e estações fluviométricas.	43
FIGURA 5: Estação Água 1 (A1) a montante das PCHs.	44
FIGURA 6: Estação A2 a jusante da PCH Eng. José Gelázio da Rocha / montante PCH Rondonópolis.	44
FIGURA 7: Estação Água 3 (A3). a jusante da PCH Rondonópolis.	45
FIGURA 8: Gaiolas de metal desenvolvidas para proteção dos sensores de qualidade de água contra impactos mecânicos.	46
FIGURA 9: Vazões defluente, turbinada e vertida em resolução de 1h da PCH Eng. José Gelázio da Rocha disponíveis para o período da operação do projeto REMAPP (Março/18 até Setembro/19).	48
FIGURA 10: Precipitação nas estações A1 (precip_mont), A2 (precip_entre) e A3 (precip_jus) registradas no período de março/18 a outubro/19.	49
FIGURA 11: Exemplos de distribuição de população, nas duas primeiras linhas ocorre correlação linear, na terceira linha ocorre correlação não linear.	56
FIGURA 12: (a) ρ_{DCCA} da Vazão entre X pH montante; (b) ρ_{DCCA} da Vazão entre X pH entre; (c) ρ_{DCCA} da Vazão jusante X pH jusante, todos na estação seca; ; (d) ρ_{DCCA} da Vazão entre X pH montante; (e) ρ_{DCCA} da Vazão entre X pH entre; (f) ρ_{DCCA} da Vazão jusante X pH jusante, todos na estação chuvosa.	67
FIGURA 13: (a) ρ_{DCCA} da Vazão entre X OD montante, (b) ρ_{DCCA} da Vazão entre X OD entre, (c) ρ_{DCCA} da Vazão jusante X OD jusante, todos na estação seca, (a) ρ_{DCCA} da Vazão entre X OD montante, (b) ρ_{DCCA} da Vazão entre X OD entre, (c) ρ_{DCCA} da Vazão jusante X OD jusante, todos na estação chuvosa.	68
FIGURA 14: (a) ρ_{DCCA} da Vazão entre X Temperatura da água montante, (b) ρ_{DCCA} da Vazão entre X Temperatura da água entre, (c) ρ_{DCCA} da Vazão jusante X Temperatura da água jusante, todos na estação seca; (d) ρ_{DCCA} da Vazão entre X Temperatura da água montante, (e) ρ_{DCCA} da Vazão entre X Temperatura da água entre, (f) ρ_{DCCA} da Vazão jusante X Temperatura da água jusante, todos na estação chuvosa.	69
FIGURA 15: (a) ρ_{DCCA} da Vazão entre X Condutividade da água montante, (b) ρ_{DCCA} da Vazão entre X Condutividade da água entre, (c) ρ_{DCCA} da Vazão jusante X Condutividade da água jusante, todos na estação seca; Vazão entre X Condutividade da água entre, (f) ρ_{DCCA} da Vazão jusante X Condutividade da água jusante, todos na estação chuvosa.	70
FIGURA 16: (a) ρ_{DCCA} da Vazão entre X NITRATO montante, (b) ρ_{DCCA} da Vazão entre X NITRATO entre, (c) ρ_{DCCA} da Vazão jusante X Nitrito jusante, todos na estação seca, (d) ρ_{DCCA} da Vazão entre X Nitrito montante, (e) ρ_{DCCA}	

da Vazão entre X Nitrato entre, (f) ρ_{DCCA} da Vazão jusante X Nitrato jusante, todos na estação chuvosa.....	71
FIGURA 17: (a) ρ_{DCCA} da Vazão entre X DQO montante, (b) ρ_{DCCA} da Vazão entre X DQO entre, (c) ρ_{DCCA} da Vazão jusante X DQO jusante, todos na estação seca; (d) ρ_{DCCA} da Vazão entre X DQO montante, (e) ρ_{DCCA} da Vazão entre X DQO entre, (f) ρ_{DCCA} da Vazão jusante X DQO jusante, todos na estação seca.	72
FIGURA 18: (a) ρ_{DCCA} da Vazão entre X Turbidez montante, (b) ρ_{DCCA} da Vazão entre X Turbidez entre, (c) ρ_{DCCA} da Vazão jusante X Turbidez jusante, todos na estação seca; (d) ρ_{DCCA} da Vazão entre X Turbidez montante, (e) ρ_{DCCA} da Vazão entre X Turbidez entre, (f) ρ_{DCCA} da Vazão jusante X Turbidez jusante, todos na estação chuvosa.	73
FIGURA 19: Matriz de Correlação de A1 na estação seca, parte inferior: gráfico de distribuição, no centro: Histograma, parte superior: coeficiente de correlação de postos de Spearman.	74
FIGURA 20: Matriz de Correlação de A1 na estação chuvosa, parte inferior: Gráfico de distribuição, no centro: Histograma, parte superior: coeficiente de correlação de postos de Spearman.....	75
FIGURA 21: Matriz de Correlação de A1, parte inferior: gráfico de distribuição, no centro: Histograma, parte superior: coeficiente de correlação de postos de Spearman.	75
FIGURA 22: Matriz de Correlação de A2 na estação seca, parte inferior: gráfico de distribuição, no centro: Histograma, parte superior: coeficiente de correlação de postos de Spearman.	76
FIGURA 23: Matriz de Correlação de A2 na estação chuvosa, parte inferior: gráfico de distribuição, no centro: Histograma, parte superior: coeficiente de correlação de postos de Spearman.....	77
FIGURA 24: Matriz de Correlação de A2, parte inferior: gráfico de distribuição, no centro: Histograma, parte superior: coeficiente de correlação de postos de Spearman.	78
FIGURA 25: Matriz de Correlação de A3 na estação seca, parte inferior: gráfico de distribuição, no centro: Histograma, parte superior: coeficiente de correlação de postos de Spearman.	78
FIGURA 26: Matriz de Correlação de A3 na estação chuvosa, parte inferior: gráfico de distribuição, no centro: Histograma, parte superior: coeficiente de correlação de postos de Spearman.....	79
FIGURA 27: Matriz de Correlação de A3, parte inferior: gráfico de distribuição, no centro: Histograma, parte superior: coeficiente de correlação de postos de Spearman.	80
FIGURA 28: Diagrama de declividade da variância das componentes principais de A1 na estação seca.	81
FIGURA 29: Ordenação biplot pela Análise de Componentes Principais (ACP) das medidas geradas em A1 na estação seca, a partir de sete variáveis das variáveis de qualidade de água.	82
FIGURA 30: (a) Mapa perceptual das medidas geradas em A1 na período seco, a partir de sete variáveis das variáveis de qualidade de água, (b) Tabela de dimensionalidade das variáveis de qualidade da água em A1 na período seco.	

.....	83
FIGURA 31: Diagrama de declividade da variância das componentes principais de A1 na estação chuvosa.....	84
FIGURA 32: Ordenação biplot pela Análise de Componentes Principais (ACP) das medidas geradas em A1 na estação chuvosa, a partir de seis variáveis de qualidade de água.	85
FIGURA 33: (a) Mapa perceptual das medidas geradas em A1 na estação chuvosa. a partir de seis variáveis de qualidade de água. (b) Tabela de dimensionalidade das variáveis de qualidade da água em A1 na estação chuva.	86
FIGURA 34: Diagrama de declividade da variância das componentes principais de A1 estação seca e chuvosa,.....	87
FIGURA 35: Ordenação biplot pela Análise de Componentes Principais (ACP) das medidas geradas em A1 na estação seca e chuvosa, a partir de seis variáveis de qualidade de água.	88
FIGURA 36: (a) Mapa perceptual das medidas geradas em A1 na estação seca e chuvosa, a partir de seis variáveis de qualidade de água, (b) Tabela de dimensionalidade das variáveis de qualidade da água em A1 na estação seca e chuvosa.	89
FIGURA 37: Diagrama de declividade da variância das componentes principais de A2 estação seca.....	90
FIGURA 38: Ordenação biplot pela Análise de Componentes Principais (ACP) das medidas geradas em A2 na estação seca, a partir de sete variáveis de qualidade de água.	91
FIGURA 39: (a) Mapa perceptual das medidas geradas em A2 na estação seca, a partir de sete variáveis de qualidade de água, (b) Tabela de dimensionalidade das variáveis de qualidade da água em A2 na estação seca.	92
FIGURA 40: Gráfico de diagrama da declividade da variância das componentes principais de A2 na estação chuvosa.	93
FIGURA 41: Ordenação biplot pela Análise de Componentes Principais (ACP) das medidas geradas em A2 na estação chuvosa, a partir de seis variáveis de qualidade de água.	94
FIGURA 42: (a) Mapa perceptual das medidas geradas em A2 na estação chuvosa, a partir de seis variáveis de qualidade de água, (b) Tabela de dimensionalidade das variáveis de qualidade da água em A2 na estação chuva.	95
FIGURA 43: Gráfico do diagrama de declividade da variância das componentes principais de A2 estação seca e chuvosa.	96
FIGURA 44: Ordenação biplot pela Análise de Componentes Principais (ACP) das medidas geradas em A2 na estação seca e chuvosa, a partir de seis variáveis de qualidade de água.	97
FIGURA 45: (a) Mapa perceptual das medidas geradas em A2 na estação seca e chuvosa, a partir de seis variáveis de qualidade de água, (b) Tabela de dimensionalidade das variáveis de qualidade da água em A2 na estação seca e chuvosa.	98
FIGURA 46: Gráfico do diagrama de declividade da variância das componentes principais de A3 estação seca.	99
FIGURA 47: Ordenação biplot pela Análise de Componentes Principais (ACP)	

das medidas geradas em A3 na estação seca, a partir de sete variáveis de qualidade de água.	100
FIGURA 48: (a) Mapa perceptual das medidas geradas em A3 na estação seca, a partir de sete variáveis de qualidade de água, (b) Tabela de dimensionalidade das variáveis de qualidade da água em A3 na estação seca.	101
FIGURA 49: Gráfico do diagrama de declividade da variância das componentes principais de A3 na estação chuvosa.	102
FIGURA 50: Ordenação biplot pela Análise de Componentes Principais (ACP) das medidas geradas em A3 na estação chuvosa, a partir de seis variáveis de qualidade de água.	103
FIGURA 51: (a) Mapa perceptual das medidas geradas em A3 na estação chuvosa, a partir de seis variáveis de qualidade de água, (b) Tabela de dimensionalidade das variáveis de qualidade da água em A3 na estação chuva.	104
FIGURA 52: Gráfico de barras da variância das componentes principais de A3 na estação seca e chuvosa.	105
FIGURA 53: Ordenação biplot pela Análise de Componentes Principais (ACP) das medidas geradas em A3 na estação seca e chuvosa, a partir de seis variáveis de qualidade de água.	106
FIGURA 54: (a) Mapa perceptual das medidas geradas em A3 na estação seca e chuvosa, a partir de seis variáveis de qualidade de água, (b) Tabela de dimensionalidade das variáveis de qualidade da água em A3 na estação seca e chuvosa.	107
FIGURA 55: (a) Mediana do pH durante o dia na estação seca e chuvosa e durante a noite na estação seca e chuvosa, nos pontos A1 (pH_mont), A2 (pH_entre) e A3 (pH_jus); (b) Mediana do pH em cada mês do ano nos pontos A1 (pH_mont), A2 (pH_entre) e A3 (pH_jus); (c) Box-plot do pH em cada mês do ano nos pontos A1 (pH_mont), A2 (pH_entre) e A3 (pH_jus).	109
FIGURA 56: (a) Mediana do OD durante o dia na estação seca e chuvosa e durante a noite na estação seca e chuvosa nos pontos A1 (OD_mont), A2 (OD_entre) e A3 (OD_jus); (b) Mediana do OD em cada mês do ano nos pontos A1 (OD_mont), A2 (OD_entre) e A3 (OD_jus); (c) Box-plot do OD em cada mês do ano nos pontos A1 (OD_mont), A2 (OD_entre) e A3 (OD_jus).	112
FIGURA 57: (a) Mediana da Temperatura da água durante o dia na estação seca e chuvosa e durante a noite na estação seca e chuvosa nos pontos A1 (Temp_mont), A2 (Temp_entre) e A3 (Temp_jus); (b) Mediana da Temperatura da água em cada mês do ano nos pontos A1 (Temp_mont), A2 (Temp_entre) e A3 (Temp_jus); (c) Box-plot do Temperatura da água em cada mês do ano nos pontos A1 (Temp_mont), A2 (Temp_entre) e A3 (Temp_jus).	114
FIGURA 58: (a) Mediana da Condutividade durante o dia na estação seca e chuvosa e durante a noite na estação seca e chuvosa nos pontos A1 (Cond_mont), A2 (Cond_entre) e A3 (Cond_jus); (b) Mediana da Condutividade em cada mês do ano nos pontos A1 (Cond_mont), A2 (Cond_entre) e A3 (Cond_jus); (c) Box-plot do Condutividade em cada mês do ano nos pontos A1 (Cond_mont), A2 (Cond_entre) e A3 (Cond_jus).	116
FIGURA 59: (a) Mediana da Nitrato durante o dia na estação seca e chuvosa e durante a noite na estação seca e chuvosa nos pontos A1 (Nitrato_mont), A2 (Nitrato_entre) e A3 (Nitrato_jus); (b) Mediana do Nitrato em cada mês do ano	

nos pontos A1 (Nitrato_mont), A2 (Nitrato_entre) e A3 (Nitrato_jus); (c) Box-plot do Nitrato em cada mês do ano nos pontos A1 (NO ₃ -_mont), A2 (NO ₃ -_entre) e A3 (NO ₃ -_jus).	119
FIGURA 60: (a) Mediana do DQO durante o dia na estação seca e chuvosa e durante a noite na estação seca e chuvosa nos pontos A1 (DQO_mont), A2 (DQO_entre) e A3 (DQO_jus); (b) Mediana do DQO em cada mês do ano nos pontos A1 (DQO_mont), A2 (DQO_entre) e A3 (DQO_jus); (c) Box-plot do DQO em cada mês do ano nos pontos A1 (DQO_mont), A2 (DQO_entre) e A3 (DQO_jus).	121
FIGURA 61: (a) Mediana da Turbidez durante o dia na estação seca e chuvosa e durante a noite na estação seca e chuvosa nos pontos A1 (Turb_mont), A2 (Turb_entre) e A3 (Turb_jus); (b) Mediana da Turbidez em cada mês do ano nos pontos A1 (Turb_mont), A2 (Turb_entre) e A3 (Turb_jus); (c) Box-plot da Turbidez em cada mês do ano nos pontos A1 (Turb_mont), A2 (Turb_entre) e A3 (Turb_jus).	124
FIGURA 62: Leitura de parâmetros em 29/03/2018 em A1, A2 e A3 (a) Vazão PCH _{JG} ; (b) pH; (c) OD; (d) Condutividade; (e) Temperatura da água; (f) Vazão PCH _{Rond}	127
FIGURA 63: Leitura de parâmetros em 02/04/2018 em A1, A2 e A3 (a) Vazão PCH _{JG} ; (b) pH; (c) OD; (d) Condutividade; (e) Temperatura da água; (f) Vazão PCH _{Rond}	128
FIGURA 64: Leitura de parâmetros em 03/04/2018 em A1, A2 e A3 (a) Vazão PCH _{JG} ; (b) pH; (c) OD; (d) Condutividade; (e) Temperatura da água; (f) Vazão PCH _{Rond}	129
FIGURA 65: Leitura de parâmetros em 06/04/2018 em A1, A2 e A3 (a) Vazão PCH _{JG} ; (b) pH (c) OD (d) Condutividade. (e) Temperatura da água; (f) Vazão PCH _{Rond}	131
FIGURA 66: Leitura de parâmetros em 25/05/2018 em A1, A2 e A3 (a) Vazão PCH _{JG} ; (b) pH; (c) OD; (d) Condutividade; (e) Temperatura da água; (f) Vazão PCH _{Rond}	132
FIGURA 67: Leitura de parâmetros em 24/12/2018 em A1, A2 e A3 (a) vazão (b) precipitação (c) pH (d) OD. (e) Condutividade. (f) Temperatura da água. (g) Nitrato (h) DQO. (i) Vazão PCH _{Rond}	134
FIGURA 68: Leitura de parâmetros em 01/05/2019 em A1, A2 e A3 (a) vazão (b) precipitação (c) pH. (d) OD. (e) Condutividade. (f) Temperatura da água (g) Nitrato (h) DQO (i) Turbidez. (j) Vazão PCH _{Rond}	136
FIGURA 69: Leitura de parâmetros em 03/05/2019 em A1, A2 e A3 (a) Vazão da PCH _{JG} ; (b) pH; (c) OD; (d) Temperatura da água; (e) Condutividade; (f) Nitrato; (g) DQO; (h) Turbidez; (i) Vazão da PCH _{Rond}	137
FIGURA 70: Leitura de parâmetros em 26/07/2019 em A1, A2 e A3 (a) Vazão da PCH _{JG} ; (b) pH; (c) OD; (d) Condutividade; (e) Temperatura da água; (f) Nitrato; (g) DQO; (h) Turbidez; (i) Vazão da PCH _{Rond}	139

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: Capacidade Instalada de Geração Elétrica no Brasil (valores em MW)	7
TABELA 2: Distribuição do potencial hidrelétrico inventariado de projetos hidrelétricos menores que 30 MW por região geográfica.	8
TABELA 3: Configuração das principais componentes para monitoramento de qualidade de água das estações automáticas.	42
TABELA 4: Estações fluviométricas disponíveis na bacia do Ribeirão Ponte de Pedra.	47
Para classificação da correlação do valor de ρ DCCA foi adotada a seguinte padronização, conforme tabela 5.	54
TABELA 5: Variação do coeficiente de correlação cruzada sem tendência em diferentes escalas de tamanho.	54
TABELA 6: Interpretação dos valores-p e nível de significância do teste estatístico.	57
TABELA 7: Variação da correlação de acordo com o coeficiente de correlação de Pearson.	58
TABELA 8: Períodos de dados utilizados para formação da matriz de Correlação.	59
TABELA 9: Dados considerados para a Análise de Componentes Principais (PCA).	61
TABELA 10: Tabela de autovalores e variâncias das componentes principais de A1 na estação seca.	81
TABELA 11: Tabela de autovalores e variâncias das componentes principais de A1 na estação chuvosa.	84
TABELA 12: Tabela de autovalores e variâncias das componentes principais de A1 na estação seca e chuvosa.	87
TABELA 13: Tabela de autovalores e variâncias das componentes principais de A2 na estação seca.	90
TABELA 14: Tabela de autovalores e variâncias das componentes principais de A2 na estação chuvosa.	93
TABELA 15: Tabela de autovalores e variâncias das componentes principais de A2 na estação seca e chuvosa.	96
TABELA 16: Tabela de autovalores e variâncias das componentes principais de A3 na estação seca.	99
TABELA 17: Tabela de autovalores e variâncias das componentes principais de A3 na estação chuvosa.	102
TABELA 18: Tabela de autovalores e variâncias das componentes principais de A3 na estação seca e chuvosa.	105
TABELA 19: Tabela de medianas máximas e mínimas da variável pH nas estações seca e chuvosa em A1, A2 e A3.	110
TABELA 20: Tabela de medianas, máximas e mínimas da variável OD nas estações seca e chuvosa em A1, A2 e A3.	112
TABELA 21: Tabela de mediana, máximas e mínimas da variável Temperatura da água nas estações seca e chuvosa em A1, A2 e A3.	115
TABELA 22: Tabela de medianas máximas e mínimas da variável	

Condutividade nas estações seca e chuvosa em A1, A2 e A3.....	117
TABELA 23: Tabela de medianas, máximas e mínimas da variável Nitrato nas estações seca e chuvosa em A1, A2 e A3.....	119
TABELA 24: Tabela de medianas, máximas e mínimas da variável DQO nas estações seca e chuvosa em A1, A2 e A3.....	122
TABELA 25: Tabela de medianas, máximas e mínimas da variável Turbidez nas estações seca e chuvosa em A1, A2 e A3.	124

LISTA DE ABREVIACÕES

REMAPP - Rede de monitoramento ambiental multifuncional do sistema Planalto-Pantanal
CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária MMA - Ministério do Meio Ambiente
BAP - Bacia do Alto Paraguai
kW - quilo Watt
MW - Megawatt(s)
TWh - Tera Watt por hora
GW - Giga Watt
CGHs - Centrais Geradoras
MME - Ministério de Minas e Energia
ANA - Agência Nacional de Águas
ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica
EPE - Empresa de Pesquisa Energética
PCH_{JG} - PCH Engenheiro José Gelázio da Rocha
PCH_{Ron} - PCH Rondonópolis
pH - Potencial hidrogeniônico
OD - Oxigênio dissolvido
NO₃⁻ - Nitrato
DQO - Demanda Química de Oxigênio
DBO - Demanda Bioquímica de Oxigênio
Turb - Turbidez
Mont - Montante
COD - Concentração de oxigênio dissolvido na água
Jus - Jusante
WCD - World Commission on Dams (comissão mundial de barragens)
IEA - Agência Internacional de Energia
IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change
RCC - River Continuum Concept
SDC - Serial Discontinuity Concept
DNAEE - Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica
PCH - Pequena central hidrelétrica
PCHS - Pequenas centrais hidrelétricas
UHE - Usina Hidrelétrica
SEMA - Secretaria de Estado do Meio Ambiente (Mato Grosso)
ANOVA - Análise de Variância
DCCA - Análise do coeficiente de correlação cruzada destendenciada
DFA - Análise de flutuação destendenciada
ACP ou PCA - Análise de componentes principais
BPP - Bacia hidrográfica do Ribeirão Ponte de Pedra

RESUMO

SILVA, A. C. C. Avaliação dos efeitos de PCHs em cascata na qualidade de água de um rio afluente do pantanal com monitoramento de alta frequência. Cuiabá, 2020, 179f. Tese (Doutorado em Física Ambiental) - Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso.

O presente estudo visou uma avaliação das possíveis alterações na qualidade de água, devido a empreendimentos hidrelétricos em rios na borda do Pantanal. Baseadas na análise de 7 (sete) variáveis formadoras da qualidade da água (pH, OD, Temperatura, Condutividade, Turbidez, Nitrato e Carbono), medidas em resolução sub-horária, o sistema composto por três estações automáticas monitoram o ribeirão Ponte de Pedra, à montante e à jusante das PCHs, e constitui o primeiro sistema de monitoramento de alta frequência para variáveis de qualidade de água em um rio contribuinte do Pantanal. Nas análises estatísticas foram avaliadas a influência da vazão, as correlações entre as variáveis monitoradas, a análise de componentes principais, e a análise de variância, onde foram levados em consideração a localização dos pontos monitorados, o período do dia, os meses do ano e as estações seca e chuvosa. Os resultados do monitoramento em alta frequência mostraram que não há alteração significativa das variáveis monitoradas durante os períodos do dia. No entanto, apesar da baixa carga de nutrientes e sedimentos do ribeirão, os resultados apontaram diferenças significativas entre as estações seca e chuvosa nos pontos a jusante e montante das PCHS, em variáveis importantes, como o potencial hidrogênico e o Oxigênio dissolvido. Das variáveis avaliadas, a temperatura teve impacto cumulativo que pode ser associado aos efeitos em cascata das hidrelétricas. Apesar de pequeno, o reservatório retém carga de carbono e nitrogênio. O monitoramento em alta frequência é muito eficiente para mostrar as rápidas alterações de qualidade de água, devido aos hidrôpicos produzidos pela operação das pequenas centrais hidrelétricas.

Palavras-chave: PCH, qualidade da água, alta-frequência, reservatórios em cascata.

ABSTRACT

SILVA, A. C. C. **Evaluation of the effects of cascading SHPs on the water quality of a tributary river in the wetland with high-frequency monitoring.** Cuiabá, 2020, 179f. Thesis (Doctoral Degree in Environmental Physics) - Institute of Physics, Federal University of Mato Grosso.

This study seek to evaluate the possible changes in water quality due to hydroelectric projects at rivers on the edge of the Pantanal. Based on the analysis of 7 (seven) water quality variables (pH, OD, Temperature, Conductivity, Turbidity, Nitrate and Carbon), measured in sub-hourly resolution, the system composed of three automatic stations monitors the Ponte de Pedra stream , upstream and downstream of the SHPs, and constitutes the first high-frequency monitoring system for water quality parameters in a contributing river in the Pantanal. In the statistical analyses, the influence of the flow, the correlations between the monitored parameters, the analysis of principal components, and the analysis of variance were evaluated, which took into account the location of the monitored points, the period of the day, the months of the year and the dry and wet seasons. The results of high-frequency monitoring showed that there is no significant change in the monitored variables during periods of the day. However, despite the low nutrient and sediment load of the stream, the results showed significant differences between the dry and wet seasons in the downstream and upstream points of the SHP, in important parameters such as hydrogen potential and dissolved oxygen. Of the variables evaluated, temperature had a cumulative impact that can be associated with the cascade effects of hydroelectric plants. Although small, the reservoir retains a carbon and nitrogen charge. High-frequency monitoring is very efficient to show rapid changes in water quality, due to hydronics produced by the operation of small hydroelectric plants.

Keywords: SHP, water quality, high-frequency, cascading reservoirs.

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO

1.1. PROBLEMÁTICA

Os rios, em seu estado natural, estão entre os ecossistemas mais dinâmicos, diversificados e complexos do planeta. São provavelmente os ecossistemas mais degradados e há poucas evidências de que isso mudará no futuro próximo (DUDGEON, 2010; HUMPHRIES; KECKEIS; FINLAYSON, 2014).

Alguns dos principais fatores responsáveis por essa degradação estão relacionados às alterações da cobertura e do uso da terra, além das mudanças climáticas, e estão afetando os regimes térmico, de luz, o tempo, a magnitude e a frequência dos eventos de perturbação dos rios, tanto em escala local quanto global (BERNHARDT et al., 2018; STOCKER et al., 2013).

A crescente demanda de energia e o compromisso da Rio + 20 com o uso de recursos de energia compatíveis com Kyoto desencadearam uma nova era de construção de represas, com mais de 3700 barragens de hidrelétricas atualmente planejadas ou em construção em todo o mundo (ZARFL, C.; LUMSDON, A. E.; TOCKNER, K. A., 2014). Isso tem o potencial de fragmentar significativamente muitos dos grandes rios restantes de fluxo livre do planeta (GREIMEL et al., 2016).

A modificação antropogênica dos rios tem um efeito profundo na integridade do ecossistema (RICHTER, B. D., MATHEWS, R., HARRISON, D. L.; WIGINGTON, R., 2003; WU et al., 2019) e é sem dúvida a maior ameaça do mundo à biodiversidade aquática (COOPER, M. M.; ZAMPATTI, B. P, 2018; DUDGEON et al., 2015; LEHNER et al., 2011). Os sistemas lóticos são talvez os mais afetados do planeta e intensamente explorados para abastecimento de água, irrigação, geração de eletricidade e descarte de resíduos; e as alterações no uso da terra os afetam diretamente (GRILL et al., 2019; LEHNER et al., 2011).

Em 2000, a Word Comision on Dams - WCD estimava que 60% das grandes bacias hidrográficas do mundo já estivessem altamente ou moderadamente fragmentadas por represas. Grill (2019) avaliou o status de conectividade de 12 milhões de quilômetros de rios em todo o mundo e identificou que apenas 37% dos rios com mais de 1.000 quilômetros permanecem fluindo livremente em todo o seu

comprimento, enquanto 23% fluem ininterruptamente para o oceano. Muitas das principais bacias hidrográficas do mundo agora contêm várias represas. Dentro de uma bacia, quanto maior o número de barragens, maior a fragmentação dos ecossistemas fluviais.

Os impactos provocados por barragens no ecossistema pluvial dependem, de sua localização, seu tamanho, seu uso e gestão, pois cada barragem constitui uma barreira artificial que pode implicar alterações do rio, como mudanças no regime de fluxo e retenção de sedimentos (COUTO, T. B. A.; OLDEN, J. D. 2018; MACINTOSH et al., 2011).

Os efeitos de grandes barragens e aquelas destinadas para a produção hidrelétrica foram amplamente estudados, particularmente em regiões temperadas, (ALGERA et al., 2020; ROLLS, R. J.; BOND, N. R. , 2017). As hidrelétricas de pequeno porte, apesar de sua importância numérica, ainda são menos estudadas, e seus efeitos ecológicos, principalmente em ambientes tropicais, ainda são discutíveis.

A Bacia do rio Paraguai abrange parte dos países Argentina, Bolívia, Brasil e Paraguai, mas, em território brasileiro, está localizada entre os estados de Mato Grosso e Mato Grosso do Sul. A parte brasileira, portanto, é denominada Bacia do Alto Paraguai (BAP) e contém os três biomas: Amazônia, Cerrado e Pantanal (ANA, 2004; ANA, 2005).

A bacia do Alto Paraguai compreende duas áreas em condições consideravelmente diversas no que se refere aos recursos hídricos e naturais, o planalto e a planície. As nascentes dos rios que formam o Pantanal têm sua origem no planalto, com domínio do bioma Cerrado. Já a planície de inundação, que representa o bioma Pantanal, possui características próprias de áreas sazonalmente inundáveis.

Sob o enfoque de função ecossistêmica, o elemento crucial para a função do sistema Pantanal na relação planalto–planície é o fluxo hidrológico, criando nichos reprodutivos e alimentares para a biodiversidade regional. Por essas características, o Cerrado/Pantanal é considerado um dos *hotspots* de biodiversidade e recursos hídricos do planeta, em razão de sua importância e do grau de ameaças ambientais que vem sofrendo (ANA, 2004), além das mudanças de uso da terra, e, também, a instalação de hidrelétricas na parte de planalto.

O monitoramento dos cursos de água é uma importante ferramenta na avaliação do funcionamento de ecossistemas aquáticos, já que é uma forma de suporte às pesquisas, pois auxilia na detecção de problemas, como fontes de contaminação e poluição, e as alterações biológicas que podem ocorrer em função das alterações nas suas respectivas bacias hidrográficas (TUNDISI, J. G.; TUNDISI, T. M., 2008).

Os sistemas convencionais permitem acompanhar a evolução das condições da qualidade das águas ao longo do tempo, fornecendo séries temporais de dados. Como vantagens, apresentam uma maior abrangência em termos de variáveis e de área de estudo (distribuição das estações de amostragem), no entanto, demandam muito tempo. Além disso, é necessário frisar, também, a defasagem do tempo entre a coleta e o resultado de análise e uma menor possibilidade na detecção de dados atípicos.

Os sistemas automáticos (sondas e equipamentos de medição) fazem uma avaliação contínua da qualidade da água, o que permite identificar alterações instantâneas, tornando possível agilizar as providências necessárias quando da detecção de dados atípicos. Esse mapeamento pode apresentar resultados em tempo real, além de armazenar e/ou transmitir os dados por meios eletrônicos via satélite ou por internet, além de possibilitar o acoplamento de sensores de qualidade de água com medições climatológicas. As desvantagens são o investimento inicial, que é maior, e a área de estudo, que é pontual. Há, ainda, um número limitado de variáveis analisadas e existe a possibilidade de perda de dados por dano mecânico ou elétrico dos equipamentos.

1.2. JUSTIFICATIVA

A escolha das variáveis formadoras de qualidade da água potencial Hidrogiônico (pH), Oxigênio Dissolvido (OD), temperatura da água, condutividade, turbidez, Nitrato (NO_3^-) e Demanda Química de Oxigênio (DQO) se justifica na importância dessas variáveis para a avaliação da saúde dos cursos de água, na disponibilidade e qualidade dos equipamentos de alta resolução, assim como a possibilidade de utilização dos dados de monitoramento de qualidade de água da agência nacional de águas - ANA.

Em monitoramentos com sistemas convencionais, os resultados das análises sobre a qualidade de água dependem da frequência de amostragem, do método

utilizado para coleta, armazenamento e transporte ao laboratório; do tempo de armazenamento e da técnica de análise química utilizada. Com a utilização de equipamentos eletrônicos de medição de alta frequência *in loco* não há manuseio das amostras, diminuindo riscos de erros de coleta, transporte e armazenamento que poderiam contaminá-las, invalidá-las ou dar respostas errôneas da qualidade da água coletada.

Além disso, as alterações de curto prazo não são identificadas com dados mensais, semanais, às vezes nem por dados diários. São mudanças que podem ocorrer por ação antrópica, por desastres ambientais ou por fato natural raro. Neste caso, fazem-se necessários dados de alta resolução temporal, obtidos de forma contínua que possibilitam observar as alterações manifestadas por picos, sejam eles positivos ou negativos, que podem alterar a qualidade e a quantidade da água à jusante, no gradiente do rio. A coleta de dados de variáveis formadoras da qualidade da água com alta frequência possibilita a construção de modelos que permitam previsão dos efeitos de tais eventos.

A importância do Pantanal motiva este estudo, que visa entender, através do monitoramento de alta frequência, as possíveis alterações provocadas na qualidade de água do ribeirão Ponte de Pedra, sub-bacia da Bacia do Alto Paraguai (BAP), que possui em seu curso longitudinal duas pequenas centrais hidrelétricas (PCHs), pois muitos dos rios de planalto possuem pouco ou nenhum monitoramento, seja ele hidrológico, de qualidade ou de sedimentos, o que deixa sem respostas, na maioria dos casos, quais são as alterações provocadas por essas mudanças de uso e ocupação do solo, assim como as provocadas pela instalação das hidrelétricas.

1.3. RESULTADOS ESPERADOS

Espera-se que, com o conjunto de variáveis consideradas relevantes por hidrologistas, geoquímicos e ecologistas podendo ser monitorado em alta resolução temporal, e sendo aplicado a estes, métodos adequados de coleta e análise dos dados, que os mesmos possam ajudar a compreensão das alterações da dinâmica natural das variáveis físicos e químicos de pequenos cursos d'água no planalto circunvizinho do Pantanal matogrossense, devido à alteração provocada pela inserção de estrutura de controle de vazão e sedimentos. Espera-se que com os resultados obtidos seja possível especificar quais variações na qualidade de água são decorrentes da variabilidade temporal natural e quais podem ser atribuídas às hidrelétricas; e servir como base de

dados para estudo mais amplo da influência de instalação de reservatórios na parte alta do Pantanal, assim como em pequenos cursos de água no Cerrado brasileiro.

1.4. ESTRUTURA DA TESE

A tese está estruturada em cinco capítulos. Este primeiro apresenta uma introdução, a justificativa, objetivos e resultados esperados. O segundo capítulo apresenta a fundamentação teórica, onde, inicialmente, são descritas a matriz energética brasileira e a geração hidrelétrica, sua legislação e o contexto regional. Na sequência, é feita uma revisão sobre as principais teorias ecológicas aplicadas para rios; a definição de sistemas lótico, lêntico e intermediário, das variáveis formadoras da qualidade de água e da qualidade da água no sistema lótico. É realizada também uma abordagem sobre a disponibilidade/importância de dados em alta frequência de amostragem, sobre os reservatórios de hidrelétricas no Brasil e seus efeitos sobre a qualidade de água nos próprios represamentos e nos rios interrompidos com reservatórios.

O terceiro capítulo descreve os materiais e métodos aplicados, apresenta a área de estudo, os equipamentos utilizados e sua configuração. Nesse capítulo é detalhado também o tratamento estatísticos dos dados para avaliar aspectos temporais e espaciais da qualidade de água.

O capítulo quatro sintetiza os resultados e é onde se deu a discussão acerca dos dados obtidos, buscando responder às questões científicas apresentadas nos objetivos geral e específicos.

No quinto capítulo, encontram-se as considerações finais.

1.5. OBJETIVO GERAL

O principal objetivo deste estudo é demonstrar como o uso de sistemas automáticos de monitoramento permite uma melhor gestão da qualidade de água, possibilitando identificar as possíveis alterações provocadas por PCHs através da quantificação e qualificação de dados de alta frequência.

1.6. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Abaixo, elencam-se os objetivos específicos do presente estudo:

- Avaliar o comportamento natural das variáveis formadoras da qualidade da água do ribeirão Ponte de Pedra com dados de monitoramento de alta frequência;
- Avaliar o comportamento após a instalação das hidrelétricas das variáveis formadoras da qualidade da água do ribeirão Ponte de Pedra com dados de monitoramento de alta frequência;
- Avaliar o grau das alterações das variáveis da qualidade da água estudada durante um ano hidrológico com dados de alta frequência;
- Avaliar as alterações dos regimes de temperatura (as flutuações diárias e sazonais) devido às hidrelétricas em cascata.

1.7. HIPÓTESE

Com um banco de dados consistente e validado de variáveis físico-químicas da qualidade da água, medidas em alta frequência, durante um período que abarca todas as estações do ano, e um estudo paralelo do uso da terra, será possível identificar alterações das variáveis formadoras da qualidade da água, que não são identificadas em medições de baixa frequência, e entender quais alterações podem ser atribuídas às hidrelétricas.

CAPÍTULO 2

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1.MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA E A GERAÇÃO HIDRELÉTRICA

O Brasil possui no total 9.462 empreendimentos energéticos em operação, totalizando 175,927 GW de potência instalada. Atualmente 313 empreendimentos estão em construção (13,96 GW) e mais 842 empreendimentos estão com construção não iniciada, representando 34,054 GW (ANEEL, 2021).

Dados de 2018 apontavam o Brasil como o terceiro maior potencial de geração de energia hidrelétrica do mundo (818 TWh/a), ficando atrás somente da China (1.753 TWh/ano) e Rússia (852 TWh/a). A sua matriz elétrica é de origem predominantemente renovável, com destaque para a fonte hídrica. As fontes renováveis representam 80,4% da oferta interna de eletricidade no Brasil, que é a resultante da soma dos montantes referentes à produção nacional somados às importações, que são essencialmente de origem renovável (ANEEL, 2019b). As hidrelétricas foram responsáveis pela geração de 65,25% da eletricidade do país, que corresponde a 12% da matriz energética brasileira (ANEEL, 2019c).

Apesar do aumento de outras fontes, como fontes térmicas, devido a restrições socioeconômicas e ambientais de projetos hidrelétricos e aos avanços tecnológicos no aproveitamento de fontes não-convencionais, como a eólica e solar, a energia hidráulica continuará sendo, por muitos anos, a principal fonte geradora de energia elétrica do Brasil. A Tabela 1 apresenta a capacidade instalada de geração elétrica no Brasil por fonte energética em este século.

TABELA 1: Capacidade Instalada de Geração Elétrica no Brasil (valores em MW)

	Hídrica	Térmica	Eólica	Solar	Nuclear
2000	61.063	10.623	19	-	1.966
2001	62.409	10.481	21	-	1.966
2002	64.474	13.813	22	-	2.007
2003	67.698	16.130	22	-	2.007
2004	69.088	19.556	29	-	2.007
2005	71.060	19.770	29	-	2.007
2006	73.678	20.372	237	-	2.007
2007	76.869	21.229	247	-	2.007

2008	77.545	22.999	398	-	2.007
2009	78.610	25.351	602	-	2.007
2010	80.703	29.689	927	1	2.007
2011	82.459	31.243	1.425	1	2.007
2012	84.294	32.778	1.892	2	2.007
2013	86.018	36.528	2.202	5	1.990
2014	89.193	37.827	4.888	15	1.990
2015	91.650	39.563	7.633	21	1.990
2016	96.925	41.275	10.124	24	1.990
2017	100.275	41.628	12.283	935	1.990
2018	104.139	40.523	14.390	1.798	1.990
2019	109.058	41.219	15.378	2.473	1.990

FONTE: Balanço Energético Nacional. 2020.

Conforme Relatório de Acompanhamento de Estudos e Projetos de Usinas Hidrelétricas - Situação de 05/04/201 - dos 2124 empreendimentos que se encontram aprovados ou em processo de aprovação, 260 são UHEs com potencial de 59,67 GW e 1.793 são CGHs e PCHs com potencial de 16,34 GW.

A Tabela 2 mostra o potencial hidrelétrico inventariado para os projetos hidrelétricos menores que 30 MW, classificados como pequenas centrais hidrelétricas (PCHs) e Centrais Geradoras Hidrelétricas (CGHs) por região geográfica. A região Centro-Oeste, onde está o Pantanal Matogrossense e seus rios formadores, é a que apresenta o maior potencial inventariado. Atualmente existem 667 projetos aprovados totalizando 9,206 GW (ANEEL, 2019b).

TABELA 2: Distribuição do potencial hidrelétrico inventariado de projetos hidrelétricos menores que 30 MW por região geográfica.

Região Geográfica	Potencial Inventariado	Participação
	Projetos menor que 30 MW (GW)	(%)
Centro-Oeste	5.344	32,7%
Sul	4.973	30,4%
Sudeste	4.187	25,6%
Norte	0.949	5,8%

Nordeste	0.888	5,4%
Total	16.341	100%

FONTE: EPE com base em ANEEL (2019).

Para o setor elétrico a operação das hidrelétricas acontece de forma cooperativa e complementar às grandes usinas, assumindo, principalmente no período úmido, parte da carga das usinas hidrelétricas e assim ajudando-as a recompor o estoque de seus reservatórios, para que ele possa ser utilizado em período de menor disponibilidade hídrica.

2.2. LEGISLAÇÃO SOBRE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA EM RECURSOS HÍDRICOS

A classificação de hidrelétricas em razão da potência instalada medida em MW como o critério de definição levou à criação de conceitos como pequenas hidrelétricas e grandes hidrelétricas. No entanto, não há um consenso mundial sobre estas definições a respeito desta escala de tamanho.

Os critérios adotados internamente pelos países, para classificação de pequena central hidrelétrica, divergem em sua maioria do referencial adotado pela Agência Internacional de Energia e Comissão Internacional de Barragens (IEA, 2019; WCD, 2000).

A definição de escala de pequena central hidrelétrica é diferente entre países e é feita por razões administrativas, políticas, econômicas e ambientais, apesar de que muitas vezes estas definições parecem não levar em conta os impactos ambientais (IPCC, 2011).

Para o *Special Report* do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC, 2011), os projetos hidrelétricos devem estabelecer indicadores mais realistas, para assim poderem ser avaliados os seus desempenhos sustentável ou econômico.

No Brasil somente em 1982 houve uma legislação que definiu o termo PCH: a portaria nº 109, do Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica (DNAEE), e em 2015 a Lei 13.097/2015 de 20/01/15 e a Resolução 673 da ANEEL definiram o que seriam considerados empreendimentos com características de PCH: Empreendimentos destinados à autoprodução ou produção independente de energia

elétrica, cuja potência seja superior a 3.000 kW e igual ou inferior a 30.000 kW e com área de reservatório de até 13 km². Excluindo a calha do leito regular do rio se o reservatório for de regularização, no mínimo, semanal ou cujo dimensionamento, comprovadamente foi baseado em outros objetivos que não o de geração de energia elétrica, onde a regularização de vazão será aferida por meio do volume útil e da vazão máxima turbinada.

As PCHs podem ser classificadas por capacidade de regulação do regime de fluxo (ELETROBRÁS, 2000):

- **Fio d'água:** as vazões de estiagem do rio são iguais ou maiores que a descarga necessária à potência a ser instalada para atender à demanda máxima prevista. As barragens são normalmente baixas, pois têm a função apenas de desviar a água para o circuito de adução e com áreas inundadas pequenas.
- **Acumulação, com regularização diária do reservatório:** as vazões de estiagem do rio são inferiores à necessária para fornecer a potência para suprir a demanda máxima do mercado consumidor e ocorrem com risco superior ao adotado no projeto. Nesse caso o reservatório fornecerá o adicional necessário de vazão regularizada.
- **Acumulação, com regularização mensal do reservatório:** as vazões médias mensais no seu dimensionamento energético, analisando as vazões de estiagem médias mensais. Pressupõe-se uma regularização mensal das vazões médias diárias, promovida pelo reservatório.

2.3. PEQUENAS CENTRAIS HIDRELÉTRICA – PCHs

Apesar do valor mais alto do MW/h gerado quando comparado às grandes usinas hidrelétricas, as PCHs são empreendimentos de concepção, execução e operação mais simples, que recebem diversos incentivos governamentais, tais como: maior facilidade na liberação de licenças ambientais; tarifas diferenciadas; custo de transmissão reduzido e linhas de financiamento subsidiadas.

Em 2001 o número de PCHs no Brasil era de 303, com uma capacidade instalada de 855 MW. Após a reestruturação do setor elétrico brasileiro, uma série de leis, decretos e resoluções foram desenvolvidos com o objetivo de regular o setor em favor das PCHs. Em 2010, o número de PCHs chegou a 387 hidrelétricas, com uma

capacidade instalada de 3.428 MW (FERREIRA et al., 2016). Registros de junho de 2021 apontam a existência de 542 PCHs, sendo 425 em operação com potência ortogada de 5.506 GW, representando 3,11% do total da matriz elétrica brasileira, atrás das usinas hidrelétricas com 58,56%, das usinas termelétricas com 24,4% e das centrais geradoras eolielétricas com 10,44% (ANEEL, 2021)

O aumento na construção de sistemas de geração de energia elétrica em menor escala e sua maior distribuição geográfica pode ser, em parte, um resultado da aversão aos impactos de grandes barragens (PREMALATHA et al., 2014). Políticas internacionais e nacionais foram estabelecidas com a intenção de fomentar o desenvolvimento de energias renováveis. As consequências da instalação de grandes barragens são mais conhecidas (COUTO, T. B. A.; OLDEN, J. D. 2018; HECHT et al., 2019; KIBLER, K. M.; TULLOS, D. D. . 2013), no entanto, investigações semelhantes de efeito de pequenas hidrelétricas ainda não são conclusivas.

Kibler & Tullos (2013), em estudo na bacia do rio Nu na China, que compararam hidrelétricas com barramentos inferiores e superiores a 50 MW, verificaram que por megawatt de energia gerada, os efeitos biofísicos cumulativos provocados por empreendimentos de menor porte podem ser superiores aos barramentos de maior porte, particularmente em relação à perda de hábitat e às mudanças hidrológicas.

Em estudo realizado na Suíça (LANGE et al., 2018), onde predominam PCHs com as casas de máquinas no barramento, foi constatado que o desvio lateral através do canal de adução cria fluxo residual entre o ponto de adução e o local onde água é devolvida. Normalmente, não há armazenamento substancial de água associado às PCHs, principalmente às hidrelétricas a fio d'água, portanto elas promovem um fornecimento contínuo de vazão e eletricidade. Os impactos mais óbvios das usinas hidrelétricas de desvio são geralmente observados em áreas residuais abaixo das represas, entre a entrada de água e o ponto onde a água é devolvida. (LANGE et al., 2018).

O efeito hidrológico calculado em uma amostra de barragens com desvio e outra sem desvio indica que a alteração hidrológica relacionada ao desvio pode ser significativa, mesmo quando os indicadores baseados em armazenamento sugerem que o potencial de impacto hidrológico é baixo (KIBLER, K. M., 2017).

O trecho dos rios com PCHs a fio d'água que possuem vazões residuais são geralmente localizadas em trechos de rios com encostas íngremes e como tal são caracterizadas por corredeiras e cachoeiras. Esses riachos de alto gradiente abrigam organismos com genótipos e fenótipos bem adaptados às condições de fluxo rápido (STELKENS et al., 2012; VALENZUELA-AGUAYO et al., 2020). A conversão desses ambientes em habitats lóticos para ambientes semi-lóticos de baixo fluxo pode alterar a seleção de indivíduos adaptados a esses fluxos e assim genótipos localmente adaptados podem ser perdidos do sistema. Tais perdas podem não apenas reduzir a diversidade genética local, mas também diminuir a capacidade das populações locais de se adaptarem às mudanças das condições ambientais (OLIVEIRA et al., 2017), e facilitar a invasão de outras populações. Efeito observado em vários estudos multiespecíficos, em que especialistas nativos foram substituídos por generalistas (LANGE et al., 2018; MARVIER. M.; KAREIVA, P.; NEUBERT, M. G. , 2004).

2.4.SISTEMAS EM CASCATA

A revisão da literatura mostrou que, na escala de um único reservatório, muitos dados e conhecimentos já estão disponíveis para cobrir os efeitos de grandes reservatórios, em contraste com pequenos reservatórios (LIGON, F. K.; DIETRICH, W. E.; TRUSH, W. J., 1995; WARD, J. V.; STANFORD, J. A., 1995; MCCULLY, P. et al., 1996; KONDOLF, G. M., 1997; BRANDT, S., 2000; NILSSON, C. et al., 2005; GRAF, W. L., 2006; POFF, N. L. et al., 2007).

O sistema em cascata é caracterizado pela sequência de reservatórios em um mesmo curso de água ou bacia hidrográfica, independentemente do tamanho dos reservatórios, sua funcionalidade ou enquadramento do curso de água. Associados aos reservatórios, podem estar presentes sistemas consuntivos e não consuntivos, como: sistemas de adução de água para consumo humano ou animal, irrigação, produção de peixes e produção de energia elétrica.

Sob o ponto de vista da qualidade da água, reservatórios em cascata caracterizam-se pelo fato de que alguns eventos em um reservatório a montante podem ser transferidos para outro situado a jusante. Esse grau de influência que um reservatório possui sobre o próximo a jusante depende das características da bacia hidrográfica na qual os reservatórios estão inseridos, dos níveis tróficos dos

reservatórios e de suas características construtivas e de operação, além da distância longitudinal entre eles. Reservatórios localizados em rios de maior ordem e/ou classificação têm tempo de retenção maior e os efeitos tendem a ser maiores a jusante no rio (TUNDISI, J. G; TUNDISI, 2008; WANG et al., 2018). Em rios oligotróficos, quando se tem reservatórios em cascata, pode-se esperar menores valores de produtividade primária fitoplanctônica nos reservatórios à jusante devido ao decréscimo de nutrientes e aumento da transparência da água.

Reservatórios em cascata atuam como agentes efetivos de distúrbios, alterando dessa forma o contínuo do rio (WARD, J. V.; STANFORD, J. A., 1995; WARD, 1983). Essa descontinuidade serial também interfere sucessivamente na distribuição e na reprodução de organismos, nos ciclos biogeoquímicos e na circulação horizontal, produzindo novos padrões hidrodinâmicos, químicos e biológicos nos reservatórios a jusante (COOPER, M. M.; ZAMPATTI, B. P., 2018; SANTOS, C.; SOUZA, C., 2015).

Para Walker, K. F.; Thoms, M. C. (1993), existe demanda para caracterizar os fatores de influência e os processos físicos e químicas da água em arranjos em cascata, avaliando efeitos cumulativos, considerando-os a partir de uma abordagem de variação de fluxo / estoque.

A hidrologia e a hidrogeologia atualmente parecem ser as áreas mais adequadas para cobertura de lacunas de conhecimento das alterações provocadas por sistemas em cascata de reservatórios, principalmente por meio de modelagem. No entanto, o tipo de modelagem a ser implementado ainda não está consolidado, dependendo das necessidades identificadas na avaliação do efeito dos reservatórios em outras variáveis do sistema: transferência de sedimentos, características físico-químicas e ecologia (CARLUER et al, 2016).

Essa necessidade de análise aprofundada dos impactos acumulados de um conjunto de PCHs é corroborada pela observação dos resultados apresentados por Mantel et al. (2010), ao concluírem que as alterações das características físico-químicas das águas dos rios estão mais correlacionadas com a quantidade de pequenas barragens do que com o volume dos reservatórios. O número de pequenas barragens instaladas para a construção de várias PCHs em uma mesma bacia hidrográfica, de forma cumulativa, pode causar danos comparáveis aos dos empreendimentos de grande porte e ter maior potencial para causar impactos ambientais do que grandes

reservatórios de usinas hidrelétricas, que são distribuídos de forma mais espaçada dentro da paisagem (MANTEL, S. K.; HUGHES, D. A.; MULLER, N. W. J., 2010). Os problemas ambientais que seriam causados por pequenas hidrelétricas são tão numerosos quanto os associados a grandes hidrelétricas e parecem não menos graves, por quilowatt gerado, do que aqueles da energia hidrelétrica centralizada (PREMALATHA et al., 2014).

Se estes impactos não forem evitados, a história de degradação ambiental causada pelas grandes usinas hidrelétricas pode se repetir com as PCHs.

2.5.CONTEXTO REGIONAL

Apesar do grande número de hidrelétricas em operação ou em construção na região de interface do Planalto com a Planície, pouco se sabe sobre os efeitos destes empreendimentos nas alterações da qualidade e da quantidade das águas que chegam ao Pantanal Matogrossense, principalmente aquelas provocadas por reservatórios de pequena regularização (GIRARD, 2002; FANTIN-CRUZ et al., 2016; SILVA et al., 2019).

A Região Hidrográfica do Paraguai (RH-Paraguai), que inclui os estados de Mato Grosso e Mato Grosso do Sul, é profícua de aproveitamentos hidrelétricos. O potencial hidrelétrico é explorado por meio de 07 usinas hidrelétricas, 29 Pequenas Centrais Hidrelétricas e 11 Centrais Geradoras Hidrelétricas, que se encontram em operação. Há também 11 empreendimentos em estágio de construção (não iniciada ou com outorga), sendo 01 UHE e 10 PCHs (ANEEL, 2019b).

O Estado de Mato Grosso possui um total de 159 empreendimentos hidrelétricos em operação com potência instalada total de 2.990 MW.

A base de dados da ANEEL indica o potencial de produção de novos 1.172 MW de energia hidrelétrica na RH-Paraguai, o que corresponde a dobrar a capacidade atual instalada na região que atualmente é de 1.111 MW. Conforme dados do Plano Nacional de Energia 2030 (MME/EPE, 2019), o potencial remanescente estimado para a região é de 2.000 MW, sem incluir os aproveitamentos em fase de inventário hidrelétrico.

Outros rios da RH-Paraguai como o São Lourenço, que é um dos principais afluentes do Pantanal Norte na parte alta da bacia, estão em operação em nove

empreendimentos hidrelétricos: PCHs Pequi, Sucupira, Cambará, Embaúba, Rio Tenente Amaral, Sete Quedas Altas, São Lourenço Água Prata e Água Brava. Nesta bacia está em fase de instalação a PCHs Água Branca e seis estão em fase de estudos de viabilidade: PCHs Água Clara, Beleza, Mangaba, Europa, Buriti e Jaciara e outras duas obtiveram Licença Prévia, mas ainda não se instalaram. Todos os empreendimentos estão em afluentes à margem direita do rio São Lourenço, com exceção da PCH São Lourenço, que está no próprio rio São Lourenço (FANTIN DA CRUZ, 2018; MME/ANA, 2019). Essas hidrelétricas não farão parte do escopo deste estudo, mas mostram como está sendo feito o aproveitamento em forma de cascata nos rios da região.

Os empreendimentos aqui estudados se encontram ao longo do ribeirão Ponte de Pedra, localizados em sua margem esquerda do rio Vermelho, que é um dos principais afluentes do rio São Lourenço e um importante contribuinte do Pantanal. No ribeirão Ponte de Pedra, estão instalados e em operação dois empreendimentos hidrelétricos: a PCH Engenheiro José Gelázio da Rocha (PCH_{JG}) e a PCH Rondonópolis (PCH_{Rond}). Está em estudo de viabilidade a PCH João Basso, cuja localização está à jusante da PCH Rondonópolis.

2.6.ECOSSISTEMAS AQUÁTICOS

2.6.1. Sistemas lênticos

Os sistemas lênticos não são elementos permanentes da Superfície terrestre, pois são fenômenos de curta durabilidade na escala geológica, ou seja, surgem e desaparecem no decorrer do tempo. O desaparecimento de um lago pode estar ligado a vários fenômenos, como o seu próprio metabolismo (acúmulo de matéria orgânica no sedimento e deposição de sedimentos transportados por afluentes) ou devido a razões complexas, que vão desde efeitos climatológicos ao manejo problemático de recursos aquíferos devido à atividade humana.

2.6.2. Sistemas intermediários

Esses ecossistemas apresentam um regime hidrodinâmico intermediário entre os sistemas lóticos (rios) e o lênticos (lagos) e geralmente possuem elevada razão volume/Superfície. São componentes diferenciados na paisagem e representam uma

inserção nova no ponto de vista de ecossistema aquático, promovendo consideráveis alterações no regime hidrológico e na dinâmica ecológica de rios e bacias hidrográficas.

A velocidade do rio diminui à medida que se aproxima da parede da barragem e o reservatório criado se torna um sistema lacustre. A ação de acumular e encobrir reflete uma mudança física fundamental no contínuo do rio. O represamento provoca mudanças químicas dentro do reservatório, que alteram a qualidade física e química da água, levando a impactos ecológicos nos rios à jusante e áreas úmidas associadas (SCOTT WINTON, R.; CALAMITA, E.; WEHRLI, B., 2019).

Os sistemas intermediários fazem parte de três subsistemas ecológicos fundamentais: a bacia hidrográfica e sua rede hídrica, o reservatório propriamente dito e o sistema a jusante. Esses subsistemas operam em conjunto e os reservatórios dependem da interação desses subsistemas. Reservatórios como sistemas complexos constituem uma rede de componentes estruturais, de funcionamento de organismos e de seu ambiente físico-químico (TUNDISI, J. G.; TUNDISI, 2008)

2.6.3. Sistemas lóticos

Sistema ou ecossistemas lóticos são ambientes aquáticos de água corrente, como os rios, nascentes, ribeiras e riachos, onde a complexa interação da biota com o ambiente físico e químico é influenciada pela velocidade da correnteza, que envolve a dinâmica de transporte de energia e ciclagem de materiais. A velocidade da correnteza e a deposição de material variam de acordo com o trecho de cada rio (TUNDISI, J. G.; TUNDISI, T. M. T. M., 2008)

Os rios podem ser considerados sistemas abertos, com estrutura tridimensional (longitudinal, lateral e vertical), caracterizados pelos processos hidrológicos e geomorfológicos altamente dinâmicos frente às mudanças climáticas (PETTS, 2000). Longitudinalmente os sistemas fluviais se estendem de uma rede de pequenos riachos até um único rio de várzea maior, que termina em um estuário ou um delta. Lateralmente, os sistemas fluviais compreendem não apenas os canais, mas também as zonas ribeirinhas e de várzea adjacentes, que estão conectadas ao canal durante altos fluxos (JUNK, 1989). Verticalmente, eles incluem os aquíferos aluviais, com os quais as águas superficiais interagem (WARD, J. V.; STANFORD, J. A., 1995).

Além das três dimensões mencionadas, os sistemas lóticos também possuem dimensões temporal e conceitual. A dimensão temporal pondera que a morfologia do canal e as comunidades aquáticas podem se alterar naturalmente ao longo do tempo ou em decorrência de mudanças abruptas de origem antrópica (represamento e lançamento de efluentes). A dimensão conceitual leva em consideração as questões filosóficas, políticas e práticas; como avaliar o que conservar e quais as prioridades que devem ser focadas na conservação.

Diversas teorias ecológicas aplicadas ao entendimento da estrutura e funcionamento dos sistemas lóticos vêm sendo utilizadas em pesquisas voltadas ao estudo da qualidade de água em bacias hidrográficas, entre elas estão:

- **Conceito do rio contínuo ou contínuo fluvial (River Continuum Concept - RCC).**

Segundo Vannote et al (1980), os sistemas lóticos possuem um gradiente de variáveis ecológicas da nascente à foz, ocorrendo mudanças ao longo do rio na sua largura, volume de água, profundidade, temperatura, quantidade e tipo de material suspenso transportado.

De acordo com esta teoria, a importância da matéria orgânica que entra nas cabeceiras deve diminuir conforme o rio vai aumentando, sofrendo mudanças graduais e passando de características heterotróficas para autotróficas. Este modelo prevê que a matéria orgânica que entra nos trechos de cabeceira e que não é processada no local, deve ser carregada rio abaixo e totalmente utilizada pelas comunidades ao longo do rio, fazendo com que todo o sistema permaneça em equilíbrio.

- **Conceito da Descontinuidade Serial (Serial Discontinuity Concept - SDC).**

Descrita por Ward, J. V (1983), esta teoria considera as alterações no contínuo fluvial provocadas por fatores naturais ou antrópicos. Para eles, os represamentos, alagamentos, charcos, queda d'água (cachoeira) ou fontes de poluição, como entrada de esgoto, rompem o gradiente proposto pela Conceito do Rio Contínuo (RCC) em relação às condições ambientais, produzindo mudanças longitudinais e determinando novos comportamentos em trechos específicos dos rios, originando novos gradientes.

A teoria da descontinuidade serial pode ser aplicada a bacias hidrográficas impactadas, já que uma interferência no ambiente produz alterações longitudinais nos processos bióticos e abióticos, considerando que a direção de mudança (montante ou jusante) depende da posição do impacto. Outros fatores de grande importância são a construção de barragens, desvios, canalizações, etc., que interrompem o contínuo de um rio, alterando sua composição físico-química, modificando sua estrutura e o funcionamento do sistema, resultando na perda de heterogeneidade espacial e temporal do curso d'água.

De acordo com a SDC, as barragens resultam em mudanças a montante e a jusante nos padrões e processos bióticos e abióticos; a direção e a extensão do deslocamento dependem da variável de interesse e são uma função da posição da barragem ao longo do rio contínuo.

2.7.DADOS DE QUALIDADE DE ÁGUA DE ALTA FREQUÊNCIA

A proliferação de sensores confiáveis e baratos para monitorar várias variáveis da qualidade da água, como o oxigênio dissolvido e o dióxido de carbono está sustentando uma revolução na compreensão da dinâmica de energia do ecossistema dos rios. Sensores ambientais mais robustos e menos dispendiosos estão permitindo que os cientistas de ambientes lóticos consigam superar desafios de medir a variação de várias variáveis, com frequência de segundos, podendo assim estimar com maior precisão o metabolismo de rios e riachos. Questões fundamentais sobre os ecossistemas fluviais, como “O que controla a variação na magnitude e no tempo da produtividade dentro e entre os rios?”, “Como esses controles estão mudando em resposta às mudanças climáticas ou de uso da terra?”, “Como as mudanças resultantes na produtividade do ecossistema fluvial restringirão sua capacidade de apoiar a biodiversidade de água doce, a produção de alimentos e a manutenção da qualidade da água?” (BERNHARDT et al., 2018) começaram a ser respondidas com maior segurança.

Dados confiáveis que registram variações de curta duração e de situações extremas são importantes para o desenvolvimento de modelos, e esses são essenciais para entender melhor como os ecossistemas fluviais estão sendo alterados devido ao aumento da temperatura global (HAGEMANN et al., 2013); mudança no uso da terra

(DING et al., 2016) e regulação do fluxo (POFF, N. L.; ZIMMERMAN, J. K. H., 2010).

Para aprofundar o entendimento dos processos que ligam a hidrologia das bacias hidrográficas e hidroquímica, as frequências de medição devem basear-se na escala de tempo de resposta hidrológica da bacia, que muitas vezes é da ordem de minutos ou horas (BHURTUN et al., 2019).

A disponibilidade de dados nessas resoluções temporais permitirão o estudo de múltiplos solutos em intervalos subconjuntos, não apenas séries temporais de solutos. Permitirão interpretações e testes de hipóteses de ideias em torno da biogeoquímica, biologia e ecologia de rios, além de sinais de captação (PORTER et al., 2009; RODE et al., 2016; WADE et al., 2012). Podem revelar dinâmicas temporais complexas, não detectadas com frequências de amostragem tradicionais, permitindo novas ideias sobre o funcionamento interno das bacias hidrográficas e córregos (RODE et al., 2016; WADE et al., 2012).

Pesquisas recentes têm demonstrado os benefícios dos dados de alta frequência para diversas situações, tais como para melhor resolver a dinâmica de eventos de tempestade, para quantificar variabilidade temporal de fluxo, para aumentar a precisão das estimativas de carga e retenção de nutrientes, para melhorar a compreensão das interações de água subterrâneas de superfície na zona hiporeica e para melhor entender parâmetros dos modelos hidrológicos e hidroquímicos (BOWES, SMITH. NEAL, 2009; YANG, G; MOYER. D. L., 2020)

Com a disponibilidade tecnológica de sensores de medição de alta-frequência compatíveis com a dinâmica hidrológica, que permitem medir os processos do ecossistema nas escalas de tempo e espaço que correspondem aos fatores físicos, químicos e biológicos relevantes (KIRCHNER et al., 2012), houve um progresso significativo na estimativa do tempo de permanência de solutos em bacias hidrográficas. Há uma visão convergente que destaca a importância das novas tecnologias de sensores nas bacias hidrográficas e nas ciências dos rios.

As implicações para a energia do ecossistema fluvial são difíceis de prever, em parte, porque os impactos diretos desses fatores nas taxas metabólicas dos rios podem ser antagônicos e porque esses impactos diretos podem ser mitigados ou reforçados pela resposta de vegetação ribeirinha às mudanças climáticas.

Faltam métodos estatísticos para estimar tendências usando dados de alta frequência (YANG, G.; MOYER, D. L., 2020). Assim que as medições do metabolismo dos rios se tornarem mais precisas em resolução temporal e longevidade aos registros hidrológicos, pode-se prever interações fortes e sinérgicas entre o fluxo e os regimes metabólicos, restringindo a biodiversidade e a estrutura da cadeia alimentar (BERNHARDT et al., 2018).

2.8.VARIÁVEIS DA QUALIDADE DE ÁGUA

O estudo de variáveis físico-químicas da água é de grande relevância para entender o ambiente e identificar as variações das condições ambientais. Elas podem acontecer nos rios e reservatórios, assim como na bacia hidrográfica às quais pertencem e podem afetar, ainda, as suas características limnológicas.

No estudo em questão, para a escolha das variáveis físico-químicas da água, foi considerada a importância ecológica das variáveis na caracterização da saúde do rio, a confiabilidade das medidas das sondas de alta frequência, a robustez do equipamento e facilidade de manutenção, e as características dos rios na proposta de estudo do projeto REMMAP (Rede de monitoramento ambiental multifuncional do sistema Planalto-Pantanal).

Na sequência, são abordadas as variáveis físico-químicas da água avaliadas neste estudo, lembrando que essas análises não são exaustivas para dar uma resposta completa sobre possíveis alterações provocadas por ações antrópicas.

2.8.1. Temperatura da água

A temperatura da água é resultado da radiação solar incidente sobre a água, da latitude, altitude, do ciclo circadiano, da circulação do ar, nebulosidade, velocidade da correnteza e profundidade do corpo hídrico (CHAMPMAN, D.; KIMSTACH. V., 1996).

A temperatura do rio depende de muitos fatores, que geralmente podem ser classificados em quatro grupos: (i) condições atmosféricas; (ii) topografia; (iii) descarga de fluxo; e (iv) leito fluvial (CAISSIE, 2006). As condições atmosféricas estão entre os fatores mais importantes e são os principais responsáveis pelos processos de troca de calor que ocorrem na superfície da água.

Como as propriedades físicas, químicas e biológicas variam com a temperatura, e a obtenção dessa medida é relativamente fácil e com resultados confiáveis, esse parâmetro foi escolhido como o mais preciso neste estudo.

Mudanças na temperatura do corpo hídrico podem alterar a velocidade das reações químicas (aumenta com a elevação da temperatura), a solubilidade de gases na água (diminui com a elevação da temperatura), o metabolismo e a taxa de crescimento dos organismos aquáticos (acelera ou se eleva com a elevação da temperatura) (CHAMPMAN, D.; KIMSTACH, V., 1996).

Corpos hídricos com baixa temperatura têm maior capacidade de reter o oxigênio dissolvido do que os com alta temperatura.

A temperatura exerce grande influência nas atividades biológicas e no crescimento dos organismos aquático. Também determina os tipos de organismos que habitam o local, uma vez que estes têm uma faixa preferida de temperatura para se desenvolverem. Se este limite for ultrapassado, tanto para mais quanto para menos, os organismos são impactados e as espécies mais sensíveis podem até mesmo ser extintas do local.

Conforme a RCC (River Continuum Concept), as temperaturas na maioria dos rios variam em escalas de tempo diárias e sazonais e são determinantes para a distribuição de espécies aquáticas (VANNOTE et al., 1980). Além disso, observa-se que essas flutuações térmicas podem influenciar fortemente na produtividade dos rios.

A temperatura é o parâmetro mais relacionado com mudanças climatológicas, porque possui um sazonalidade diária e uma estabilidade que facilitam a identificação de *outliers* ou medidas discrepantes.

2.8.2. Potencial Hidrogeniônico (pH)

O pH é uma medida que determina se a água é ácida ou alcalina, variando de 0 a 14. A partir dos seus valores, indica quando uma solução aquosa é ácida ($\text{pH} < 7$), neutra ($\text{pH} = 7$) ou alcalina ($\text{pH} > 7$). Os corpos hídricos encontrados na natureza, em sua maioria, possuem valores de pH na faixa de 4 a 9, sendo a maioria ligeiramente básicas (ANA, 2014).

A influência direta do pH nos ecossistemas aquáticos é exercida por seus efeitos sobre a fisiologia de diversas espécies. O pH influencia de maneira direta os

processos bioquímicos, especialmente as trocas iônicas com o meio extracelular; desta forma, processos de absorção e excreção de substâncias orgânicas e iônicas são diretamente afetados. O pH também exerce influência direta na fisiologia das espécies aquáticas (CETESB, 2012).

Valores de pH variam com o clima, com a geologia e vegetação do local e representam um balanço entre o dióxido de carbono, os íons carbonato e bicarbonato, além de outras substâncias naturais, como ácidos húmicos e fúlvicos (CHAMPMAN, D.; KIMSTACH, V., 1996). A alteração do pH das águas pode também decorrer da elevada atividade fotossintética, o aumento da produtividade primária do ecossistema em condições eutróficas tendem a aumentar a produção de biomassa. Com a densidade elevada, o processo de fotossíntese é intensificado, aumentando a demanda por CO₂ da água. O CO₂ é a principal fonte natural de acidez da água, através da formação do ácido carbônico. Desta forma, com o consumo elevado do CO₂, poderá haver elevação do pH da água (CETESB, 2012).

Pela importância do pH como parâmetro de qualidade da água, em que uma pequena variação pode ser limitante para processos ou acelerar outros, e pela robustez e confiabilidade das sondas disponíveis no mercado, o pH também foi escolhido para ser monitorado em alta frequência.

2.8.3. Oxigênio Dissolvido

O oxigênio é, entre os gases dissolvidos na água, um dos mais importantes na avaliação da dinâmica do ecossistema e para sua caracterização (ESTEVEZ, 1998). O oxigênio dissolvido (OD) afeta vários processos no ambiente aquático, bem como sua concentração é influenciada por outras variáveis, como temperatura, salinidade, turbulência da água, produção primária e pressão atmosférica (CHAMPMAN, D.; KIMSTACH, V., 1996).

O oxigênio é introduzido na água basicamente por duas maneiras: pela fotossíntese e pela atmosfera. O primeiro é regido pela dinâmica da comunidade de produtores primários, que, na presença da luz do sol, água e dióxido de carbono, libera oxigênio para a água, enquanto produz reserva orgânica pelo processo de fotossíntese. Já o oxigênio, presente na atmosfera, dissolve-se na água através da diferença de

pressão parcial, processo regido pela Lei de Henry, em que a concentração da saturação do gás é definida em função da temperatura (ESTEVES, 1998).

Concentrações adequadas de oxigênio dissolvido são essenciais para a manutenção da vida aquática.

A difusão de oxigênio dentro de um corpo hídrico dá-se principalmente pelo seu transporte, uma vez que a difusão molecular é insignificante. O padrão de distribuição de oxigênio em ecossistemas aquáticos geralmente é o inverso ao do gás carbônico.

2.8.4. Condutividade elétrica

A condutividade elétrica, representada por σ , é a medida da facilidade com a qual a água permite a passagem de uma corrente elétrica, sendo medida em micro Siemens por centímetro ($\mu\text{S cm}^{-1}$) e para um determinado corpo hídrico, está relacionada às concentrações de sólidos totais dissolvidos e íons principais. A condutividade da maioria das águas doces varia de 10 a 1.000 $\mu\text{S cm}^{-1}$.

A medição da condutividade de um líquido é uma maneira indireta e simples de inferir a presença de íons provenientes de substâncias polares, geralmente sais inorgânicos dissolvidos na água, como cloretos, sulfetos, carbonatos e fosfatos. O grau de dissociação iônica, a quantidade de carga elétrica em cada íon, a mobilidade iônica e a temperatura da solução, todos influenciam a condutividade (CHAMPMAN, D.; KIMSTACH, V., 1996).

De acordo com Esteves (1998), a condutividade elétrica é uma variável de grande relevância em estudos de limnologia, uma vez que pode fornecer informações importantes sobre o metabolismo do ecossistema aquático, bem como sobre sua bacia de drenagem.

A quantidade de chuva pode afetar a condutividade, devido à dissolução de partículas suspensas no ar e os gases, que tendem a aumentar essa condutividade. A chuva pode diluir o número de portadores de carga na água, reduzindo a condutividade ou, ainda, carrear nutrientes do solo, podendo causar um aumento na condutividade.

2.8.5. Nitrogênio

O nitrogênio é um dos elementos mais importantes no metabolismo de ecossistemas aquáticos, em especial pela sua participação na formação de proteínas. Assim como o fósforo, esse elemento pode atuar como fator limitante à produtividade do ecossistema (ESTEVES, 1998).

As principais fontes naturais de nitrogênio são: a chuva, o material orgânico e inorgânico de origem externa e a fixação biológica por bactérias e algas cianofíceas.

Plantas e microrganismos convertem nitrogênio inorgânico em formas orgânicas. O nitrogênio inorgânico ocorre no ambiente natural em uma faixa de estados de oxidação, como o nitrato (NO_3^-) e o nitrito (NO_2^-), o íon amônio (NH_4^+) e o nitrogênio molecular (N_2). Ele sofre transformações biológicas e não biológicas no meio ambiente como parte do ciclo do nitrogênio.

A amônia ocorre naturalmente em corpos de água oriundos da decomposição de matéria orgânica e inorgânica nitrogenada no solo e na água, excreção pela biota, redução do gás nitrogênio na água por microrganismos e das trocas gasosas com a atmosfera (CHAMPMAN, D.; KIMSTACH, V., 1996).

O nitrogênio amoniacal corresponde ao nitrogênio proveniente de um composto derivado do amoníaco.

O nitrogênio total representa a soma das concentrações de nitrato, nitrito, amônio e nitrogênio orgânico (ANA, 2014).

O nitrato ocorre geralmente em quantidades muito pequenas no ambiente; o nitrogênio, sob a forma de amônia, é transformado em nitrito e, posteriormente, em nitrato pelo processo de nitrificação. A presença de nitrogênio na forma de nitrato é indicador da poluição relacionada ao final do processo de nitrificação e pode caracterizar a presença de efluentes de esgotos sanitários nos corpos hídricos.

Devido à facilidade e confiabilidade dos sensores de nitrato (NO_3^-), essa foi a forma escolhida de monitoramento de nitrogênio no ribeirão Ponte de Pedra.

2.8.6. Carbono - Demanda Química de Oxigênio (DQO)

Dentre todos os elementos químicos, o ciclo do carbono é aquele que se destaca pela sua complexidade e abrangência, englobando todos os aspectos da Limnologia, desde a produção primária às cadeias alimentares e à sucessão biológica.

A Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) é uma medida aproximada da quantidade de matéria orgânica bioquimicamente degradável presente em uma amostra de água. É definida pela quantidade de oxigênio necessária para os microrganismos aeróbios presentes na amostra oxidarem a matéria orgânica para uma forma inorgânica estável. A Demanda Química de Oxigênio (DQO) é uma medida do equivalente de oxigênio da matéria orgânica em uma amostra de água, que é suscetível à oxidação por um forte oxidante químico, como o dicromato. As medidas de DBO são geralmente inferiores às medidas de DQO. De acordo com ANA (2009), o método analítico para COD (concentração de oxigênio dissolvido na água) é inespecífico, pois não identifica o material oxidável nem diferencia entre o material orgânico e inorgânico presente. Do mesmo modo, não indica o carbono orgânico total presente, uma vez que alguns compostos orgânicos não são oxidados pelo método do dicromato, ao passo que alguns compostos inorgânicos são oxidados. No entanto, a DQO é uma variável útil e de rápida mensuração para muitos resíduos industriais e está em uso há várias décadas, por isso, foi escolhida para ser monitorada em alta frequência.

As concentrações de DQO observadas em águas superficiais variam de 20 mg O₂/litro ou menos em águas não poluídas a mais de 200 mg O₂/litro em águas que recebem efluentes (CHAMPMAN, D.; KIMSTACH, V., 1996).

Este método analítico mede a quantidade de oxidante consumido durante a degradação da matéria orgânica. Assim, quanto maior o consumo do oxidante, maiores serão os níveis de matéria orgânica no ambiente. Os principais métodos para se medir a DQO são os de refluxo aberto, refluxo fechado tintimétrico e refluxo fechado colorimétrico. A medida de DQO geralmente é utilizada como indicador do grau de poluição de um corpo de água por água residuária.

2.8.7. Turbidez

A turbidez é uma característica física da água decorrente da presença de substâncias em suspensão na coluna d'água, ou seja é uma expressão da propriedade óptica que faz com que a luz seja espalhada ou absorvida e não transmitida em linha reta através da amostra. A turbidez da água é a medida de sua capacidade em dispersar a radiação, expressa quantitativamente em termos de coeficiente de dispersão, como a turbidez nefelométrica. Os principais responsáveis pela turbidez da água são as

partículas suspensas (biogênicas e abiogênicas) e, em menor proporção, os compostos dissolvidos. As partículas de origem biogênica são as bactérias e o plâncton, e abiogênicas são os detritos (ESTEVES, 1998). Os principais contribuintes da turbidez abiogênica relacionam-se à erosão (argila, silte, matéria inorgânica finamente dividida), tanto em margens dos rios quanto em lavouras e estradas. Em especial, durante períodos de pluviosidade intensa, há contribuição maior destas fontes, principalmente em regiões onde o uso do solo é inadequado. Isso também acontece em atividades de mineração. Assim, com o lançamento de esgotos domésticos e efluentes industriais, esse processo contribui para o aumento da turbidez das águas naturais (ANA, 2009).

2.9. RESERVATÓRIOS ARTIFICIAIS NO BRASIL

A Agência Nacional de Águas (ANA) define as regras de operação dos reservatórios no Brasil e monitora, por meio do acompanhamento do nível da água, as vazões diárias de afluentes (o volume de água que entra por dia no reservatório) e defluentes (o volume de água que sai).

O Brasil possui mais de 21 mil reservatórios, dos mais diversos usos e multiusos, distribuídos em 1261 cursos d'água, conforme Sistema Nacional de Segurança de Barragens (ANA, 2020). Destes, 7451 são empreendimentos energéticos em operação.

A Agência Nacional de Águas criou em 2013 o Sistema de Acompanhamento de Reservatórios – SAR, com o propósito de gerar um sistema operacional para gerenciar os dados operativos dos reservatórios do Brasil. Dados de qualidade de água dos diversos multiusos em reservatórios, que não são para geração de eletricidade, não estão disponíveis ou simplesmente não existem.

2.10. QUALIDADE DA ÁGUA

Existem várias definições para Qualidade da Água e, em todas, observam-se critérios abióticos (físico-químicos) e bióticos (biológicos) em relação à sua utilização. Esses critérios de qualidade da água especificam concentrações e/ou limites de algumas variáveis que interferem na conservação do ecossistema aquático e na

proteção da saúde humana. Assim sendo, pode-se definir qualidade da água como um conjunto de características de natureza física, química e biológica que assegura determinado uso ou conjunto de usos, devendo estar dentro de certos limites ou padrões previstos na legislação vigente, para que possam ser viabilizados (DERÍSIO, 2016)

A qualidade da água não é um termo que se aplica ou se restringe somente à determinação do grau de pureza do recurso hídrico, mas às características desejadas para que seus mais diversos usos sejam atendidos (MERTEN, G. H.; MINELLA, J. P., 2002).

A saúde de um rio está diretamente associada à saúde da bacia hidrográfica circundante. A qualidade da água em um rio se deteriorará se a condição da bacia piorar (JI, 2008)

2.10.1. Fatores de influência na qualidade da água

A agricultura é o principal consumidor de água no Brasil. O elevado consumo de água na irrigação influencia na disponibilidade para outros setores e para a própria irrigação (ANA, 2020).

A relação entre a ocupação agropecuária das terras e as características físicas da bacia hidrográfica (solos e relevos) também requer atenção. Verifica-se a ocorrência frequente de ocupação antrópica em terras inaptas à atividade agrícola (OLIVEIRA, 2016b). Dada a extensão das terras ocupadas inadequadamente, os impactos sobre os recursos hídricos são diretos. Entre os problemas causados pelo uso de terras inaptas, observa-se a erosão hídrica, que contribui para a perda de solo e para o carreamento de sedimentos, afetando, assim, a rede de drenagem.

Um dos principais processos que comprometem os usos da água é a eutrofização. As causas da eutrofização estão geralmente relacionadas às características da bacia de contribuição e seus efeitos são complexos.

Entre os problemas socioeconômicos pode-se citar o aumento do custo do tratamento de água com a instalação de sistemas mais elaborados, aumento dos custos de monitoramento, depreciação do valor de áreas com rios ou lagos eutrofizados.

O setor de geração de energia elétrica, navegação, pesca, turismo e lazer são usuários não consultivos, ou seja, não consomem água, no entanto impactam na sua qualidade e em muitos casos em sua hidrologia.

A construção e operação de reservatórios pode afetar de diversas maneiras o curso d'água, especificamente as alterações provocadas em rios com reservatórios de hidrelétricas será discutido nesse trabalho nas seções 2.11 a 2.13.

2.11. EFEITOS DA CONSTRUÇÃO DE RESERVATÓRIOS

Segundo a WCD, os impactos no ecossistema devido a construção de um empreendimento hidroelétrico podem ser classificados como de 1ª, 2ª e 3ª ordens. Os impactos de 1ª ordem são aqueles que trazem consequências físicas, químicas e geomorfológicas e altera a distribuição natural e o tempo de vazão. Os de 2ª ordem envolvem mudanças na produtividade biológica primária dos ecossistemas e os de 3ª ordem envolvem alterações na fauna causadas por um efeito de 1ª ou 2ª ordem.

Como os impactos do ecossistema são muitos e complexos, é difícil dar uma previsão precisa e detalhada das mudanças que provavelmente resultarão da construção de uma barragem ou de uma série de barragens.

É consenso que o principal impacto que se produz à jusante do reservatório é a alteração do regime hidrológico de vazões. Esse efeito cresce com a capacidade de regularização do reservatório e com a existência de vazão reduzida ou outras formas de derivação sem retorno, para o trecho imediatamente situado na sequência do eixo da barragem.

Alguns impactos da implantação de uma barragem são devidos diretamente à fragmentação do curso de água, outros à mudança do regime de pulsos (SYSTEMS, 2005).

Na região à jusante, principalmente de grandes reservatórios, geralmente podem ser observadas inúmeras consequências com implicações ecológicas. As mais importantes são decorrentes de dois fenômenos principais; a alteração no regime hidrológico e as alterações na qualidade física e química da água.

2.12. ALTERAÇÕES NA HIDROLOGIA DE RIOS COM RESERVATÓRIOS

A construção e operação de reservatório pode afetar de diversas maneiras o curso d'água a jusante, e suas consequências podem ser observadas logo após o fechamento da represa, como também muitos anos após.

Os organismos aquáticos e terrestres sofrem consequências imediatas das alterações do regime hidrológico.

Com ausência de períodos sazonais de cheia e seca, muitas espécies vegetais e animais têm seu ciclo de crescimento e reprodutivo fortemente alterado, o que leva muitas populações a forte redução ou mesmo extinção. Este fenômeno é observado especialmente nas espécies com ciclo de vida curto.

O controle do volume de água do reservatório para estabilizar o fornecimento de energia elétrica tende a eliminar totalmente a inundação periódica das várzeas a jusante ou torná-la aperiódica.

Como exemplo de consequências a longo prazo podem ser citadas as modificações na composição (desaparecimento de algumas e surgimento de outras espécies) da área de inundação, em decorrência, principalmente, da ausência de inundações periódicas e desprovidas de partículas ricas em nutrientes.

Falaremos aqui especificamente de algumas alterações que são provocadas em rios com reservatórios de hidrelétricas.

2.12.1. Fluxo base reduzido e aumento de intermitência.

Fluxo-base é um componente importante do regime hidrológico dos ecossistemas de água doce, pois define a área e a profundidade dos habitats aquáticos, condições físicas e químicas dentro desses habitats tendem a mudar rapidamente à medida que o fluxo declina (MALLEN-COOPER, M.; ZAMPATTI, B. P., 2018).

A intermitência relacionada aos esquemas de operação de energia hidrelétrica pode ser aumentada em rios a jusante de locais onde a água é extraída ou desviada e provocar mudanças ecológicas importantes, como o encalhe de peixes causado pela redução do fluxo (KELLY, B.; SMOKOROWSKI, K. E.; POWER, M., 2017).

2.12.2. Inundações reduzidas

Talvez um dos impactos mais difundidos da construção de barragens seja o armazenamento e a captação de águas de inundação, o que resulta em maior constância (variabilidade reduzida) do fluxo das escalas de tempo diárias para interanuais (ROLLS, R. J.. BOND, N. R., 2017).

KINGSFORD, JENKINS, PORTER, (2004) relataram que, devido às barragens, aos desvios e ao manejo de rios, houve uma redução das inundações de quatro zonas úmidas na Austrália, alterando sua ecologia e causando a morte ou debilitando a saúde da biota aquática.

2.12.3. Fluxo base aumentado

O armazenamento e o uso de água para a geração de energia elétrica da estação seca normalmente aumenta o fluxo da descarga a jusante das barragens durante a estação seca. Na UHE Manso, em um rio contribuinte do Pantanal, a usina aumenta a vazão na estação seca em cerca de 50%, resultando em níveis de água muito superiores aos registrados antes da regulação pela usina (ZEILHOFER, P.; DE MOURA, R. M., 2009).

O aumento da estabilidade do nível de água em áreas alagadas em sistemas fluviais regulados reduz a diversidade taxonômica e funcional de aves, plantas aquáticas e microfauna (KINGSFORD, R. T.; JENKINS, K. M.; PORTER, J. L., 2004). Fluxos baixos naturais desempenham um importante papel ecológico em todos os rios e têm papel fundamental no sistema planalto-planície no Pantanal.

2.12.4. Variabilidade a curto prazo (hidrofasagem)

Essa variação diária acontece principalmente em reservatórios de hidrelétricas com pequeno volume de armazenamento. O aumento da variabilidade do fluxo de curto prazo é devido aos picos hídricos, nos quais os fluxos são aumentados para coincidir com os períodos diários de maior demanda de eletricidade (GREIMEL et al., 2016; MEILE T, BOILLAT JL. S. A, 2011; SILVA et al., 2019), em que o custo da energia elétrica é maior.

A retenção do fluxo natural nas represas pode impedir a ocorrência de fenômenos hídricos ou apenas mudar a curto prazo a sua ocorrência. Além disso,

flutuações no fluxo e no nível da água podem levar a variações na qualidade da água e afetar a morfologia do leito do rio (HAUER et al., 2014; MOREIRA et al., 2019).

2.12.5. Magnitude e frequência de inundação reduzida

Alterações na magnitude e frequência dos eventos de inundação são efeitos amplamente relatados da regulação do fluxo e são os principais responsáveis pelos efeitos ecológicos dos regimes de fluxo alterados (ASSANI et al., 2006).

A redução da frequência de inundações e magnitude pela regulação do fluxo pode causar redução na abundância e riqueza de taxa de especialistas em fluxo ou aqueles que desovam durante eventos de inundação (GHOLIZADEH, M. H.; MELESSE, A. M.; REDDI, L. A., 2016).

A variabilidade de fluxo é importante para as comunidades de peixes, pois facilita a invasão de espécies não-nativas e oportunistas (BELMAR et al., 2018). Na zona ribeirinha, a redução da frequência de inundação aumenta a riqueza da vegetação terrestre, devido ao aumento da prevalência de espécies secas intolerantes às inundações (LYTLE, D. A.; POFF, N. L., 2004).

A regulação de fluxo produzido pela UHE Manso diminuiu ou alterou o pico de cheia do Rio Cuiabá, que é um dos dois principais afluentes do Pantanal Norte do Mato Grosso, responsável pela inundação pelo menos 20.000 km² da maior área alagável do mundo. Desde o início da operação regular reservatório, em 2002, a vazão no início da estação chuvosa (novembro-dezembro) foi reduzida em cerca de 20% (ZEILHOFER, P.; DE MOURA, R. M., 2016). Isso tem importantes implicações para as conexões da planície de inundação do rio e uma série de processos ecológicos (GIRARD, 2002; JUNK, 1989).

2.12.6. Área reduzida de inundação

O declínio da área inundada durante os eventos de inundação é uma consequência da magnitude e frequência reduzida da inundação imposta pela regulação do fluxo.

O tamanho da zona úmida da planície aluvial (extensão espacial ou área) é frequentemente reduzido devido à extração a montante da água para irrigação ou devido à alteração da morfologia do canal devido à descarga regulada constante

(GÓRSKI et al., 2013). Esta perda de habitat inundado tem impactos substanciais para organismos que dependem de zonas úmidas de várzea para nidificação, recrutamento ou alimentação.

2.13. ALTERAÇÕES NA QUALIDADE FÍSICO-QUÍMICA DA ÁGUA DE RIOS COM RESERVATÓRIOS

Um reservatório envolve numerosos processos que causam mudanças na qualidade físico-química da água. Dependendo do seu uso, pode ser tão importante focar na mudança no próprio reservatório, quanto nas consequências no rio a jusante quando as águas dessa represa retornam para o rio (CARLUER et al., 2016).

Estudos sobre a qualidade de água de reservatórios brasileiros vêm se intensificando nos últimos 20 anos com o aumento dos requerimentos ambientais para sua construção e monitoramento.

A criação de um represamento e a mudança do regime de lótico para lântico ou semilântico afetam as principais características físico-químicas do regime dos rios a jusante das barragens, podendo alterar o substrato de corrente, oxigênio dissolvido e temperatura da água (WANG et al., 2018; WARD, J. V.; STANFORD, J. A., 1995).

As barragens afetam o substrato, atuando como um sumidouro de sedimentos finos. Já a presença de reservatórios pode ser considerada como um sistema de depuração da qualidade da água (WIEJACZKA et al., 2018).

A composição química do fluxo de água que entra em um reservatório geralmente sofre mudanças significativas durante o represamento. Refletem na qualidade da água que sae do represamento, nos fenômenos bióticos e abióticos do reservatório e nas variáveis operacionais, como a profundidade do lago, o tempo de permanência (GAO et al., 2013), a profundidade em que a saída se encontra e a regulação da vazão de água.

As características construtivas e regras operativas, juntamente com as características geomorfológicas da bacia a montante, determinam o comportamento do reservatório e como isso poderá afetar a dinâmica e a qualidade da água do rio a jusante. As alterações provocadas pelo reservatório tendem a ser amenizadas com a entrada de novos tributários e com a distância percorrida no trecho normal do rio. Segundo Wiejaczka et al. (2018), no rio Teesta, no Himalaia, as mudanças das propriedades físico-químicas e concentrações de íons causados pelo reservatório são

geralmente normalizadas, dentro de 15 km a jusante do rio, por fatores ambientais antes da saída do rio Teesta do Himalaia.

As alterações na qualidade física e química da água da represa têm consequências imediatas sobre a biota aquática. Isso implica alterações dos valores de pH e na oxigenação do meio (ESTEVEZ, 1998).

No Brasil, alguns reservatórios hidrelétricos, como o da UHE São Simão (FONSECA, 2010), já passaram e passam por problemas de qualidade de água em decorrência da eutrofização, seja na sua formação ou ainda ao longo da sua estabilização e envelhecimento do lago.

As variações de pulsos de demanda de água para geração de energia dos reservatórios de Capivara e Taquaruçu, respectivamente 9º e 10º na cascata de reservatórios hidrelétricos do Paranapanema, e sua influência nas condições limnológicas do rio a jusante, demonstraram que os pulsos afetam as condições da água de jusante, em especial a velocidade da água, turbidez, nutrientes e sólidos suspensos (DE OLIVEIRA NALIATO, D. A.; NOGUEIRA, M. G.; PERBICHE-NEVES, G., 2009). Também demonstraram que as características físicas dos reservatórios (profundidade, configuração da tomada de água e estratificação térmica) influenciam na qualidade da água de jusante (ARRUDA, 2014).

2.13.1. Em pequenos reservatórios

Apesar do conhecimento sobre grandes reservatórios estar bem consolidado na literatura (WCD, 2000), como fragmentação e regulação do fluxo (GRILL et al., 2019), redução da biodiversidade (WINEMILLER et al., 2016), alteração do regime térmico (OLDEN JD., NAIMAN,, 2010), redução no transporte de nutrientes (MAAVARA et al., 2015, 2017) e sedimentos (LEIGH et al., 2019) e emissão de gases do efeito estufa, raros são os estudos que relatam efeitos significativos de pequenos represamentos sobre propriedades físico-químicas da água e seus efeitos ecológicos (PUNYS et al., 2015).

As barragens e os reservatórios das PCHs que possuem infraestrutura semelhante às grandes barragens / reservatórios, terão impactos semelhantes de água e terra dos represamentos de uma grande hidrelétrica (KELLY-RICHARDS et al., 2017).

Como a infraestrutura física de um represamento de PCH terá alterações físicas comparáveis às do rio, como um projeto de uma UHE, espera-se que as questões sociais e ambientais associadas à criação de um reservatório e as implicações a jusante sejam semelhantes. No entanto, uma grande diferença é que os reservatórios de PCH podem ser gerenciados de maneira diferente da UHE, principalmente em relação à vazão, que pode ter regulação diária, enquanto a uma grande usina possui regulação de vazão mensal ou anual.

Segundo PUNYS et al. (2015) que estudou os níveis de água dos pequenos reservatórios na Lituânia, esses são geralmente consistentes, de modo que a descarga de água das barragens de PCH não flutua tanto quanto as barragens de uma UHE.

2.13.2. Em reservatórios em cascata

Nas últimas décadas, a construção de estações hidrelétricas em cascata e as operações subsequentes de geração de energia alteraram significativamente o processo de escoamento natural em muitos cursos de rios, causando uma série de problemas ambientais para os rios (CHEN et al., 2019).

A produção das barragens a jusante é aumentada pela regulação dos fluxos de água em um rio, com armazenamento de água durante o período de cheia e a liberação dessa água durante o período de baixa vazão. Essa água armazenada gera eletricidade várias vezes: uma vez na barragem a montante e novamente em cada barragem a jusante. Isso cria uma tentação embutida de construir mais barragens a montante de qualquer barragem sendo avaliada para licenciamento (FEARNSIDE, 2019).

Tem sido sugerido que os efeitos cumulativos de múltiplas pequenas centrais hidrelétricas e suas interações com outros estressores antropogênicos são duas grandes lacunas de conhecimento para o planejamento hidrelétrico em escala de bacia (KELLY-RICHARDS et al., 2017; LANGE et al., 2018).

Podemos dizer que os efeitos cumulativos podem ser homotípicos ou heterotípicos, dependendo se resultam de múltiplos desenvolvimentos do mesmo tipo ou são causados pela combinação de dois ou mais projetos ou desenvolvimentos diferentes. Eles também podem ser distinguidos pelo fato de desenvolverem através de um processo aditivo ou incremental, um processo supra aditivo (em que o efeito cumulativo é maior que a soma de efeitos individuais) ou um processo infra aditivo

(no qual o efeito cumulativo é menor que a soma dos efeitos individuais). O impacto total é, portanto, igual à soma dos impactos dos empreendimentos e aos efeitos da interação (que pode ser positivo ou negativo, dependendo de os efeitos serem supra ou infra aditivos).

Os efeitos cumulativos podem ser classificados como diretos, indiretos ou multivariados: os efeitos diretos correspondem ao caso de uma resposta simples (ou seja, primeira ordem para o ambiente em resposta a modificações causadas pela implementação de projetos); efeitos indiretos correspondem ao caso em que as respostas são de segunda ordem ou mais altas; efeitos multivariados correspondem a respostas a múltiplos estímulos com inter-relações. Respostas indiretas e multivariadas são mais complexas, menos compreendidas e mais difíceis de quantificar. Uma avaliação de impacto cumulativo deve abranger esses três tipos de resposta (direta, indireta e multivariada).

Vê-se que a definição de “efeitos cumulativos” ou “impactos cumulativos” varia em diferentes textos e artigos legislativos que cobrem a questão, com alguns autores propondo sua própria definição, consistente com a percepção do que deve ser uma avaliação de efeitos cumulativos.

Entre as definições do que é entendido por “impactos”, temos: (i) são os impactos cumulativos que dizem respeito a impactos da ação proposta integrados ao longo do tempo no recurso ambiental relevante; (ii) é o valor acumulado dos impactos que se referem aos resultados da ação proposta em todos os recursos ambientais relevantes em um determinado momento; (iii) são os impactos cumulativos que incluem todos os desenvolvimentos ou fatores existentes que podem causar impactos em torno da ação proposta, incluindo desenvolvimentos passados, mesmo aqueles que não são mais atuais, mas cujos efeitos ainda são perceptíveis; (iv) são as relações sinérgicas ou antagônicas associadas a efeitos ambientais (CARLUER et al., 2016)

Mesmo em países e regiões onde os projetos de PCHs estão sujeitos à revisão de estudos de impactos ambientais, os projetos geralmente são aprovados individualmente, sem considerar os efeitos cumulativos da infraestrutura hidrológica ou associada e distúrbios do solo, ou regular a distância entre os projetos. À medida que a densidade da PCH aumenta, há uma necessidade particular de entender esses impactos cumulativos (KELLY-RICHARDS et al., 2016).

A situação é ainda mais preocupante quando PCHs com canal de desvio são construídas em cascata e não há um controle e dimensionamento adequado da vazão ecológica no trecho desviado (HENNIG et al., 2013).

Os impactos e a escala de alcance podem depender dos contextos biogeográficos e climatológicos, bem como dos regimes operacionais das usinas hidrelétricas.

Conforme o Conceito de Descontinuidade Serial, existem dois indicadores que devem ser considerados: **a distância** pela qual o efeito das barragens é observada (DD - Distância de descontinuidade) e **a intensidade de perturbação** associada à sua presença.

O conceito de distância de descontinuidade é importante para avaliar se há o efeito cumulativo. Quando isso acontece, podemos dizer que é a distância da influência. Este termo designa, para uma variável que caracteriza o qualidade físico-química da água, a distância necessária a jusante de cada reservatório, para que a variável em questão retorne ao nível se não houver outro reservatório.

As variáveis da qualidade da água recuperam somente lentamente quando a água é liberada de uma represa. Os níveis de oxigênio podem recuperar dentro de um quilômetro ou dois, enquanto as alterações de temperatura podem ainda existir 100 km a jusante. Quando a distância entre barragens não permite a recuperação para os níveis naturais, a biologia de muitas centenas de quilômetros de rio pode ser afetada por um punhado de barragens (WCD, 2000).

Se a distância entre dois reservatórios for maior que a distância de influência, não haverá interação entre os efeitos gerados por cada reservatório. Caso contrário, essas interações precisam ser levadas em consideração e os efeitos podem se espalhar de montante para jusante. A conectividade hidrológica entre os reservatórios é, portanto, também um fator determinante.

A distância de influência se altera com a variável considerada, o grau em que é modificada no reservatório, o método de retorno da água e as mudanças na variável a jusante, ligadas a processos físicos e químicos ou condições hidrológicas: abastecimento difusivo do rio ou presença de tributários.

Este conceito é relevante para temperatura, oxigênio dissolvido e concentrações de nutrientes ou contaminantes.

A presença de reservatórios também afeta os aspectos temporais do sistema hídrico: os fluxos transferidos para o sistema (água, nitrato, diferentes formas de fósforo, sedimento grosso) evoluem em termos de acumulação (por exemplo, em escala anual) e dinâmica temporal. Essas mudanças estão particularmente ligadas à dinâmica de enchimento e captação de reservatórios de água, dinâmica de inundação de sedimentos e dinâmica sazonal de propriedades físico-químicas. Essas mudanças às vezes podem atrasar os processos, diminuir a variabilidade temporal ou acentuá-la. A amplitude do sinal também é frequentemente afetada.

Na presença de vários reservatórios essas alterações, atenuações ou amplificações as consequências nos organismos avaliados devem ser consideradas na escala da paisagem. A avaliação dos efeitos cumulativos deve ser um processo iterativo.

No ribeirão Ponte de Pedra as PCHs estão próximas o suficiente para que um efeito cumulativo possa ser observado.

CAPÍTULO 3

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO E ESTAÇÕES DE AMOSTRAGEM

Este estudo foi realizado na bacia hidrográfica do ribeirão Ponte de Pedra (BPP), que tem uma área de 2.131 km² e é inserida nos municípios de Rondonópolis, Pedra Preta e Itiquira na região sudeste do estado de Mato Grosso (Fig. 1). BPP tem extensão de 156 Km, largura média de cerca de 13 Km, com perímetro de 315 Km. Essa região apresenta altitude média de 528 m e que varia entre 188 m a 718 m.

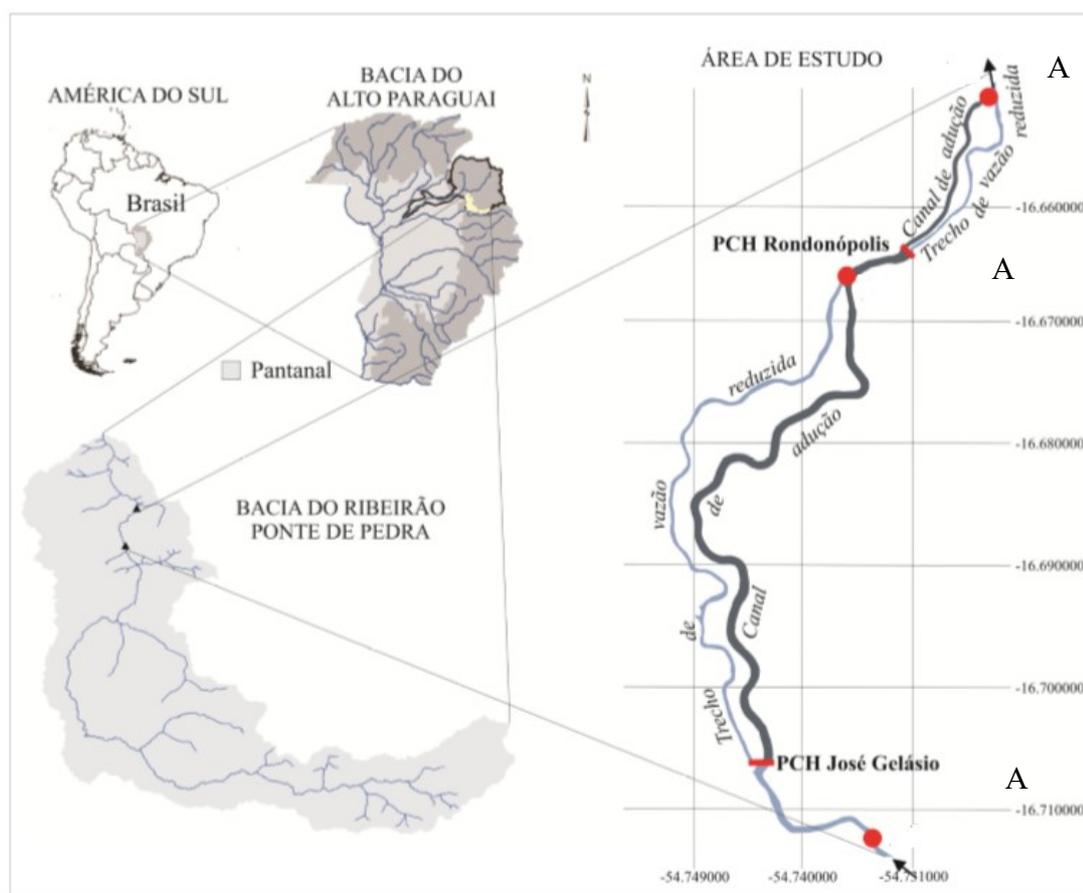


FIGURA 1: Localização das PCHs Eng. José Gelázio e Rondonópolis e das estações de qualidade de água na bacia hidrográfica do Ribeirão Ponte de Pedra sub-bacia do Rio Vermelho. MT Brasil

FONTE: Oliveira, 2015, adaptado pelo autor.

De acordo com os critérios introduzidos por Strahler (1952), da ordem dos cursos da água da Bacia Hidrográfica, isto é, do grau de ramificação ou bifurcação do sistema de drenagem da Bacia Hidrográfica, o ribeirão Ponte de Pedra se enquadra como rio de 4ª ordem. Para os cursos d'água sem tributários é adotada a ordem "1", ou primeira ordem, enquanto os cursos de água de segunda ordem originam-se da confluência de dois cursos de água de primeira ordem, podendo ter tributários também de primeira ordem. Já os cursos de água de terceira ordem originam-se da confluência de dois cursos de água de segunda ordem, podendo receber tributários de segunda e primeira ordens e assim sucessivamente (Silva et al., 2016).

Na BPP foram construídas duas pequenas centrais hidrelétricas, em sistema de cascata, em uma distância de cerca de 6,7 km (Fig. 2). A PCH Engenheiro José Gelázio da Rocha (PCH_{JG}), com capacidade instalada de geração de 24,43 MVA, sendo a sua geração firme de 11,90MVA, inaugurada em 17/02/2007; e a PCH Rondonópolis (PCH_{Rond}), com capacidade instalada de geração de 26,60 MVA, sendo a sua geração firme de 14,00 MVA, inaugurada em 12/12/2007, sendo ambas do grupo Brennand. Há a previsão de instalação de uma terceira PCH, cujo projeto básico encontra-se aprovado pela ANEEL com o nome de PCH João Basso, localizada a jusante da PCH Rondonópolis, a aproximadamente 6 km da foz do ribeirão Ponte de Pedra.

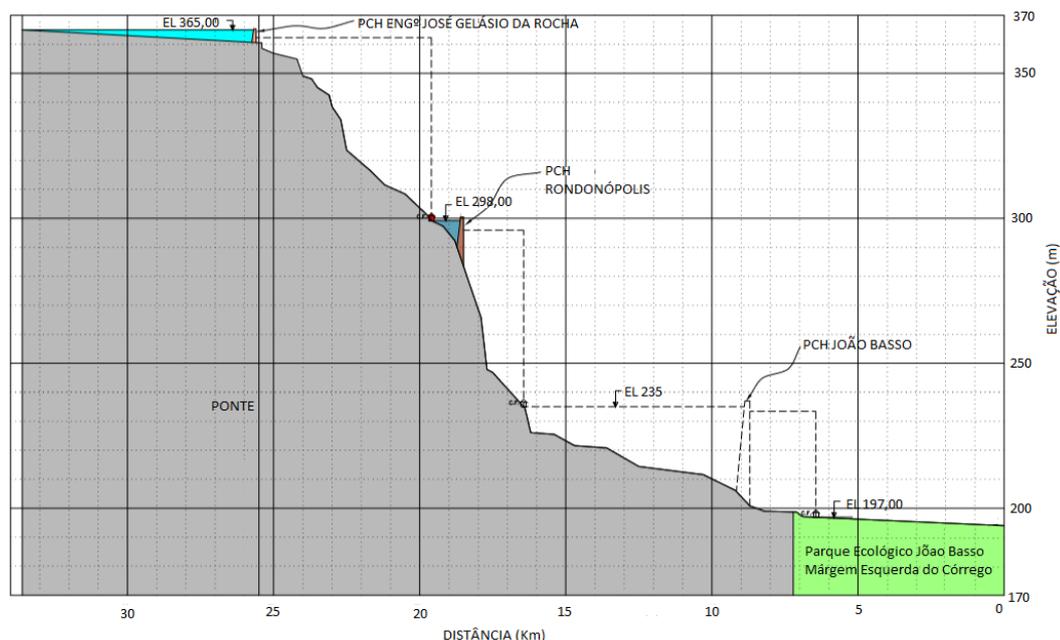


FIGURA 2: Perfil de Quedas com localização das PCHs Eng. José Gelázio. Rondonópolis e João Basso (não instalada).

FONTE: Hidropower Energia Elétrica S.A., adaptado pelo autor.

A PCH_{JG} possui área alagada de 0,13 km² e barragem com 4 m de altura, construída em concreto e aterro. A barragem é composta por descarregador de fundo e vertedor livre, e, de acordo com a Comissão Internacional de Grandes Barragens (CIGB/ICOLD), o reservatório em estudo da PCH_{JG} não é um grande barragem nem possui um grande reservatório.

A captação de água superficial é por meio de um desvio que conduz para o canal de adução, com manta impermeável com 6,5 km de comprimento (OLIVEIRA, 2016a). O conduto forçado possui 250 m de comprimento e desnível de 63 m. A vazão mínima mantida no trecho de vazão reduzida é de 2,7 m³.s⁻¹, oriunda da parte superficial do reservatório. O reservatório possui proliferação de plantas aquáticas enraizadas principalmente de *Eichhornia azurea* (Kunth), *Solms* 1843, *Pontederia* sp. (Pontederiaceae) e gramíneas (Poaceae).

A PCH_{Rond} possui área alagada de 0,02 km², barragem de concreto com 4 m de altura, com descarregador de fundo e vertedor livre. A captação de água é feita superficialmente por meio de um desvio que a conduz para o canal de adução aberto, com 1,4 km de comprimento, revestido com manta impermeável. O conduto forçado possui 250 m de comprimento e desnível de 62 m. A vazão mínima mantida no trecho de vazão reduzida é de 1,7 m³.s⁻¹, oriunda da parte superficial do reservatório (OLIVEIRA, 2016a).

A região estudada, onde se localiza a bacia do ribeirão Ponte de Pedra, pertence à Ecoregião do Cerrado (Savana), com Floresta estacional Semi-decidual e outras florestas (MMA, 2006). Segundo a classificação climática de Köppen-Geiger, o clima predominante é Aw – Clima de Savana, com temperaturas médias anuais variando entre 22,5 e 26,5°C. O mês de novembro é o mais quente (média de 27°C) e o de julho, o mais frio (média de 21°C). A precipitação média na área de estudo, no período de 01/09/2018 a 31/08/2019, foi de 1285 mm, sendo 1445,30 mm a montante da PCH_{JG}, e 1174,80 mm a jusante da PCH_{JG} e 1237,60 mm a jusante da PCH_{Rond}, concordando com dados da MMA (2006), que aponta uma média anual de 1.398 mm, variando entre 800 e 1.600 mm, sendo os maiores valores observados nas áreas de planalto. A maior

parte da pluviosidade nessa região se concentra de outubro a março / abril, enquanto a estiagem tem início entre abril / maio e se prolonga até setembro / outubro (ALVARES et al., 2014).

A BPP possui alto grau de desmatamento, sendo as principais classes de uso da terra presentes a Agricultura (54,8%) e Pastagem (18,2%) (Fig. 3). Esse cenário é resultado da remoção da vegetação natural do Cerrado, principalmente nas regiões com maiores altitudes (400-600m) da BPP para cultivo de monoculturas. Nessas áreas, estão localizadas as principais cabeceiras, responsáveis pelo suprimento de água dos cursos d'água no período de estiagem no Cerrado, que, sob o ponto de vista ambiental, deveriam ser destinadas à preservação (PESSI, 2018).

As formações vegetais naturais existentes na BPP são classificadas como Cerradão, Cerrados, Formação Savânica associada a vertentes e Floresta Estacional (SEPLAN, 2011). Ocorrem, ainda, nas Áreas de Preservação Permanente ao longo dos cursos de água e no Parque Estadual Dom Osório Stoffel, a jusante das PCHs.

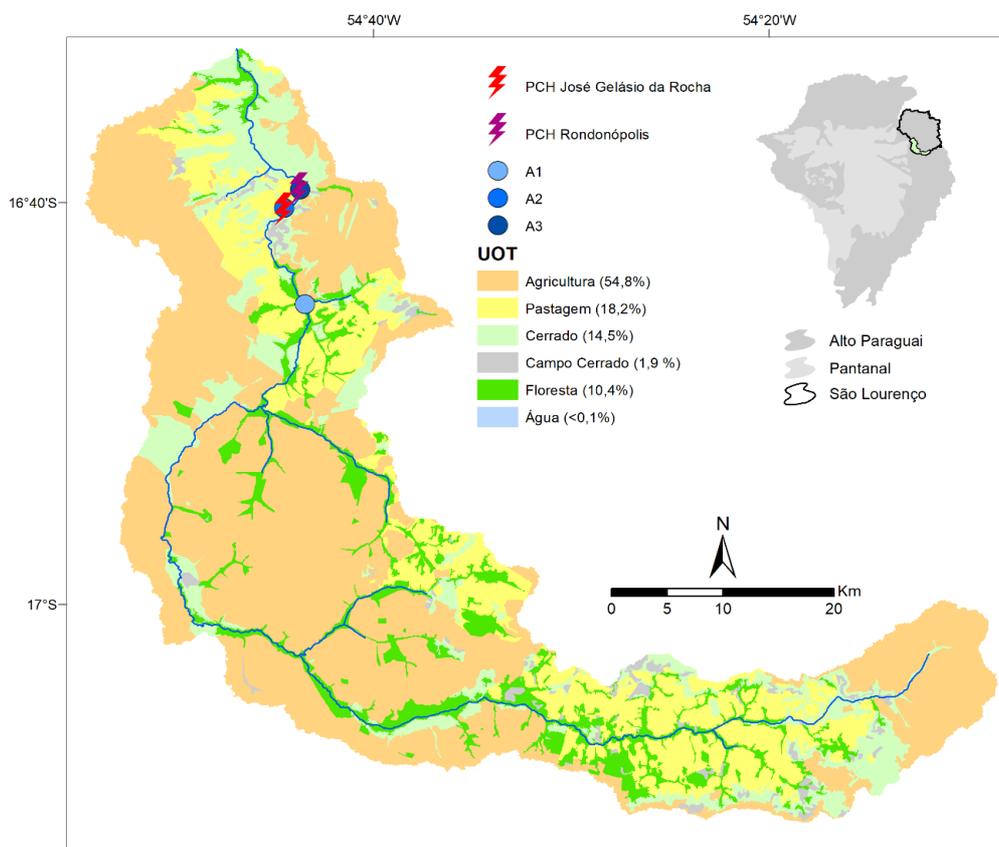


FIGURA 3: Localização da bacia hidrográfica do ribeirão Ponte de Pedra, na Bacia do rio São Lourenço/Alto Paraguai e América do Sul.

FONTE: Projeto REMAPP. 2019.

Dentre as principais pressões antrópicas que atuam na região do planalto desta bacia estão o desmatamento para plantio de soja, cana-de-açúcar e a formação de pastos. A implantação de obras de infraestrutura hidrelétrica, que podem interferir no pulso natural de inundações da planície pantaneira, representam um novo desafio para os órgãos gestores. (MME/ANA, 2019).

3.1.1. Equipamentos utilizados

Foram instaladas três estações ao longo do ribeirão Ponte de Pedra, na área de influência das PCHs em cascata PCH_{JG} e PCH_{Rond}. Os conjuntos de equipamentos para monitoramento de qualidade de água das três estações foram compostos por equipamentos da Campbell Scientific, com sensores de pH, oxigênio dissolvido (OD), condutividade e temperatura da água, da WTW/Xylem, com sensores para nitrato (NO_3^-) e Demanda Química de Oxigênio (DQO) por sonda NiCaVis® 705 IQ (WTW) e da Solar Instrumentos com sensores de Turbidez (Tabela 3).

TABELA 3: Configuração das principais componentes para monitoramento de qualidade de água das estações automáticas.

Datalogger e Periféricos	Campbell Sci	Datalogger CR3000RC
Sensores de qualidade de água	Campbell Sci	pH (CSIM11L16PT)
		OD (CS511-L-DO6400T)
		Condutividade (CS547AL165)
		Temperatura (MIQ/TC2020XT. MIQ/24)
Datalogger e Periféricos	WTW/ Marte	Nitrato, DBO por medição espectral
Datalogger e Periféricos	Solar Instrumentação	Estação SL200PNVN
Sensores de qualidade de água	Solar Instrumentação	SL2000TS. Turbidez faixa 0-4000NTU

FONTE: Projeto REMAPP, 2019.

A seleção dos sensores considerou variáveis básicas, como a temperatura da água, oxigênio, quantidade de íons e partículas, como também carbono e nitrato. Essas são variáveis que possibilitassem observações tanto de fenômenos naturais da bacia de

drenagem como os antrópicos, que podem ser advindos da bacia de drenagem ou da operação das PCHs.

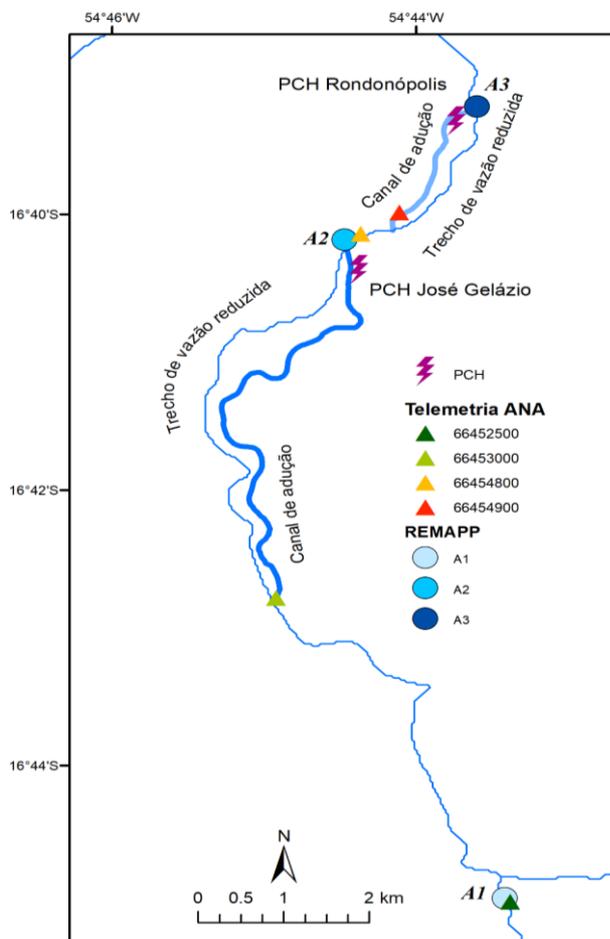


FIGURA 4: Arranjo espacial das PCHs Eng. José Gelázio da Rocha e Rondonópolis, estações de monitoramento de qualidade da. REMAPP e estações fluviométricas.

FONTE: Adaptado de Oliveira (2016).

Na Figura 4, temos a localização das PCHs e das estações de monitoramento no ribeirão Ponte de Pedra, com a indicação do canal de adução e do trecho de vazão reduzida.

A estação A1 está localizada à margem direita do Ribeirão Ponte de Pedra, na parte alta do bacia, em um local só acessível por embarcação. No mesmo local está a estação telemétrica da PCH_{JG} (Código ANA: 66452500), cerca de 6,5 km a montante da captação da PCH_{JG} sem influência de remanso pelo represamento (figura 5), em um ponto retilíneo do curso do ribeirão.



FIGURA 5: Estação Água 1 (A1) a montante das PCHs.
FONTE: Projeto REMAPP, 2019.

A estação A2 monitora a qualidade da água da vazão turbinada pela PCH_{JG}, após a confluência com o trecho de vazão reduzida do leito natural (Fig. 6).



FIGURA 6: Estação A2 a jusante da PCH Eng. José Gelázio da Rocha / montante PCH Rondonópolis.

FONTE: Projeto REMAPP, 2019.

A estação A2 fica a poucos metros do encontro da água turbinada da PCH_{JG} com a água vertente que vem no leito natural do Ribeirão Ponte de Pedra, monitorando, assim, todo o fluxo do ribeirão.



FIGURA 7: Estação Água 3 (A3). a jusante da PCH Rondonópolis.
FONTE: Projeto REMAPP. 2019.

A estação A3 fica na saída da PCH_{Rond}, monitorando apenas a água turbinada. Por ser um local muito turbulento, alguns sensores tiveram maior número de medidas que não puderam ser aproveitadas. A topografia acidentada e o leito estreito não possibilitaram a instalação após a confluência com o trecho de vazão reduzida. A seta na Figura 7 indica o local da gaiola com sensores.

3.2. DADOS DE QUALIDADE DE ÁGUA

3.2.1. Dados das estações de alta frequência

Os dados considerados neste trabalho foram coletados no período de 24/03/2018 a 15/09/2019.

Os dados de pH, OD, Temperatura da água e Condutividade foram coletados a cada 5 minutos, por meio de equipamentos da Campbell. Os dados de Nitrato (NO_3^-) e DQO foram adquiridos a cada 15 minutos, por equipamentos da WTW, e os dados

de Turbidez foram adquiridos a cada 15 minutos, por equipamentos da Solar Instrumentação.

Por serem provenientes de três sistemas de armazenamento eletrônico distintos (dataloggers), que possuem resolução temporal e capacidade de armazenamento e de alimentação elétrica distintas, e para permitir uma comparação direta com os dados de vazão disponibilizados pela ENGIE, todas as séries foram re-amostradas para uma resolução temporal de 01 h.

3.2.2. Instalação das estações de alta frequência

A instalação das estações de monitoramento de qualidade de água em alta frequência foi realizada entre os dias 19 e 24/03/18, quando foram concluídas as instalações dos equipamentos da Campbell, da WTW e a calibração e instalação de gaiolas de proteção dos sensores (Fig. 8). As gaiolas foram necessárias devido à forte correnteza e para evitar possíveis choques mecânicos entre os equipamentos e galhos que descem pelo rio.



FIGURA 8: Gaiolas de metal desenvolvidas para proteção dos sensores de qualidade de água contra impactos mecânicos.

FONTE: Silva (2018).

3.3. DADOS HIDROLÓGICOS

3.3.1. Dados das estações de ANA

Ainda que na região existam quatro estações telemétricas instaladas, à montante e jusante das PCHS em cascata (Tabela 04), elas não foram utilizadas, pois apresentaram informação incompleta e não consolidada.

TABELA 4: Estações fluviométricas disponíveis na bacia do Ribeirão Ponte de Pedra.

Código ANA	Nome	Vazão monitorada
66455000	Ponte de Pedra	Ribeirão Ponte de Pedra (RPP) antes da instalação das PCHs (1979-2006)
66452500	PCH Eng. José Gelázio da Rocha Montante	Vazão total do RPP a montante das PCHs
66453000	PCH Eng. José Gelázio - Barramento	Vazão que será turbinada na PCH Eng. José Gelázio da Rocha
66454800	PCH Rondonópolis Montante	Vazão total do RPP a montante da PCH Rondonópolis
66454900	PCH Rondonópolis - Barramento]	Vazão que será turbinada na PCH Rondonópolis
Engie 1	PCH Eng. José Gelázio afluente	Vazão chegada represamento
Engie 2	PCH Eng. José Gelázio defluente	Vazão turbinada + vertida
Engie 3	PCH Rondonópolis afluente	Vazão chegada represamento
Engie 4	PCH Rondonópolis defluente	Vazão turbinada + vertida

FONTE: ANA/ REMMAP.

Devido a variações sistemáticas que mostram incompatibilidades com as cotas registradas, a utilização das vazões nas duas estações hidrométricas foram descartadas.

Os dados hidrológicos das vazões afluentes e defluentes das PCHs (Fig. 15), que foram utilizados para os cálculos descritivos e estatísticos, foram cedidos pela empresa ENGIE Brasil. Os dados abrangem todo período deste trabalho.

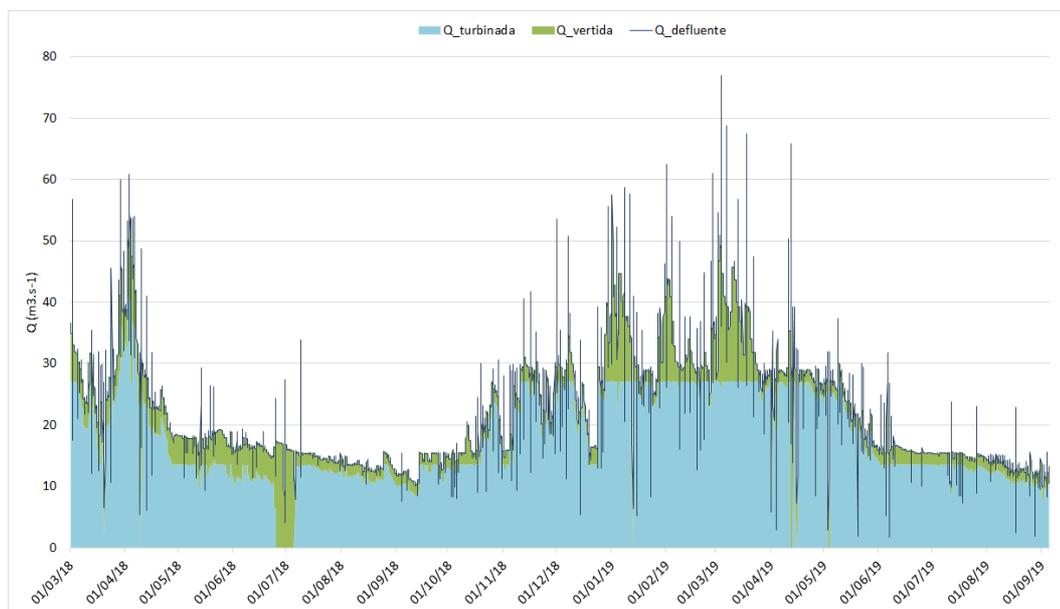


FIGURA 9: Vazões defluente, turbinada e vertida em resolução de 1h da PCH Eng. José Gelázio da Rocha disponíveis para o período da operação do projeto REMAPP (Março/18 até Setembro/19).

FONTE: ENGIE.

3.4. DADOS METEOROLÓGICOS

Os dados meteorológicos utilizados foram obtidos a partir das estações da Campbell, instaladas à montante e a jusante, tanto da PCHJG quanto da PCHRond, na bacia do ribeirão Ponte de Pedra, através do projeto REMAPP. Apesar das estações possuírem outros dados, foram utilizados somente os dados de precipitação e temperatura do ar para este trabalho. Os dados foram coletadas a cada 5 minutos, e, quando necessário, foi utilizada a média horária. Foram utilizados os dados de 04/2018 a 09/2019.

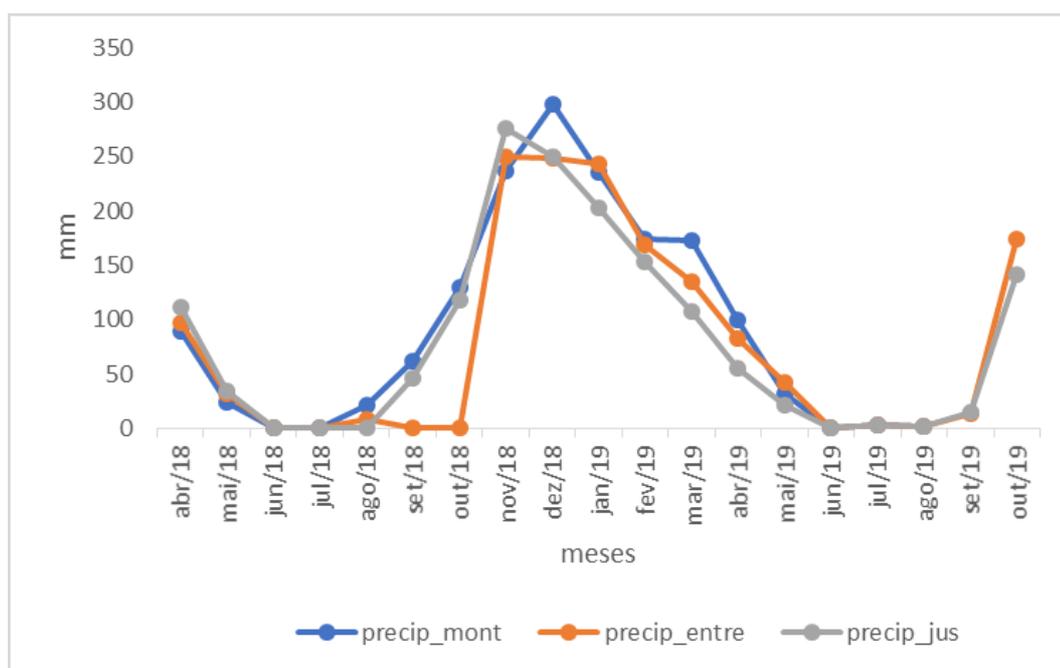
Os dados pluviométricos para o período considerado nesse estudo demonstram a sazonalidade regional (Fig. 10) com dois períodos distintos, sendo uma estação chuvosa e outra seca. A maior parte da pluviosidade concentra-se de outubro a abril, enquanto a estiagem tem início em maio e se prolonga até setembro; semelhante a outros estudos na região sul Mato-grossense (FANTIN-CRUZ et al., 2016; OLIVEIRA, 2016b; SOUZA, A. V. V.; LOVERDE-OLIVEIRA, 2014). A precipitação média no ano hidrológico de 2018/2019 (09/2018 a 08/2019) em A1, montante da PCHJG, foi de 120.442 mm, em A2, entre as PCHs, de 97.90 mm e em

A3, a montante da PCH_{Rond}, de 103.13mm.

FIGURA 10: Precipitação nas estações A1 (precip_mont), A2 (precip_entre) e A3 (precip_jus) registradas no período de março/18 a outubro/19.

FONTE: Silva (2019).

3.5. CONSOLIDAÇÃO DO BANCO DE DADOS COLETADO



Quando da existência de erros de observação, foi verificado o motivo e se os dados poderiam ser utilizados ou deveriam ser descartados.

Em alguns trechos das séries das variáveis de qualidade da água, foi necessário aplicar um fator de correção para que os dados medidos em alta frequência ficassem na faixa de medição dos dados laboratoriais, pois foi verificado que a acurácia das leituras estavam coerentes, no entanto, a exatidão das leituras estava fora do esperado.

Para verificação da acurácia dos dados coletados pelas sondas de alta frequência, foram traçadas as curvas das variáveis estudadas junto aos dados de qualidade de água disponíveis da usina e os dados laboratoriais coletados pelo projeto REMAPP. A coleta dos dados em sondas multiparamétricas, turbidímetro e laboratoriais foi realizada nas visitas programadas de manutenção.

3.5.1. Técnicas de preenchimento de falhas

A característica mais importante de séries temporais é que observações

vizinhas são dependentes e, geralmente, se está interessado em analisar e modelar esta dependência. Como a maior parte dos procedimentos estatísticos foram desenvolvidos para analisar observações independentes, a análise de séries temporais requer o uso de técnicas específicas (EHLERS, 2009; WANG; LI; LI, 2018). Vários métodos para análise uni e multivariada de séries temporais foram desenvolvidos e implementados com o objetivo de extrair informações das séries temporais (KRZYSZCZAK et al., 2019).

As falhas nos conjuntos de dados são prejudiciais na medida em que provocam um impacto prático no tamanho da amostra disponível para análise.

Uma grande parcela dos modelos para análise de séries temporais utiliza como pressuposto que as observações que formam a série temporal foram realizadas com frequência constante, o que, geralmente, não ocorre em função das falhas de dados. Tendo em vista que as falhas geram várias dificuldades na análise das séries temporais, o preenchimento destas falhas é necessário para que toda a informação presente na série temporal possa ser extraída.

Existem vários métodos para contornar o problema das falhas de dados, tais como os métodos de interpolação linear e cúbica, triangulação, expansão harmônica, assimilação de dados a partir de observações em modelos gerais, regressão linear, dentre outros.

O uso de um determinado método estatístico depende do conhecimento a priori, tanto do conjunto de dados de entrada, como das características intrínsecas do método. Cada método possui uma particularidade e, portanto, deve ser observada antes da aplicação.

No presente estudo, as séries temporais de pH, OD, Temperatura da água e do Ar, Condutividade, Turbidez, nitrato e DQO que possuíam pequenas falhas inferior a 10 passos (até 50 minutos) foram preenchidos por interpolação linear.

A série de vazão no ponto A1, à montante da PCH_{JG}, também foi preenchida por interpolação linear, assim como os dados de qualidade. As vazões dos pontos A2, a jusante da PCH_{JG} e A3 a jusante da PCH_{Rond} foram preenchidas pelo método comparativo entre as vazões de A2 e A3, pois a mudança de comportamento de curto prazo, depende muito mais da operação da usina que de fatores naturais.

3.5.2. Dados com inconsistência aparente

Os equipamentos já possuíam uma validação interna para as leituras. Os dados no período de manutenção, ou que ocorreram devido a fatores que implicassem em erro de leitura, como exposição dos equipamentos fora da água, foram descartados.

3.6. ANÁLISE ESTATÍSTICA

Uma série temporal pode ser definida como uma sequência de observações ao longo do tempo. Analisando o comportamento de séries temporais, é possível identificar padrões, descrever a dependência dos dados em relação ao tempo, bem como fazer previsões de valores futuros. O principal objetivo da análise de séries temporais é desenvolver modelos que forneçam descrições plausíveis para os dados (LOESCH, C.; HOELTGEBAUM, M., 2017). Quando se trata de séries multivariadas, também há interesse em compreender a estrutura de dependência entre duas séries.

As séries hidrológicas são temporais e não respondem adequadamente à análises estatísticas utilizando métodos paramétricos. Em se tratando de variáveis hidrológicas, a distribuição de probabilidades em geral não é conhecida, sendo necessário admitir uma distribuição aproximada para os dados. Dessa forma, diversos pesquisadores optam pelos testes não paramétricos mesmo sabendo que eles são menos poderosos (em termos de probabilidade de rejeitar H_0 quando ela realmente for falsa) do que os testes paramétricos (CHEBANA, F.; OUARDA, T., 2021.).

Os métodos não-paramétricos se aplicam em dados provenientes de um experimento que não possui normalidade ou homogeneidade de variâncias. Pode ser aplicado em situação em que o teste paramétrico não é indicado ou se torna muito complexo; seja pela falta de informações a respeito da forma da distribuição da população ou pela dificuldade de obtenção de estimativas confiáveis dos parâmetros populacionais.

A base dos testes não-paramétricos não considera o valor intrínseco, mas sim a ordenação (ranques) dos dados. Se, por um lado, perde-se em precisão na troca dos valores da variável por seus respectivos postos, ganha-se em eficiência e facilidade no entendimento dos resultados.

Existem várias formas pelas quais os postos podem ser assinalados às observações, destacando os seguintes tipos: atribuição conjunta de postos ao conjunto completo de observações, com a menor delas tendo posto 1, a segunda menor posto 2 e assim por diante (ranque transformation 1 ou RT-1); atribuições de postos às variáveis particionadas em subconjuntos, de forma independente em cada um deles (ranque transformation 2 ou RT-2); aplicação da RT-1 após uma reexpressão apropriada dos dados (ranque transformation 3 ou RT-3) e, finalmente, a aplicação da RT-2 após uma transformação de dados (ranque transformation 4 ou RT-4) (CONOVER, W. J.; IMAN, R. L., 1981.). Outros tipos de atribuição de postos podem ser utilizados para casos específicos.

As falhas de leitura que aconteceram não possibilitaram o tratamento estatístico dos dados como sendo séries temporais contínuas. No entanto, em trechos específicos no período chuvoso e no período seco, que tiveram leituras que pudessem ser tratadas como série temporal, foram aplicados os testes estatísticos.

Neste trabalho, procura-se saber as possíveis alterações provocadas pelas PCHs PCH_{JG} e PCH_{Rond} da qualidade de água do ribeirão Ponte de Pedra, das variáveis formadoras de qualidade da água (pH, OD, Condutividade, Temperatura, Turbidez, Nitrato e DQO). Para tanto, os dados foram ranqueados de menor para maior (RT-1) para a aplicação dos testes estatísticos paramétricos ANOVA, Matriz de Correlação, Correlação Cruzada e a Análise de Componentes Principais, para verificar se essas alterações aconteceram, e se aconteceram, qual foi a sua magnitude.

3.6.1. Análise da interferência da vazão sobre variáveis de qualidade pelo coeficiente de correlação cruzada destendenciada (ρ DCCA)

O objetivo do uso deste cálculo foi realizar análises de correlações cruzadas entre a série temporal da vazão e cada uma das variáveis de qualidade de água estudadas, a fim de verificar qual é a influência da vazão na alteração dessas variáveis nas estação “seca” e “chuvosa”.

Como os dados de qualidade de água em alta frequência não atenderam ao pressuposto de estacionariedade, foi aplicado o coeficiente de correlação cruzada destendenciada que deriva do método da análise de correlação cruzada destendenciada

(Detrended Cross-correlation Analysis – DCCA), proposto por Podobnik, B.; Stanley H. E. (2008), que é uma alternativa para esses casos.

O ρ DCCA é um expoente capaz de quantificar o nível de correlação cruzada tendo como base o DCCA (ZEBENDE, 2011). O DCCA é uma generalização do método da análise de flutuação destendenciada - Detrended Fluctuation Analysis – DFA (PODOBNIK, B.; STANLEY, H. E., 2008) e identifica e quantifica a associação cruzada entre duas séries temporais potencialmente não-estacionárias. Este método tem sido aplicado em diferentes áreas, tais como climatologia (VASSOLER, R. T.; ZEBENDE, 2012), geofísica (MARINHO, E. B. S.; BASSREI, A.; ANDRADE, R. F., 2017) e mercado de ações (YUAN, 2015)

O coeficiente de correlação cruzada destendenciada (ρ DCCA) é definido como a razão entre a função de covariância diminuída F^2_{DCCA} e a função de variância diminuída F_{DFA} de $\{u_1(i)\}$ e $\{u_2(i)\}$, ou seja,

$$\rho_{DCCA}(n) \equiv \frac{F^2_{DCCA}(n)}{F_{DFA_{\{u_1\}}}(n) F_{DFA_{\{u_2\}}}(n)} \quad \text{equação 1}$$

onde a equação 1 nos leva a uma nova escala para quantificar o nível de correlação cruzada em séries temporais não estacionárias (MACHADO FILHO, A.; DA SILVA, M. F.; ZEBENDE, G. F., 2014).

O ρ DCCA destina-se à estimativa do coeficiente de correlação cruzada sem tendência em diferentes escalas de tamanho, cujo coeficiente possui sua variação limitada entre -1 a +1, inclusive, em que -1 representa anticorrelação perfeita (o crescimento de uma série implica o decréscimo da outra, ou vice-versa) e +1 correlação perfeita (o crescimento de uma série implica o crescimento da outra, ou vice-versa). Já um valor do ρ DCCA igual a zero significa que não existe correlação cruzada. É importante relatar que o ρ DCCA foi provado teoricamente por Zebende (2012), tendo como método a Desigualdade de Cauchy.

Em análises de correlação cruzada (cross-correlation analysis), é possível estudar o comportamento conjunto de duas séries (LOESCH, C.; HOELTGEBAUM, M., 2017). No entanto, este método exige que os dados atendam ao pressuposto de

estacionariedade, o que não acontece na maior parte das séries que encontramos na prática (LOESCH, C.; HOELTGEBAUM, M., 2017).

Uma das vantagens do ρ DCCA em relação a outros coeficientes de correlação cruzada com o coeficiente de correlação de Pearson é a possibilidade de mensurar correlação entre dois sinais em diferentes escalas de tempo. Outra vantagem em relação ao coeficiente de Pearson é a capacidade de analisar séries não lineares.

As análises foram realizadas entre a vazão e as variáveis estudadas, sendo que os dados de vazão à montante da PCH_{JG}, localizada na tomada d'água da PCH, foi considerada também para o ponto A1 e A2, visto que em A1 não há monitoramento de vazão nem nível. Portanto, a vazão à montante da PCH_{JG} foi considerada para as análises estatísticas de A1 (montante) e A2 (entre) e a vazão da tomada d'água da PCH_{Rond} foi considerada para as análises estatísticas em A3 (jusante).

As análises estatísticas foram realizadas levando em consideração todos os dados pareados que tinham informação em todas as variáveis consideradas, tratadas de forma contínua, diferenciando os períodos das estações de chuva e seca e, também, a localização das estações.

Procurou-se o maior período possível nas estações do ano que contemplassem as três posições, com o máximo de informação no mesmo período. No entanto, como os dados devem ser de forma contínua nos três pontos considerados, na estação chuvosa, nem todos as variáveis tiveram os mesmos períodos de análise. O pH, OD, temperatura da água e condutividade utilizaram dados entre 13/12/2018 e 12/01/2019; o nitrato (NO₃-) e DQO utilizaram dados entre 13/12/2018 e 24/12/2019, e a turbidez utilizou dados entre 26/04/2019 a 04/05/2019.

Na estação “seca” todos os parâmetros utilizaram dados do mesmo período entre 01/06/2019 a 30/06/2019.

Para classificação da correlação do valor de ρ DCCA foi adotada a seguinte padronização, conforme tabela 5.

TABELA 5: Variação do coeficiente de correlação cruzada sem tendência em diferentes escalas de tamanho.

Valor de ρ DCCA	Correlação
ρ DCCA = 0	Não há correlação
$0.1 < \rho$ DCCA < 0.3	Correlação muito fraca.

$0.31 < \rho_{DCCA} < 0.5$	Correlação fraca.
$0.51 < \rho_{DCCA} < 0.7$	Correlação moderada.
$0.71 < \rho_{DCCA} < 0.9$	Correlação forte.
$0.91 < \rho_{DCCA} < 0.99$	Correlação muito forte
$\rho_{DCCA} = 1$	Correlação ou anticorrelação perfeita

Os cálculos foram desenvolvidos no software R.

3.6.2. Análise das relações entre parâmetros a partir da correlação de Spearman

Aplica-se igualmente em variáveis intervalares, como alternativa ao r de Pearson, quando neste último se viola a normalidade. Nos caso em que os dados não formam uma distribuição bem comportada, com alguns pontos muito afastados dos restantes, ou em que parece existir uma relação crescente ou decrescente em formato de curva, o coeficiente ρ de Spearman é mais apropriado.

Uma fórmula fácil para calcular o coeficiente ρ de Spearman é dada por:

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n d_i^2}{n^3 - n}, \quad \text{equação 2}$$

Onde:

- n é o número de pares (x_i, y_i)

$d_i =$ (postos de x_i dentre os valores de x) - (postos de y_i dentre os valores de y).

Se os postos de x são exatamente iguais aos pontos de y , então todos os d_i serão zero e ρ será 1.

O coeficiente ρ de Spearman varia entre -1 e 1. Quanto mais próximo estiver destes extremos, maior será a associação entre as variáveis. O sinal negativo da correlação significa que as variáveis mudam em sentido contrário, isto é, as categorias mais elevadas de uma variável estão associadas a categorias mais baixas da outra variável.

O coeficiente ρ de Spearman mede a intensidade da relação entre variáveis ordinais. Usa, em vez do valor observado, apenas a ordem das observações. Deste modo, esse coeficiente não é sensível a assimetrias na distribuição nem à presença de outliers, não exigindo portanto que os dados provenham de duas populações normais,

atendendo a diversos tipos de distribuição de população (Fig. 11). O coeficiente de correlação não é sensível às unidades de cada variável.

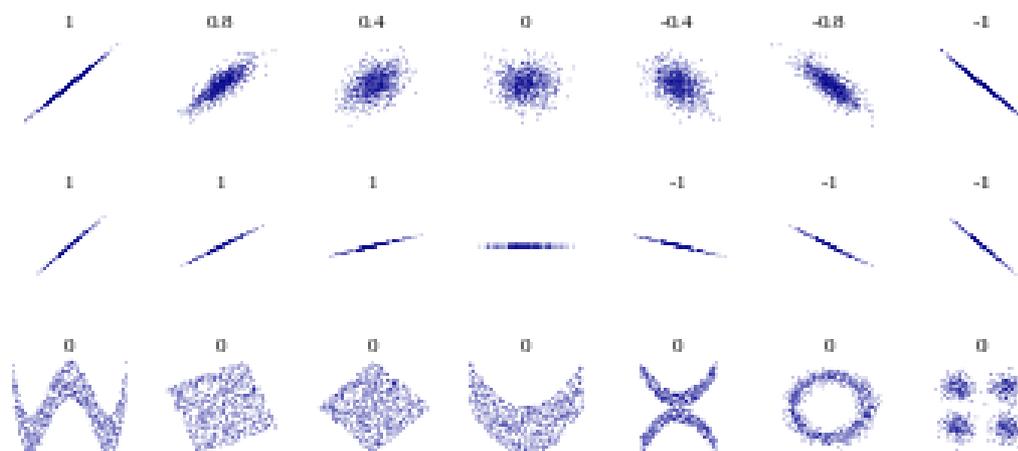


FIGURA 11: Exemplos de distribuição de população, nas duas primeiras linhas ocorre correlação linear, na terceira linha ocorre correlação não linear.

FONTE: Denis Boigelot, 2011

Para fazer a análise simultânea dos pares de variáveis da associação entre todas as variáveis estudadas (PH, OD, Condutividade, Temperatura, Turbidez, Nitrato e DQO), os dados foram dispostos em uma matriz de correlação. Dessa maneira é possível verificar quanto uma variável diminui ou aumenta com o variação da outra, ou seja, qual é a influência que uma variável tem sobre a outra na estação seca e na chuvosa.

Para a construção da matriz de correlação, foi utilizado o método estatístico do coeficiente de correlação de postos de Spearman.

A matriz de correlação de n variáveis X_1, \dots, X_n é a matriz $n \times n$, i -ésimo elemento da matriz é $\text{corr}(X_i, X_j)$. Se as medidas de correlação usadas são coeficientes de produto-momento, a matriz de correlação é igual à matriz de covariância das variáveis padronizadas, $X_i / \sigma(X_i)$ para $i = 1, \dots, n$. Isto é aplicado tanto para a matriz de correlações populacionais (caso em que σ denota o desvio padrão populacional) quanto para a matriz de correlações amostrais (caso em que σ denota o desvio padrão amostral),

A matriz de correlação é estritamente definida positiva se nenhuma variável puder ter todos os seus valores exatamente gerados como uma combinação linear dos

outros. A matriz de correlação é simétrica porque a correlação entre X_i e Y_j é igual à correlação entre X_j e Y_i . Por exemplo, uma matriz de correlação aparece na fórmula para o coeficiente de correlação múltipla (R), uma medida de qualidade de ajuste em regressão múltipla em que: $R^2 = c^T R_{XX}^{-1} c$ é o vetor de correlações entre as variáveis independentes X_n e a variável dependente Y_i e R_{XX} é a matriz de correlação.

Para identificar dentro da matriz de correlação de Spearman, se um valor observado de p é significativamente diferente de zero, foi utilizado o método de Neyman-Pearson. Nesse caso, foi considerada como hipótese estatística (H_0) a correlação monótona entre as variáveis. Para facilitar a identificação do grau de significância estatística ou que o resultado é estatisticamente significativo, foram adotados símbolos, tais como o expoente sobre o valor encontrado da correlação, conforme Tabela 6.

O valor de p utilizado para medir a significância estatística, que depende diretamente da amostra, tenta fornecer uma medida da força dos resultados do teste. Se a hipótese estatística nula (H_0) for verdadeira e a chance da variação aleatória for a única razão para as diferenças amostrais, então o valor- p é uma medida quantitativa para alimentar o processo de tomada de decisão como evidência (ARSHAM, H., 1988).

TABELA 6: Interpretação dos valores- p e nível de significância do teste estatístico.

Valor p	Interpretação	Símbolo	Interpretação
$p \leq 0,001$	Evidência muito forte contra H_0	***	Extremamente significativo
$0,001 < p < 0,01$	Evidência forte contra H_0	**	Muito significativo
$0,01 < p \leq 0,05$	Evidência moderada contra H_0	*	Significativo
$0,05 < p \leq 0,10$	Evidência sugestiva contra H_0	.	Sem significância estatística
$0,10 < p$	Pouca ou nenhuma evidência real contra H_0		Sem significância estatística

Entretanto, cabe notar que o termo significância não implica importância e o termo significância estatística não quer dizer significância prática. O nível de significância é a probabilidade de rejeitar a hipótese nula (não há correlação entre as variáveis) quando ela é verdadeira.

Nesse, caso o grande número de observações pode fazer com que o resultado minimamente destoante da hipótese nula seja estatisticamente significativo, mas que na prática não implica uma diferença tão importante para que a hipótese nula seja rejeitada.

Para avaliar a significância, é importante levar em consideração a correlação entre as duas variáveis, que é uma medida prática do tamanho do efeito.

A correlação é igual a 1 se uma das variáveis é uma função linear crescente da outra variável. É igual a -1 se uma variável é uma função decrescente. Os valores intermédios fornecem informações sobre o grau de dependência linear entre as duas variáveis. Quanto mais próximo o coeficiente estiver dos valores extremos -1 e 1, mais forte é a correlação linear entre as variáveis. Uma correlação igual a 0 significa que as variáveis não estão linearmente correlacionadas, mas podem estar correlacionado de forma não linear.

Na Tabela 7 podemos ver a as faixas de valores de ρ e a correlação atribuída a cada faixa.

TABELA 7: Variação da correlação de acordo com o coeficiente de correlação de Pearson.

Correlação	
$\rho = 0$	Não há correlação
$0,1 < \rho < 0,3$	Correlação muito fraca.
$0,31 < \rho < 0,5$	Correlação fraca.
$0,51 < \rho < 0,7$	Correlação moderada.
$0,71 < \rho < 0,9$	Correlação forte.
$0,91 < \rho < 0,99$	Correlação muito forte
$\rho = 1$	Correlação ou anticorrelação perfeita

A análise estatística através da Matriz de Correlação foi realizada através do software R, utilizando os pacotes Performance Analytics e Corrplot.

A análise foi realizada levando em consideração todos os dados pareados que tinham informação em todas as variáveis considerados, tratados de forma isolada, diferenciando estações seca e chuvosa e localização das estações, conforme Tabela 8.

TABELA 8: Períodos de dados utilizados para formação da matriz de Correlação.

		Períodos								
		Chuva	dias chuva	Medidas chuva	Seca	dias seca	Medidas chuva	Seca e Chuva	dias chuva e seca	Medidas chuva e seca
Estações	A1 montante da PCH _{JG}	13/12/2018 a 20/02/2019	69	1284	14/05/2019 a 15/09/2019	124	2850	13/12/2018 a 20/02/2019 11/07/2019 a 15/09/2019	135	2734
	A2 jusante da PCH _{JG} e montante da PCH _{Rond}	13/12/2018 a 20/02/2019 01/10/2019 a 29/10/2019	97	1310	08/05/2019 a 06/09/2019	121	2765	13/12/2018 a 24/12/2018 19/02/2019 a 22/02/2019 25/02/2019 a 22/03/2019 31/07/2019 a 29/10/2019	119	2789
	A3 jusante da PCH _{Rond}	13/12/2018 a 01/01/2019 19/02/2019 a 20/02/2019 01/10/2019 a 29/10/2019	48	1193	14/05/2019 a 06/09/2019	115	2746	13/12/2018 a 01/01/2019 19/02/2019 a 20/02/2019 11/08/2019 a 29/10/2019	100	2417

A temperatura da água será utilizada como fator de comparação entre as leituras no mesmo ponto, pois ela não é alterada por nenhum parâmetro de qualidade, mas pode alterar todos os demais.

3.6.3. Análise de componentes principais (PCA)

O objetivo da utilização da PCA neste trabalho é fazer a análise gráfica das inter-relações das componentes que são combinações lineares das variáveis originais (PH, OD, Condutividade, Temperatura, Nitrato, DQO e Turbidez) e verificar o quanto explica essas variáveis em termos de suas dimensões inerentes (Componentes) na estação seca e na chuvosa, nos pontos estudados.

A análise de componentes principais – ACP ou PCA (do inglês *Principal Component Analysis*) é uma técnica multivariada de modelagem da estrutura de covariância. O PCA é sensível à escala relativa das variáveis originais. Dependendo da área de aplicação, o PCA é também conhecido como transformada de Karhunen-

Loève (KLT) discreta, transformada de Hotelling ou decomposição ortogonal própria (POD).

Descrita em 1901, por Karl Pearson, é mais comumente usado como uma ferramenta de Análise Exploratória de Dados e para fazer modelos preditivos. O PCA pode ser feito por decomposição em autovalores (Valores Próprios) de uma matriz covariância, geralmente depois de centralizar (e normalizar ou usar pontuações-Z) a matriz de dados para cada atributo.

O PCA é uma técnica estatística de análise multivariada que transforma linearmente um conjunto original de variáveis, inicialmente correlacionadas entre si, num conjunto substancialmente menor de variáveis não correlacionadas que contém a maior parte da informação do conjunto original. Ela está associada à ideia de redução de massa de dados, com menor perda possível da informação, em que se procura redistribuir a variação observada nos eixos originais de forma a se obter um conjunto de eixos ortogonais não correlacionados (HONGYU, K.; SANDANIELO, V. L. MARTINS; O. J., 2016).

A PCA explica a estrutura da variância e covariância de um vetor aleatório composto de p -variáveis aleatórias, por meio de combinações lineares das variáveis originais. Essas combinações lineares são chamadas de componentes principais e não são correlacionadas entre si. A PCA transforma um conjunto de variáveis originais em outro conjunto de variáveis de mesma dimensão denominadas de componentes principais. Os componentes principais apresentam propriedades importantes: cada componente principal é uma combinação linear de todas as variáveis originais, independentes entre si e estimadas com o propósito de reter, em ordem de estimação, o máximo de informação em termos da variação total contida nos dados.

Os cálculos estatísticos foram realizados no software R, através dos pacotes Factoextra e FactoMineR, que executam métodos clássicos de componentes principais: Análise de Componentes Principais (PCA). Análise de Correspondência (CA), Análise de Correspondência Múltipla (MCA).

O teste foi realizado levando em consideração todos os dados pareados que tinham informação em todas as variáveis consideradas, tratadas de forma isolada, diferenciando: estações chuvosa e seca, e a localização dos pontos de coleta A1, A2 e A3.

A análise pelo método do coeficiente de Speaman, através da matriz de correlação, assim como a Análise por Componentes Principais, utilizou os mesmos intervalos de tempo.

Para facilitar a análise, ela foi nomeada e dividida, conforme Tabela 9, da seguinte maneira:

TABELA 9: Dados considerados para a Análise de Componentes Principais (PCA).

		Períodos								
		Chuva	dias chuva	Medidas chuva	Seca	dias seca	Medidas chuva	Seca e Chuva	dias chuva e seca	Medidas chuva e seca
Estações	A1 montante da PCH _{JG}	13/12/2018 a 20/02/2019	69	1284	14/05/2019 a 15/09/2019	124	2850	13/12/2018 a 20/02/2019 11/07/2019 a 15/09/2019	135	2734
	A2 jusante da PCH _{JG} e montante da PCH _{Rond}	13/12/2018 a 20/02/2019 01/10/2019 a 29/10/2019	97	1310	08/05/2019 a 06/09/2019	121	2765	13/12/2018 a 24/12/2018 19/02/2019 a 22/02/2019 25/02/2019 a 22/03/2019 31/07/2019 a 29/10/2019	119	2789
	A3 jusante da PCH _{Rond}	13/12/2018 a 01/01/2019 19/02/2019 a 20/02/2019 01/10/2019 a 29/10/2019	48	1193	14/05/2019 a 06/09/2019	115	2746	13/12/2018 a 01/01/2019 19/02/2019 a 20/02/2019 11/08/2019 a 29/10/2019	100	2417

Quando a análise de componentes principais é utilizada, a matriz S, as covariâncias são influenciadas pelas variáveis de maior variância, sendo portanto, muito utilizada nos casos em que existe uma discrepância muito acentuada entre essas variâncias. A discrepância é muitas vezes causada pela diferença das unidades de medidas das variáveis. Esse problema pode ser amenizado se uma transformação for efetuada nos dados originais, de modo a equilibrar os valores de variância ou a colocar os dados na mesma escala de medida.

Uma das transformações mais comuns é aquela em que cada variável é padronizada pela sua média e desvio padrão. No caso deste trabalho as medidas foram

ranqueadas antes de usar a técnica de componentes principais aplicada à matriz de covariâncias das variáveis padronizadas.

Para geração dos gráficos foi utilizado o software R e o pacote Biplot, segundo (GRAFFELMAN, 2012). O método biplot foi desenvolvido por Gabriel (1971) para representar graficamente resultados de análise de componentes principais ou de decomposição de valores singulares, nos quais o valor de cada elemento de uma Tabela de dupla entrada pode ser visualizado pelo produto de vetores e pelo cosseno do ângulo entre dois vetores. Quando duas matrizes apresentarem o mesmo número de linhas e colunas, é possível multiplicá-las. A nova matriz gerada da multiplicação das duas anteriores assume o mesmo número de linhas e colunas de ambas as matrizes (BENIN, 2012).

3.6.4. Análise de variância - ANOVA

O objetivo da utilização da ANOVA neste trabalho é verificar se há diferença entre distribuição das variáveis originais (PH, OD, Condutividade, Temperatura, Turbidez, Nitrato e DQO) e se essas diferenças são estatisticamente significativas. Do ponto de vista prático, queremos avaliar se as diferenças nas medianas provocam alterações significativas nas variáveis estudadas.

A análise de variância (ANOVA) faz a comparação de mais do que dois grupos em amostras independentes quanto à distribuição. Esta comparação é feita a partir da análise da dispersão presente no conjunto de dados; daí a designação de análise de variância.

Quando as observações provêm de grupos classificados através de um só fator, denomina-se como análise de variância com um fator - *one-way* ANOVA. Só se pode considerar tal fator como sendo a causa das diferenças entre as médias se estiver garantida a homogeneidade das populações em relação a todos os outros fatores que poderiam ser relevantes para a explicação do fenômeno (LOESCH, C.; HOELTGEBAUM, M., 2017).

Em muitas situações práticas há mais do que um fator a influenciar os resultados das observações. Por outro lado, diz-se que a análise de variância tem tantos níveis ou efeitos quantos grupos distintos se considerem.

Para a aplicação da análise de variância, são necessárias algumas suposições, sendo elas:

- As observações são independentes;
- Os grupos comparados apresentam a mesma variância;
- Os erros são independentes e provenientes de uma distribuição normal com média igual a zero e variância constante.

A análise de variância é também uma forma de resumir um modelo de regressão linear, através da decomposição da soma dos quadrados para cada fonte de variação no modelo, e utilizando o teste F para testar a hipótese de que qualquer fonte de variação no modelo é igual a zero.

Quando a distribuição normal e homocedasticidade de erros forem violadas, a sabedoria convencional é recorrer a testes não paramétricos (HARRAR. S. W.; RONCHI. F.; SALMASO. L. A. 2019). Ao usar métodos não paramétricos para analisar experimentos fatoriais com medidas repetidas, o teste de classificação do tipo ANOVA ganhou popularidade devido à sua robustez e ao controle de erro tipo I apropriado (FAN, C.; ZHANG, D., 2017).

Entre os primeiros trabalhos sobre métodos de análise de variância sem distribuição normal está o de Mood (1950) e Mood e Brown (1951), com base em medianas. Para a classificação bidirecional com observações por célula, Mood (1950) discutiu testes assintóticos livres de distribuição para interação (o teste para interação não é completamente livre de distribuição), para efeitos de linha (assumindo que a interação é zero) e para efeitos de coluna (assumindo que a interação seja zero) (LEMMER, 1967).

Para *lay-outs* bidirecionais, em uma análise entre sujeitos do projeto de variância, o teste F paramétrico foi comparado com sete métodos não paramétricos: transformação de posição (RT), transformação normal inversa (INT), transformação de posição alinhada (ART), uma combinação de ART e INT, L de Puri e Senestatística, Van der Waerden e estatísticas do tipo ANOVA (ATS), Akritas e Brunners. O teste de Van der Waerden mostra o melhor desempenho geral (LUEPSEN, 2017, 2018).

Como os dados de monitoramento de alta frequência deste trabalho não possuem distribuição normal, antes de ser realizado o teste estatístico da ANOVA, foram ranqueados com passo horário.

A análise pela ANOVA foi realizada utilizando Van der Waerden e utiliza os testes de Tukey e post hoc, levando em consideração todos os dados pareados que

tinham informação em todas as variáveis consideradas. Essas variáveis foram normalizadas e tratadas de forma isolada, diferenciando:

- Estações: chuvosa (01/10 a 30/04) e seca (01/05 a 30/09);
- Período do dia: dia (06:00h às 17:59h) e noite (18:00h às 05:59h);
- Meses do ano;
- Localização dos pontos de monitoramento: montante (montante da PCH_{JG}), entre (jusante da PCH_{JG} e montante da PCH_{Rond} e jusante (jusante da PCH_{Rond}).

A ANOVA foi realizada por parâmetro de qualidade da água, que será analisada na sequência: PH, OD, Temperatura da água, Condutividade, NITRATO, DQO e Turbidez.

O teste de Tukey-Kramer foi utilizado, pois tem sido confirmado analiticamente, e, para dados não balanceados, fornece intervalos uniformemente mais curtos de uma etapa, quando se comparam dados pareados.

3.6.5. Changepoints e outliers

Em busca de identificação de pontos de intervenção, devido a alterações na média e de pontos que se encontram a uma distância anormal de outros valores, foram utilizadas rotinas computacionais do programa R que poderiam demonstrar uma possível alteração de comportamento dos dados. A ideia de verificar os pontos de mudança de comportamento dos dados na série era identificar se essas mudanças estavam relacionadas com a operação das PCHs.

Foi utilizado o pacote Changepoint do software R para a identificação de pontos de intervenção nas curvas das variáveis de qualidade da água. O pacote permite o estudo de pontos de intervenção através da escolha de qual algoritmo será utilizado, qual a distribuição utilizada e qual o critério de penalidade. Entre os métodos permitidos pelo pacote estão o de segmentação binária, segmentação por vizinhança e PELT.

A segmentação binária primeiro aplica uma estatística de teste de ponto de mudança único a todos os dados. Nesse sentido, se um ponto de mudança é identificado, os dados são divididos em dois no local do ponto de mudança. O procedimento de ponto de mudança único é repetido nos dois novos conjuntos de

dados, antes e depois da mudança. Se os pontos de mudança são identificados em dois novos conjuntos de dados, eles são divididos ainda mais. Esse processo continua até que nenhum ponto de mudança seja encontrado em nenhuma parte dos dados (CHEN, J; GUPTA. A., 2000).

Embora a segmentação por vizinhança seja exata, a complexidade computacional é consideravelmente maior do que a da segmentação binária e não foi utilizada.

O algoritmo PELT é semelhante ao algoritmo de vizinhança de segmento, na medida em que fornece uma segmentação exata. No entanto, mais eficiente em termos computacionais, devido ao uso de métodos dinâmicos (KILLICK, R; FEARNHEAD, P.; ECKLEY. I, 2012).

Nem o método da segmentação binária nem a aplicação do algoritmo PELT conseguiu identificar de forma satisfatória às mudanças de direção da série.

Tentou-se também identificar dentro das séries dados que pudessem ser considerados Outliers, a fim de verificar se esses pontos discrepantes estavam relacionados com a operação das PCHs. Para a identificação de Outliers foi utilizado o pacote OutlierKD do software R, que verifica a existência de outliers através da variância de seus pontos. Como a identificação também não foi satisfatória, os dados não foram apresentados.

CAPÍTULO 4

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

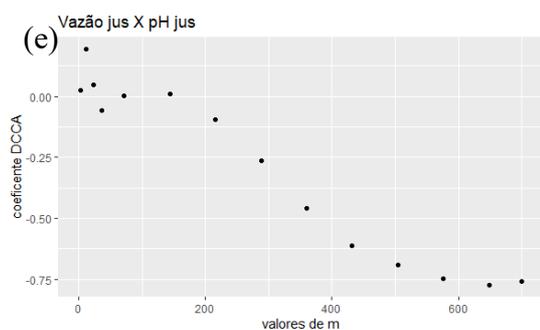
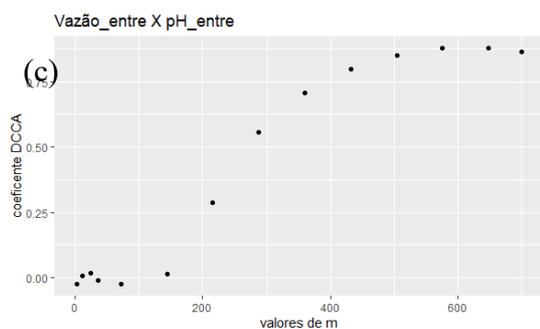
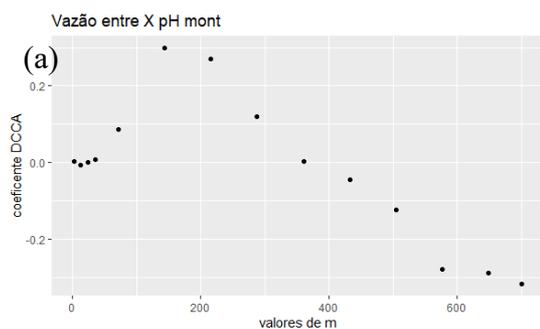
Para facilitar a discussão, inicialmente será feita a análise dos resultados por teste estatístico e, posteriormente, a análise conjunta.

Para facilitar o acompanhamento, todas as análises foram feitas na seguinte ordem: pH, OD, Temperatura da água, Condutividade, NITRATO, DQO e Turbidez; de montante para jusante, inicialmente na estação seca, depois, na chuvosa.

4.1. ANÁLISE DE COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO CRUZADA DESTENDENCIADA

4.1.1. pH

Estação Seca



Estação Chuvosa.

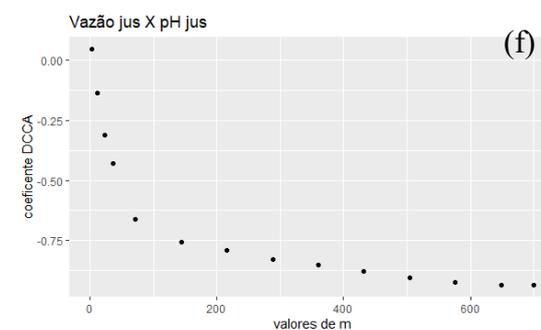
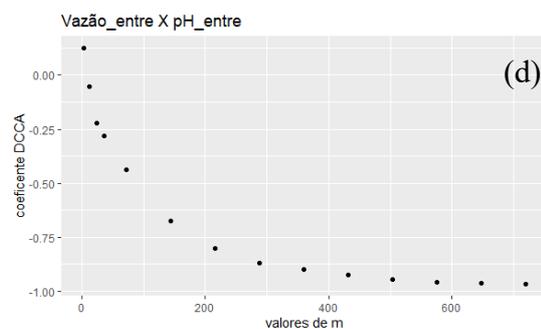
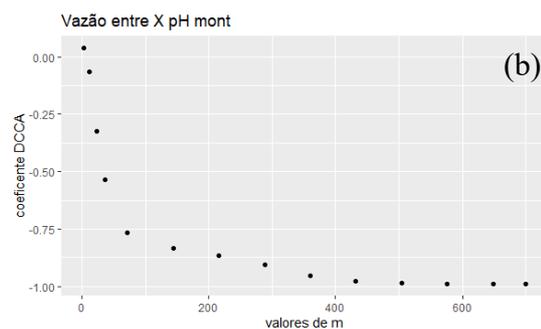


FIGURA 12: (a) ρ_{DCCA} da Vazão entre X pH montante; (b) ρ_{DCCA} da Vazão entre X pH entre; (c) ρ_{DCCA} da Vazão jusante X pH jusante, todos na estação seca; (d) ρ_{DCCA} da Vazão entre X pH montante; (e) ρ_{DCCA} da Vazão entre X pH entre; (f) ρ_{DCCA} da Vazão jusante X pH jusante, todos na estação chuvosa.

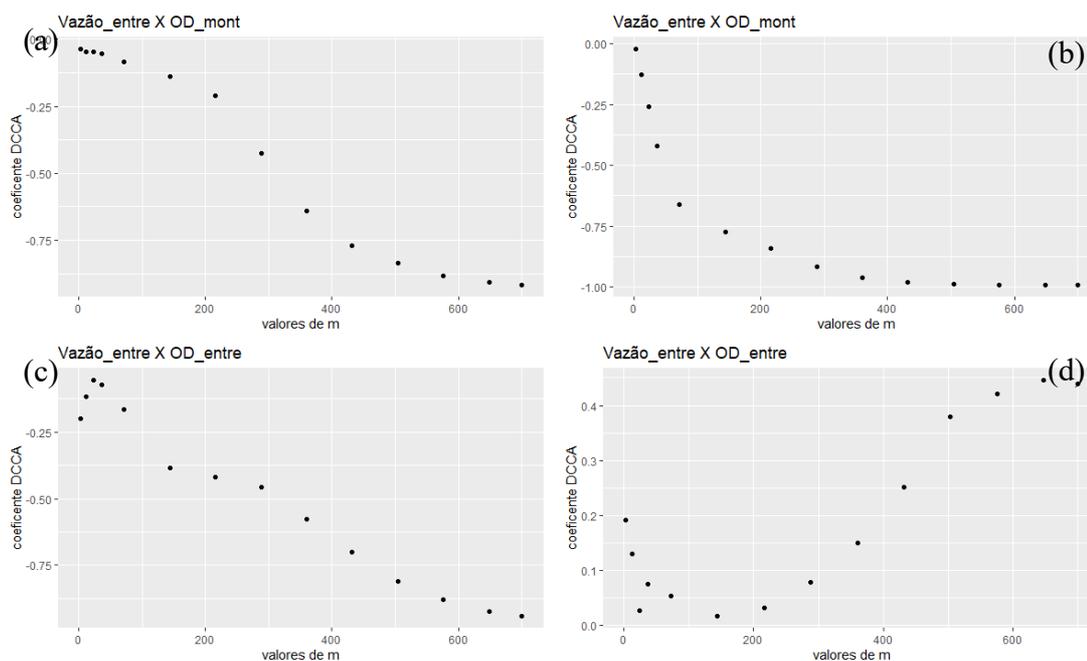
Na estação seca, o valor do ρ_{DCCA} do pH nos três pontos estudados tem um comportamento oscilante para pequenas janelas temporais (valores de m). Com o aumento de m, o ρ_{DCCA} tem uma forte relação positiva em A2, uma correlação negativa muito fraca em A1 e correlação forte em A3 (Fig. 12). Em A2, há aumento do valor do pH com o aumento da vazão. Em A1 e A3, o processo de fotossíntese intensificado, e íons de carbonato e bicarbonato aumentaram o consumo de CO_2 e conseqüentemente provocaram a elevação do pH da água. Comportamento semelhante também ocorre com o NITRATO na estação seca.

Na estação chuvosa, o nível da correlação cruzada entre o pH e a vazão tem um comportamento bem definido. A correlação é negativa e aumenta de valor quando se aumenta a janela temporal, sendo muito forte nos três pontos (A1, A2 e A3).

4.1.2. Oxigênio Dissolvido (OD)

Estação Seca

Estação Chuvosa



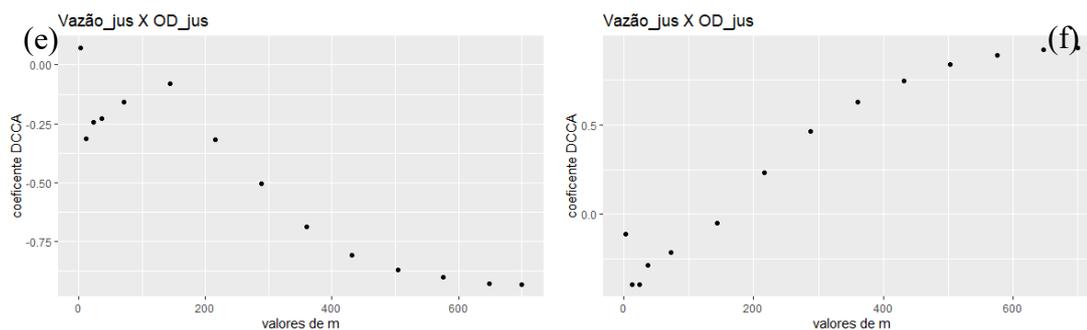
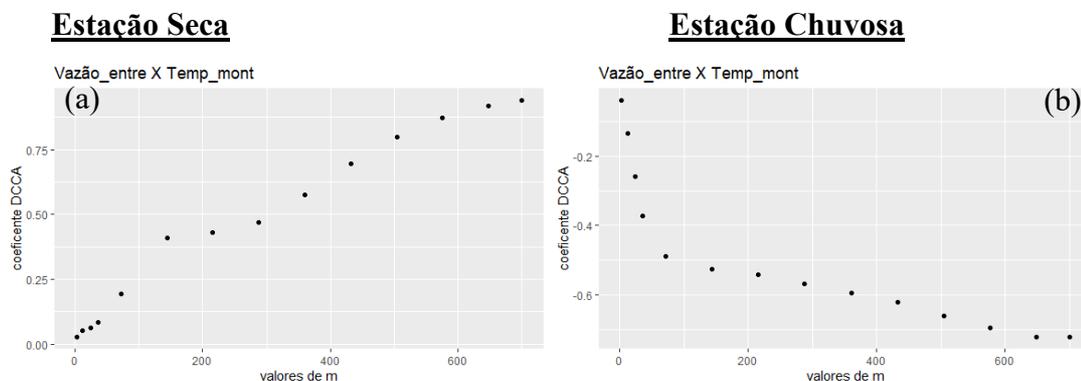


FIGURA 13: (a) ρ_{DCCA} da Vazão entre X OD montante, (b) ρ_{DCCA} da Vazão entre X OD entre, (c) ρ_{DCCA} da Vazão jusante X OD jusante, todos na estação seca, (a) ρ_{DCCA} da Vazão entre X OD montante, (b) ρ_{DCCA} da Vazão entre X OD entre, (c) ρ_{DCCA} da Vazão jusante X OD jusante, todos na estação chuvosa.

Na estação seca, o valor do ρ_{DCCA} do OD (Fig.13) em A1 tem correlação negativa e decresce até convergir próximo de -1. Em A2 e A3, há um comportamento inicial oscilatório para pequenos valores de m, com correlação crescente, convergindo para próximo de -0.9.

Na estação chuvosa, a correlação cruzada do OD em A1 tem um comportamento bem definido, que decresce continuamente com o aumento de m, estabilizando próximo de -1. Em A2, há um comportamento oscilatório, com correlação negativa para pequenos valores de m e, com $m = 144$, inverte e passa a ter correlação positiva com o aumento da janela temporal (m), estabilizando próximo de 0.45. Em A3, há correlação positiva que estabiliza próximo de 1.

4.1.3. Temperatura da água



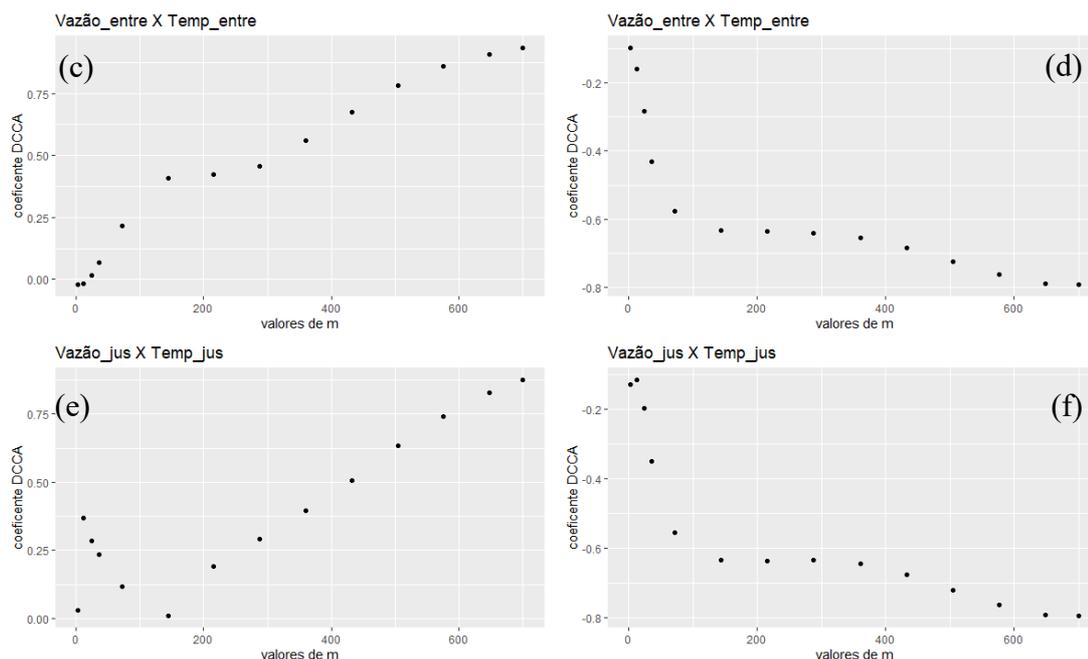


FIGURA 14: (a) ρ_{DCCA} da Vazão entre X Temperatura da água montante, (b) ρ_{DCCA} da Vazão entre X Temperatura da água entre, (c) ρ_{DCCA} da Vazão jusante X Temperatura da água jusante, todos na estação seca; (d) ρ_{DCCA} da Vazão entre X Temperatura da água montante, (e) ρ_{DCCA} da Vazão entre X Temperatura da água entre, (f) ρ_{DCCA} da Vazão jusante X Temperatura da água jusante, todos na estação chuvosa.

Na estação seca, o valor do ρ_{DCCA} da Temperatura da água (Fig.14) em A1 e A2 tem um comportamento contínuo, quase que linear, de correlação positiva, a qual cresce até convergir próximo de 0.9. Em A3, diferente de A1 e A2, até $m = 144$ apresenta correlação negativa, quando passa a ser linear, e de correlação positiva até convergir próximo de 0.9. O comportamento da temperatura da água na estação seca também sofre influência do controle de vazão das PCHs, o que é visto de forma mais pertinente em A3.

Na estação chuvosa, o nível da correlação cruzada da Temperatura da água em A1 tem um comportamento bem definido, com correlação negativa que aumenta quando se aumenta a janela, estabilizando próximo de -0.8. A mesma situação acontece em A2 e A3, sendo que converge respectivamente para -0.73 e -0.8.

No estação chuvosa, a temperatura da água tem correlação negativa com a vazão, quanto maior a vazão, menor a temperatura da água.

No estação seca, a temperatura da água está diretamente correlacionada com a vazão. Esse comportamento pode ser explicado devido ao volume diminuído de água nesse período.

4.1.4. Condutividade

Estação Seca

Estação Chuvosa

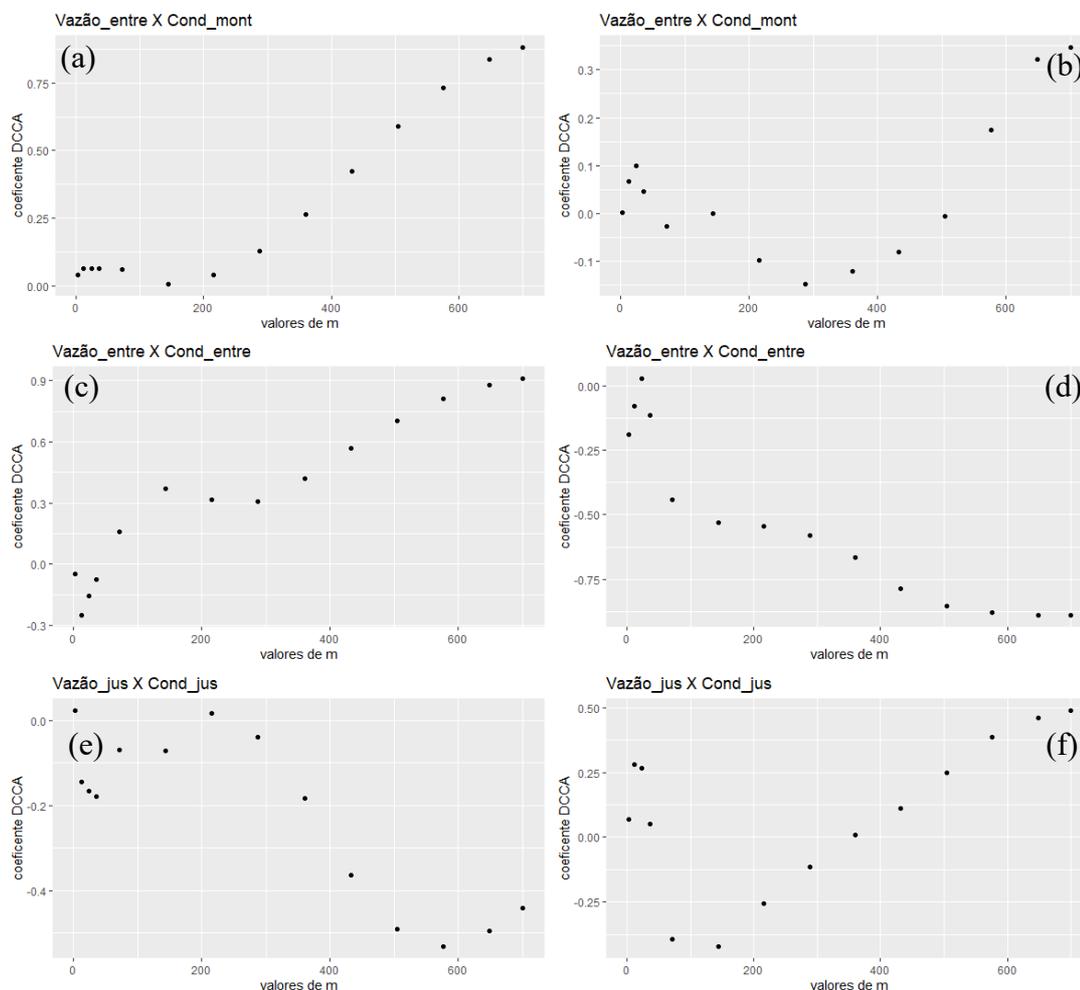


FIGURA 15: (a) ρ_{DCCA} da Vazão entre X Condutividade da água montante, (b) ρ_{DCCA} da Vazão entre X Condutividade da água entre, (c) ρ_{DCCA} da Vazão jusante X Condutividade da água jusante, todos na estação seca; Vazão entre X Condutividade da água entre, (f) ρ_{DCCA} da Vazão jusante X Condutividade da água jusante, todos na estação chuvosa.

A Condutividade na estação seca oscila com o tamanho da janela, principalmente em A3, o que pode acontecer devido à ação do controle de vazão das PCHs. O nível da correlação cruzada em A3 oscila e converge para -0,4, em sentido contrário de A1 e A2, que apresentam correlação positiva.

Em A1, a condutividade está fortemente correlacionada com a vazão em ambas as estações. Em A2, ela está diretamente correlacionada na seca e inversamente na

estação chuvosa, em que ambas as correlações são fortes. Em A3, a condutividade apresenta fraca correlação com a vazão.

4.1.5. NO₃⁻ (Nitrato)

Estação Seca

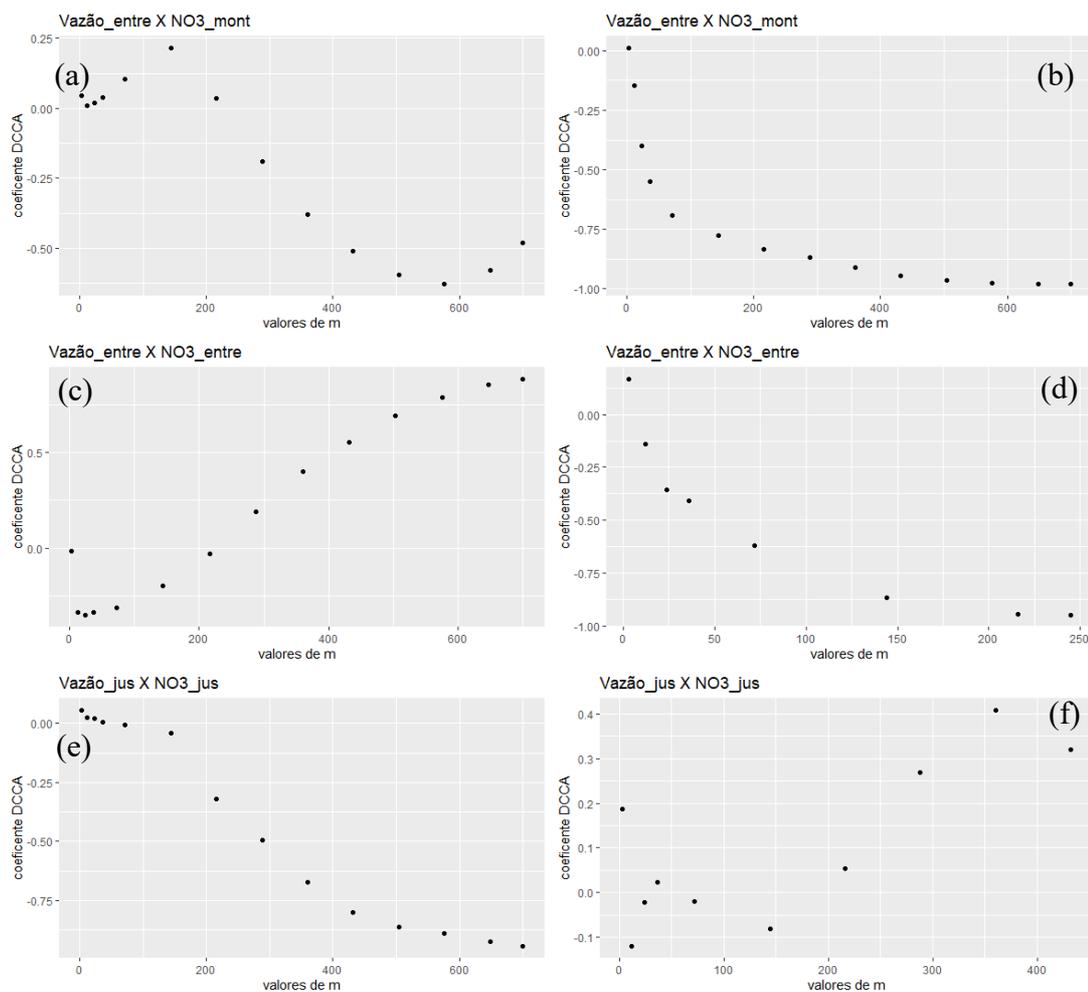


FIGURA 16: (a) ρ_{DCCA} da Vazão entre X NITRATO montante, (b) ρ_{DCCA} da Vazão entre X NITRATO entre, (c) ρ_{DCCA} da Vazão jusante X Nitrato jusante, todos na estação seca, (d) ρ_{DCCA} da Vazão entre X Nitrato montante, (e) ρ_{DCCA} da Vazão entre X Nitrato entre, (f) ρ_{DCCA} da Vazão jusante X Nitrato jusante, todos na estação chuvosa.

O comportamento do Nitrato na estação seca é diferente para os três pontos. Oscila em A1 convergindo com moderada correlação negativa, em A2 tem forte correlação positiva e em A3 apresenta forte correlação negativa.

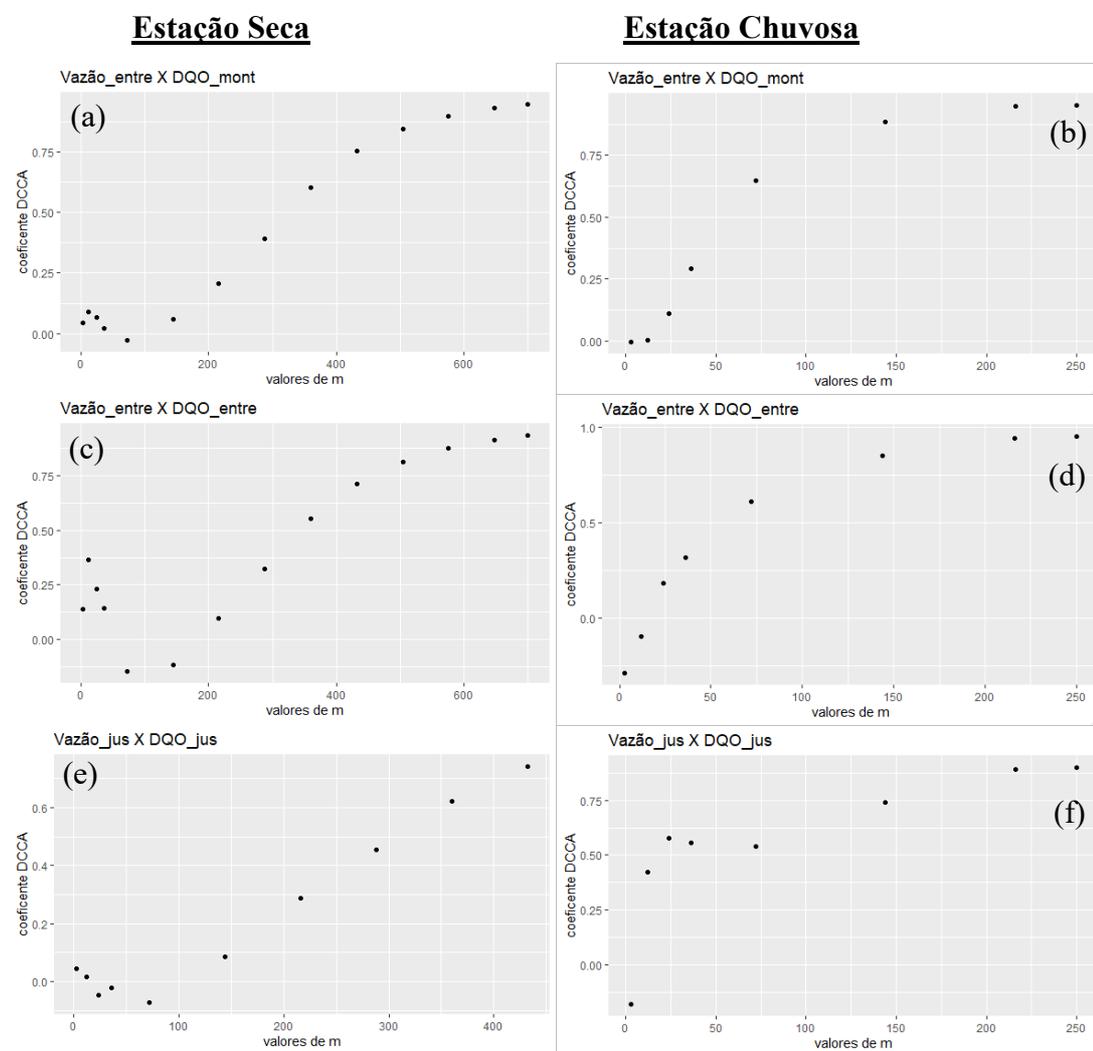
Esse comportamento na estação seca pode estar correlacionado com o represamento e acumula Nitrato, que acaba sendo liberado junto com o aumento da

vazão em A2. A diminuição do nitrato em A3 pode ocorrer devido à perda no trecho natural, por decantação ou para algas, antes da tomada d'água da PCH_{Rond}.

A correlação cruzada de Nitrato com a vazão na estação chuvosa em A1 e A2 sugere uma perfeita correlação negativa.

Em A3, há uma oscilação no comportamento de ρ_{DCCA} com baixa correlação (positiva) com a vazão, não apresentando o mesmo comportamento do trecho natural (A1).

4.1.6. DQO



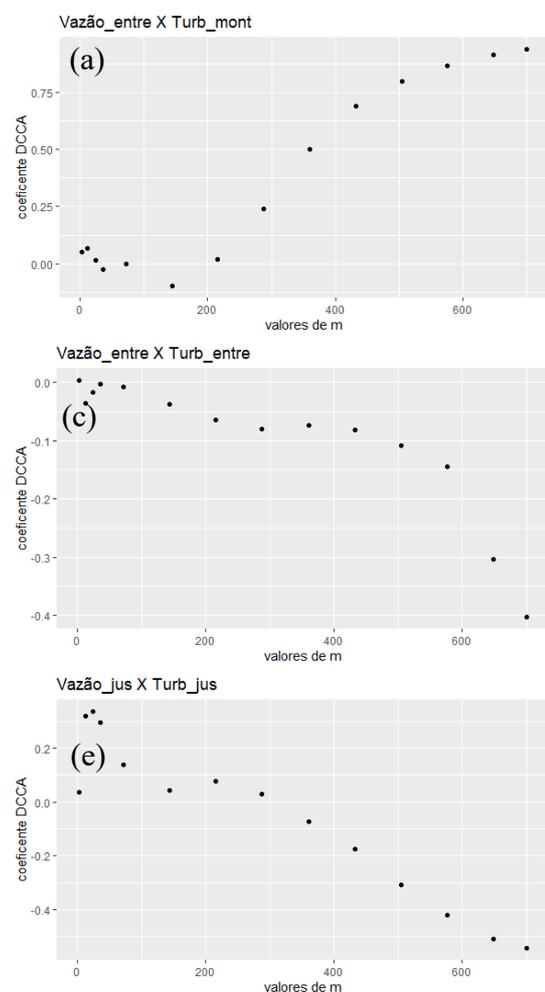
O comportamento da correlação cruzada do DQO na estação seca é similar nos três pontos.

Na estação chuvosa, o DQO apresenta comportamentos similar de ρ_{DCCA} nos três pontos, com correlação positiva forte.

Em ambas as estações, sugere-se que o DQO não modifica o seu comportamento com a vazão. Esse fato pode estar relacionado com a baixa carga de DQO presente no ribeirão Ponte de Pedra.

4.1.7. Turbidez

Estação Seca



Estação Chuvosa

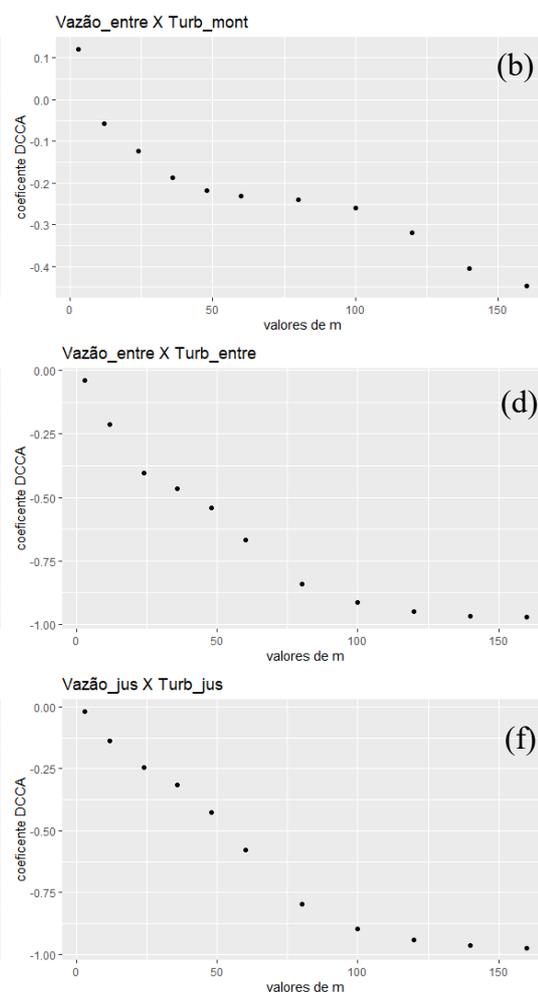


FIGURA 18: (a) ρ_{DCCA} da Vazão entre X Turbidez montante, (b) ρ_{DCCA} da Vazão entre X Turbidez entre, (c) ρ_{DCCA} da Vazão jusante X Turbidez jusante, todos na estação seca; (d) ρ_{DCCA} da Vazão entre X Turbidez montante, (e) ρ_{DCCA} da Vazão

entre X Turbidez entre, (f) ρ_{DCCA} da Vazão jusante X Turbidez jusante, todos na estação chuvosa.

O nível de correlação cruzada da turbidez na estação seca apresenta comportamentos distintos de ρ_{DCCA} em A1 e A2, A3, que cresce positivamente em A1 e decresce em A2 e A3.

Na estação chuvosa, o ρ_{DCCA} sugere uma anticorrelação muito forte. A turbidez na estação chuvosa não altera o comportamento, mas aumenta (dobra) a anticorrelação após as PCHs.

4.2.MATRIZ DE CORRELAÇÃO

4.2.1. A1 – Montante da PCH Engº José Gelázio da Rocha

Em A1, no ponto ainda sem interferência das barragens, considerando apenas os dados da estação seca o Nitrato apresenta correlação fraca (0,47) com a temperatura e condutividade e correlação moderada negativa com o pH (0,51).

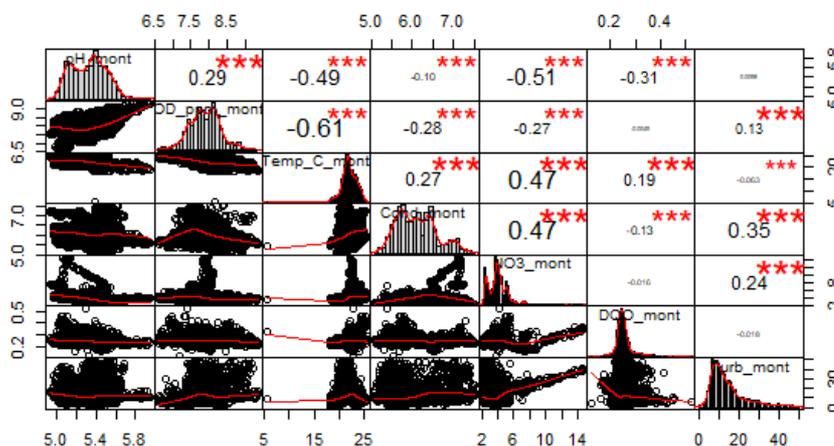


FIGURA 19: Matriz de Correlação de A1 na estação seca, parte inferior: gráfico de distribuição, no centro: Histograma, parte superior: coeficiente de correlação de postos de Spearman.

De forma geral, em condições naturais, na estação seca, as correlações são muito fracas. A maior correlação existente (-0,61) é moderada e negativa entre o OD e a Temperatura.

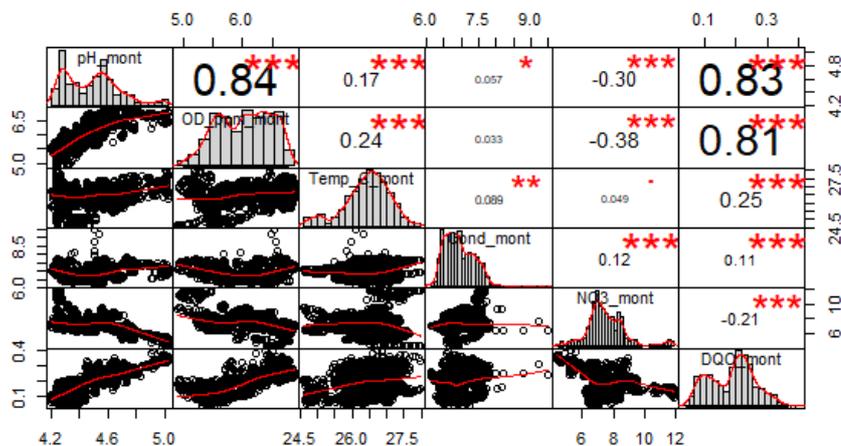


FIGURA 20: Matriz de Correlação de A1 na estação chuvosa, parte inferior: Gráfico de distribuição, no centro: Histograma, parte superior: coeficiente de correlação de postos de Spearman.

Na estação chuvosa, o comportamento do DQO (Fig, 20) altera e apresenta correlação forte (0,81 e 0,83) com OD e pH, mas mantém a correlação fraca ou muito fraca com a Temperatura, Condutividade e Nitrato.

O pH também apresentou correlação forte (0,84) com o OD.

O OD no período de chuva em condições naturais tem uma correlação muito fraca com a Temperatura.

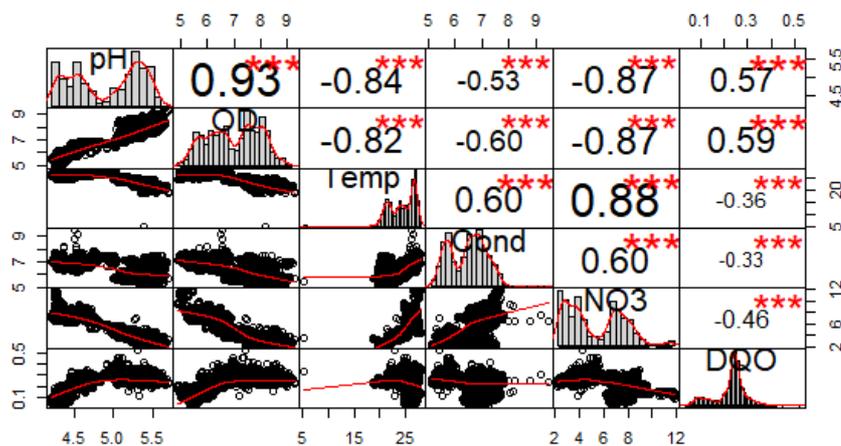


FIGURA 21: Matriz de Correlação de A1, parte inferior: gráfico de distribuição, no centro: Histograma, parte superior: coeficiente de correlação de postos de Spearman.

Em A1, quando considerados os dados de ambas as estações chuvosa e seca (Fig. 21), no ponto ainda sem interferência das barragens, onde as condições naturais estão mais preservadas, as variáveis estão mais correlacionadas.

Há correlação forte entre várias variáveis. Ela é positiva entre do pH e OD (muito forte) e entre Temperatura e Nitrato, sendo negativa entre pH e Nitrato, e entre OD e Nitrato.

Apenas o DQO apresenta correlações fracas.

4.2.2. A2 – Jusante da PCH Engº José Gelázio da Rocha

Em A2, no ponto após a barragem da PCH_{JG}, considerando apenas os dados do período seco, podemos observar que a Condutividade apresenta forte correlação (0,75 e 0,83) com a temperatura e com Nitrato. A correlação é moderada entre a Condutividade e Turbidez, e entre a Temperatura e Nitrato. Os demais parâmetros apresentaram correlação fraca ou muito fraca.

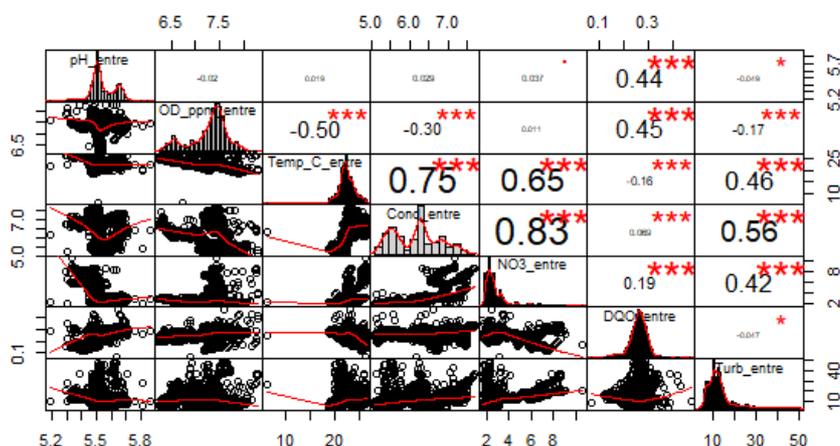


FIGURA 22: Matriz de Correlação de A2 na estação seca, parte inferior: gráfico de distribuição, no centro: Histograma, parte superior: coeficiente de correlação de postos de Spearman.

O pH chama a atenção por apresentar apenas uma correlação fraca com o DQO e, com os demais parâmetros, ausência de correlação.

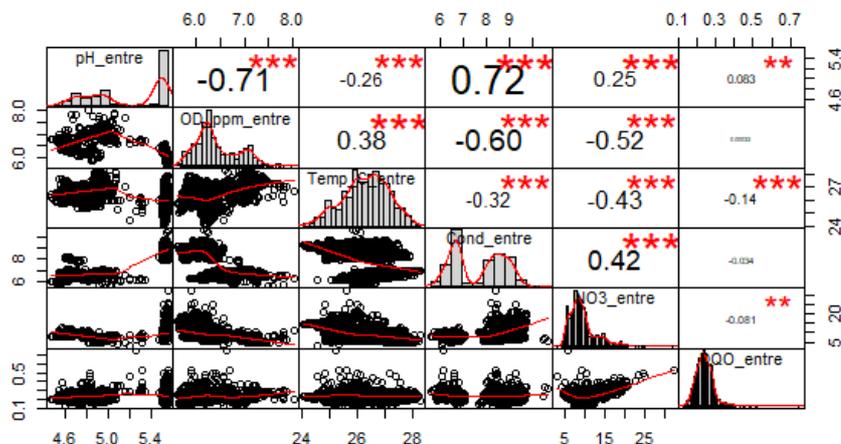


FIGURA 23: Matriz de Correlação de A2 na estação chuvosa, parte inferior: gráfico de distribuição, no centro: Histograma, parte superior: coeficiente de correlação de postos de Spearman.

Em A2, no ponto após a barragem da PCH_{JG}, considerando apenas os dados da estação chuvosa, observam-se na Figura 23 resultados opostos aos encontrados em A1 (Fig. 20) no mesmo período.

A forte correlação entre pH e DQO e OD e DQO que existia em A1 deixa de existir em A2 nessa estação.

Há uma fraca correlação positiva (0,38) entre OD e Temperatura da água, mas uma forte correlação negativa entre OD e pH (0,72), indicando uma mudança no comportamento de OD. Esse comportamento oposto se repete entre pH e OD e pH e Condutividade.

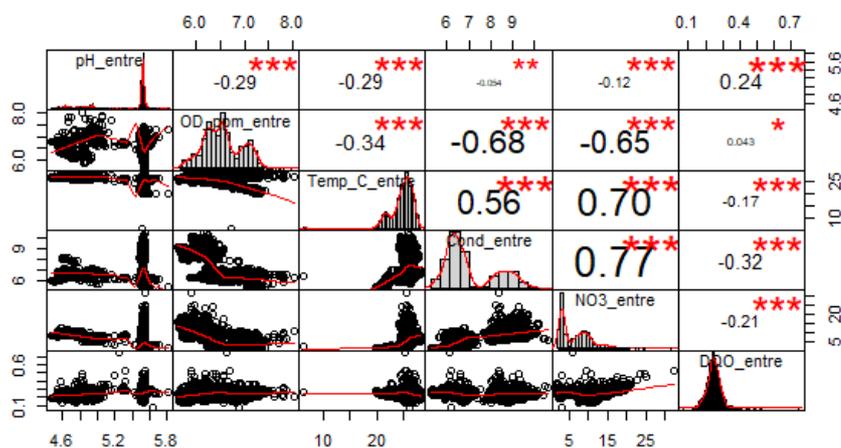


FIGURA 24: Matriz de Correlação de A2, parte inferior: gráfico de distribuição, no centro: Histograma, parte superior: coeficiente de correlação de postos de Spearman.

Em A2, no ponto após a barragem da PCH_{JG}, considerando todos os dados disponíveis na Figura 24, podemos observar uma mudança das correlações quando comparamos com os dados de A1 (Fig. 21).

As correlações entre as variáveis Condutividade, Nitrato, OD e Temperatura seguiram os mesmos padrões de A1, sendo que a única correlação forte acontece entre a Condutividade e Nitrato.

As demais correlações que eram fortes em A1 ficaram fracas ou muito fracas.

4.2.3. A3 – Jusante da PCH Eng^o José Gelázio da Rocha

Em A3, a jusante da PCHRond considerando apenas os dados da estação seca, podemos observar na Figura 25 que o Nitrato apresenta correlação moderada (0,51) com a temperatura e forte (0,72) com condutividade, como em A2 (Fig. 22). A condutividade e temperatura da água têm forte correlação (0,70) entre si (como em A2). Em A1, aconteceram as mesmas correlações, mas elas são moderadas.

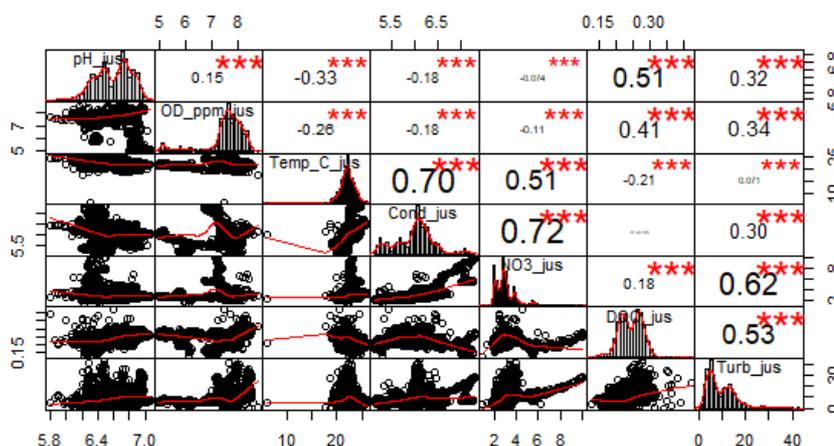


FIGURA 25: Matriz de Correlação de A3 na estação seca, parte inferior: gráfico de distribuição, no centro: Histograma, parte superior: coeficiente de correlação de postos de Spearman.

A Turbidez apresenta moderada correlação (0,47, 0,53) com condutividade e DQO e forte correlação (0,62) com Nitrato. Em A2 estas correlações foram fortes, e em A1 só aconteceram com a Condutividade e Nitrato e foram moderadas.

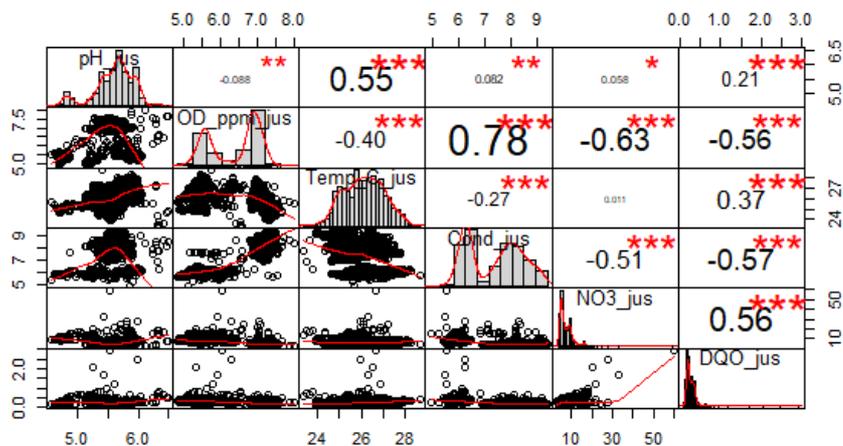


FIGURA 26: Matriz de Correlação de A3 na estação chuvosa, parte inferior: gráfico de distribuição, no centro: Histograma, parte superior: coeficiente de correlação de postos de Spearman.

Em A3, a jusante da PCH_{Rond}, considerando apenas os dados da estação chuvosa, podemos observar na figura 26 que quando comparamos com A1 (Fig. 20), houve uma inversão de comportamento (sinal) das correlações entre pH x OD, OD x Temperatura, Condutividade x DQO e Nitrito x DQO, sendo que algumas correlações que eram fortes em A1 ficaram fracas ou moderadas.

Quando comparamos com A2 (Fig. 23), houve uma inversão de comportamento (sinal) das correlações entre Condutividade x OD; OD x DQO e Condutividade x NO₃, correlações diferentes das que invertem entre A1 x A3.

Quando comparamos com o comportamento da estação seca (Fig. 25) e chuvosa (Fig.26) de A3, vemos um comportamento quase que oposto, com correlações muito diferentes. Apenas nesta estação e neste ponto, em A3, foi verificada uma correlação negativa entre a Condutividade e o Nitrito.

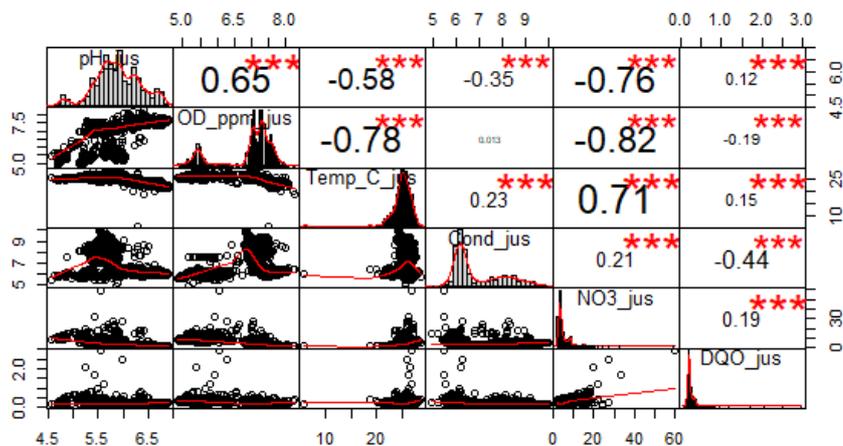


FIGURA 27: Matriz de Correlação de A3, parte inferior: gráfico de distribuição, no centro: Histograma, parte superior: coeficiente de correlação de postos de Spearman.

Ao comparamos A3 (Fig 27) com A1 (Fig. 21), com exceção do DQO, que inverte o comportamento com OD, Temperatura e Nitrato, todas as correlações mantiveram o sinal e diminuíram a correlação.

Quando comparamos A3 (Fig. 27) com A2 (Fig. 24), verificamos que as correlações mantêm o sinal, com exceção de pH x OD, a qual volta a ter correlação positiva em A3 (0,65).

Consideramos todas as observações, temos em A1 uma correlação muito forte entre o pH e OD e 5 correlações fortes, sendo uma positiva e 4 negativas. Em A2, foram apenas 2 correlações positivas fortes e em A3 foram 4 correlações fortes, sendo 1 positiva e 3 negativas.

4.3. ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS (PCA)

Abaixo estão os gráficos e tabelas da análise de componentes principais dos dados dos pontos a montante da PCH_{JG} (A1), a jusante da PCH_{JG} (A2) e a jusante da PCH_{Rond} (A3).

4.3.1. A1 estação seca – Montante da PCH Eng^o José Gelázio da Rocha

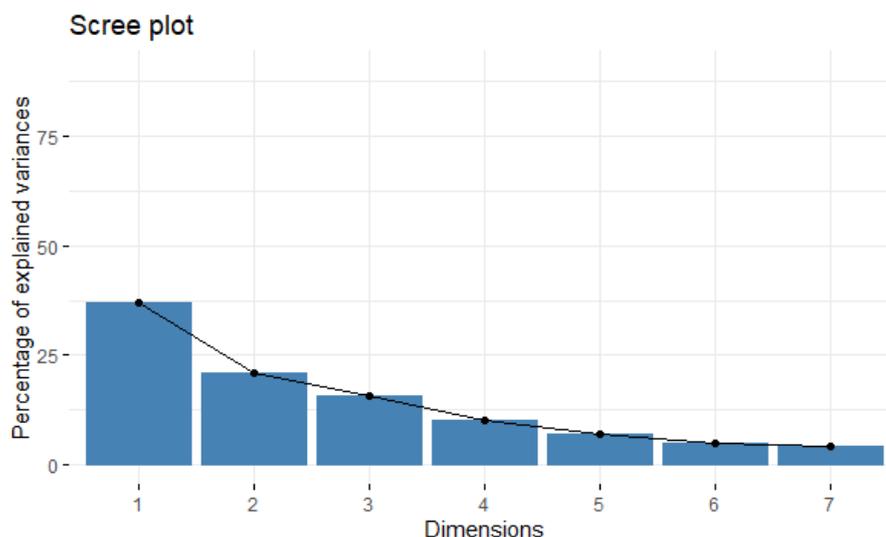


FIGURA 28: Diagrama de declividade da variância das componentes principais de A1 na estação seca.

O gráfico diagrama de declividade da variância das componentes principais (Fig. 28) mostra o quanto a variância as primeiras componentes representam. A primeira componente explica a maior parte da variância, depois a segunda é a que possui maior poder de explicação e assim por diante. Juntas, todas as componentes explicam toda a variabilidade dos dados.

TABELA 10: Tabela de autovalores e variâncias das componentes principais de A1 na estação seca.

	<i>AUTOVALORES</i>	<i>VARIANCIA %</i>	<i>VARIANCIA ACUMULADA %</i>
<i>Dim 1</i>	2,578	36,827	36,827
<i>Dim 2</i>	1,471	21,014	57,841
<i>Dim 3</i>	1,107	15,821	73,662
<i>Dim 4</i>	0,710	10,143	83,805
<i>Dim 5</i>	0,492	7,034	90,839
<i>Dim 6</i>	0,354	5,051	95,890
<i>Dim 7</i>	0,288	4,110	100,000

Na Tabela 10 verifica-se que a primeira dimensão explica 36,8% da variabilidade dos dados, enquanto a segunda explica 21%, onde a soma das duas

primeiras dimensões explicam 57,48% da variabilidade. Se considerarmos como critério autovalores maiores que 1 (KAISER, H. F., 1974, MATOS, D. A. S., RODRIGUES, E. C., 2019), teríamos que considerar uma terceira dimensionalidade como mínimo de fatores que maximiza a quantidade de variância total explicada. Considerando um patamar de 60% da variância acumulada como mínimo aceitável para explicar a variância, seria indicado considerar uma terceira dimensionalidade. Neste caso, para facilidades computacionais, foram consiradas apenas duas dimensões.

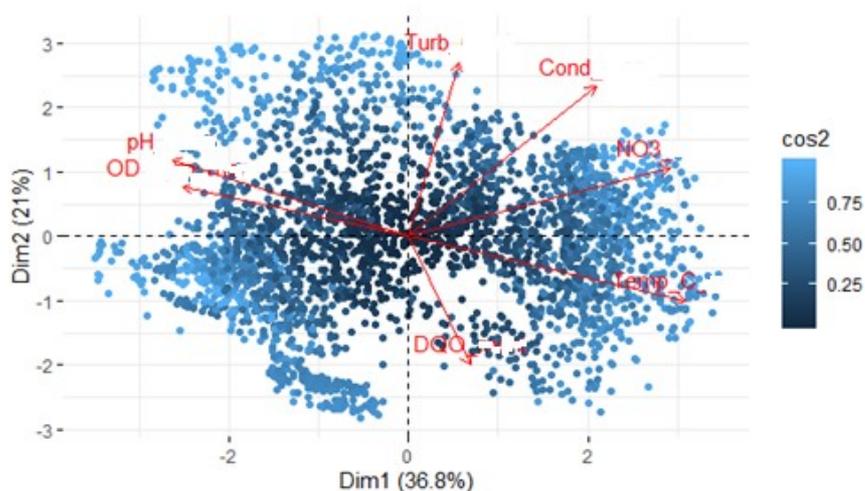


FIGURA 29: Ordenação biplot pela Análise de Componentes Principais (ACP) das medidas geradas em A1 na estação seca, a partir de sete variáveis das variáveis de qualidade de água.

Na Figura 29 de ordenação biplot das medidas, observa-se que existe uma classificação da influência das medidas no resultado da PCA. O valor do cosseno quadrado das variáveis (\cos^2) que estão representadas por pontos mais claros são as que mais influenciam na direção das variáveis. Nesse trabalho, devido ao grande número de dados trabalhados, não foi possível identificar quais são esses dados e quando eles ocorreram.

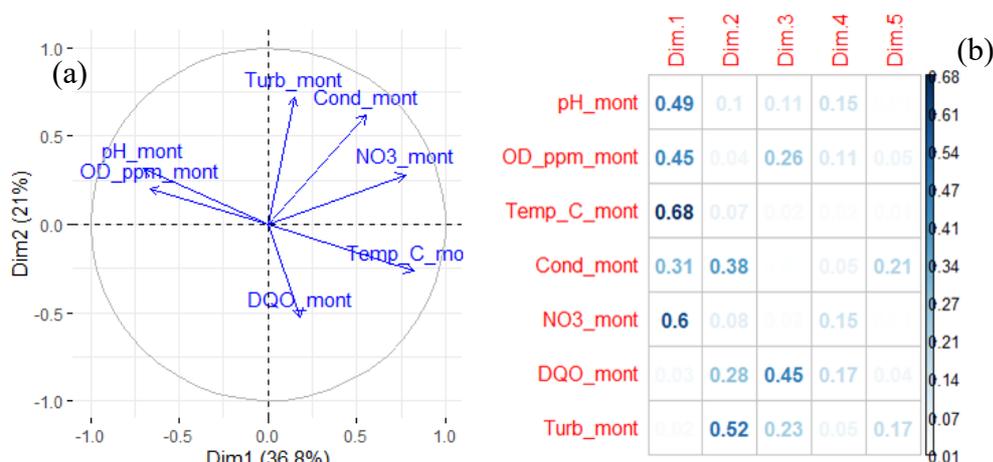


FIGURA 30: (a) Mapa perceptual das medidas geradas em A1 na período seco, a partir de sete variáveis das variáveis de qualidade de água, (b) Tabela de dimensionalidade das variáveis de qualidade da água em A1 na período seco.

No mapa perceptual (Fig. 30a), temos apenas as duas maiores dimensionalidades, onde a primeira dimensão explica 36,8%, e a segunda 21,01% da variabilidade dos dados. Nesse mapa também está a representação dos fasores das variáveis. O DQO (terceira maior dimensionalidade) explica que 15,82% ficou fora dessa representação.

Pode-se observar que a Turbidez, Condutividade e Nitrato são correlacionados positivamente entre si. O que significa que o aumento de uma das variáveis tende a aumentar as outras duas que estão no mesmo quadrante. No mapa, também é possível ver que pH e OD estão inversamente correlacionados com a temperatura da água.

A primeira componente dimensional, a temperatura da água, influencia os demais parâmetros. Logo, quando há variação do valor dessa componente, há variação das correlação entre os demais parâmetros com a temperatura da água e vice-versa.

A segunda componente dimensional pode ser interpretada como um indicador para comparar Nitrato com os demais parâmetros da água,

De forma geral, as correlações em A1 na estação seca são moderadas, fracas ou muito fracas, sendo que a maior correlação é entre a temperatura e OD (Fig.19), e isto é verificado no mapa perceptual (Fig. 30a) e na menor explicação das variâncias.

4.3.2. A1 estação chuvosa – Montante da PCH Engº José Gelázio da Rocha

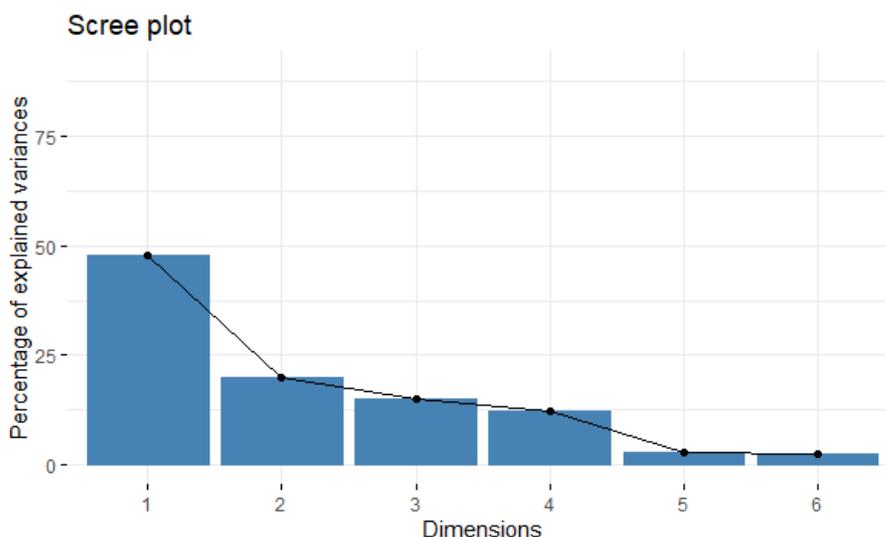


FIGURA 31: Diagrama de declividade da variância das componentes principais de A1 na estação chuvosa.

O gráfico diagrama de declividade da variância das componentes principais (Fig. 31) mostra o quanto a variância as primeiras componentes representam. A primeira componente explica a maior parte da variância, depois a segunda é a que possui maior poder de explicação e assim por diante. Juntas, todas as componentes explicam toda a variabilidade dos dados.

TABELA 11: Tabela de autovalores e variâncias das componentes principais de A1 na estação chuvosa.

	<i>AUTOVALORES</i>	<i>VARIANCIA %</i>	<i>VARIANCIA ACUMULADA %</i>
<i>Dim.1</i>	2,865	47,743	47,743
<i>Dim.2</i>	1,185	19,746	67,489
<i>Dim.3</i>	0,894	14,908	82,397
<i>Dim.4</i>	0,729	12,145	94,542
<i>Dim.5</i>	0,174	2,897	97,439
<i>Dim.6</i>	0,154	2,561	100,000

Na Tabela 11, verifica-se que a primeira dimensão explica 47,74% da variabilidade dos dados, enquanto a segunda explica 19,74%, explicando, assim,

67,48% da variabilidade. As duas primeiras componentes principais já representam mais de 60% e são as que possuem autovalores maiores que 1. Podemos considerar as duas dimensionalidades como o mínimo de fatores que maximiza a quantidade de variância total explicada.

Na Figura 32, temos as medidas das duas primeiras componentes principais no espaço, com pontos nomeados das variáveis em A1 na estação chuvosa, conforme será mostrado a seguir.

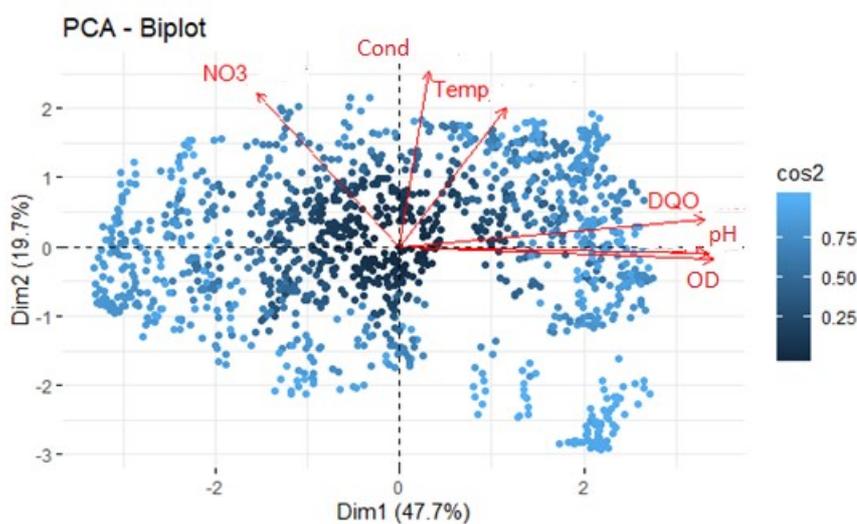


FIGURA 32: Ordenação biplot pela Análise de Componentes Principais (ACP) das medidas geradas em A1 na estação chuvosa, a partir de seis variáveis de qualidade de água.

No gráfico de ordenação biplot das medidas, o valor do cosseno quadrado das variáveis (\cos^2), onde estão os pontos mais claros, são os que mais influenciam na direção das variáveis.

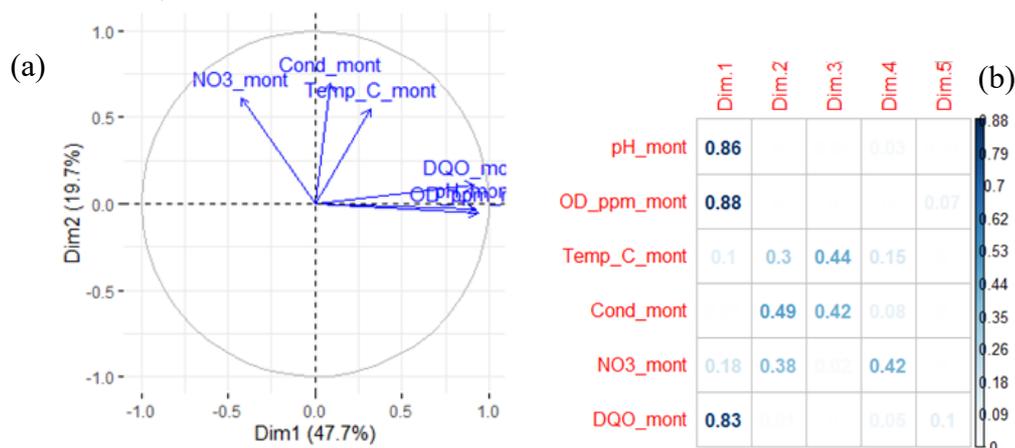


FIGURA 33: (a) Mapa perceptual das medidas geradas em A1 na estação chuvosa. a partir de seis variáveis de qualidade de água. (b) Tabela de dimensionalidade das variáveis de qualidade da água em A1 na estação chuva.

No mapa perceptual (Fig. 33a), temos apenas as duas maiores dimensionalidades, a primeira dimensão explica 47,74% e a segunda explica 19,74% da variabilidade dos dados e a representação dos fasores das variáveis.

Pode-se observar que o DQO, OD e pH são fortemente correlacionados positivamente entre si (Fig33a; Fig 20), o que significa que o aumento do OD tende a aumentar os outros dois parâmetros que estão no mesmo quadrante. Ao mesmo tempo, pode-se observar que esses parâmetros são correlacionados de forma positiva fraca com a temperatura e negativamente correlacionados com Nitrato.

A primeira componente dimensional pode ser interpretada como uma comparação das concentrações do DQO, OD e pH com os demais elementos medidos. Logo, quanto menor o valor dessa componente, maiores serão DQO, OD e pH em relação aos demais parâmetros da água e vice-versa.

A segunda componente dimensional pode ser interpretada como um indicador para comparar a condutividade, temperatura da água e Nitrato com os demais parâmetros da água. Quanto menor os valores desse índice, maiores são as concentrações desses parâmetros (condutividade, temperatura da água e Nitrato) em relação às concentrações dos demais elementos e vice-versa.

4.3.3. A1 estação seca e chuvosa – Montante da PCH Eng° José Gelázio da Rocha

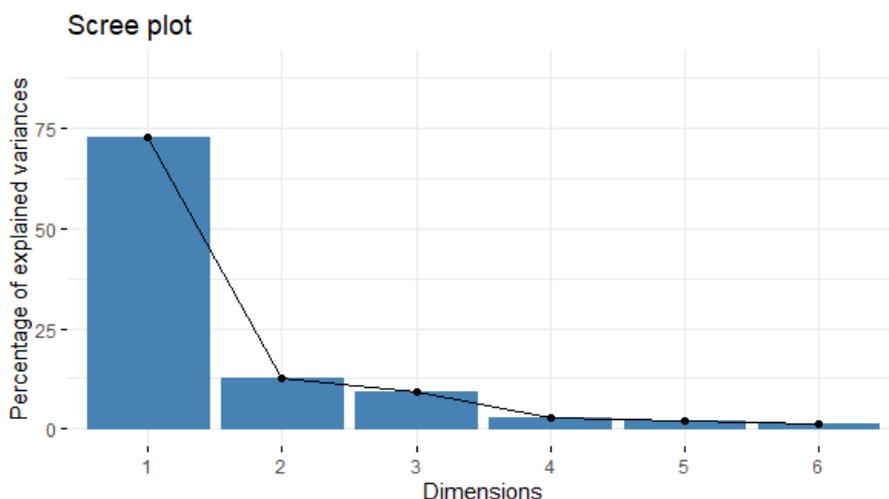


FIGURA 34: Diagrama de declividade da variância das componentes principais de A1 estação seca e chuvosa,

O gráfico do diagrama de declividade da variância das componentes principais (Fig. 34) mostra o quanto a variância das primeiras componentes representam. A primeira componente explica a maior parte da variância, depois a segunda é a que possui maior poder de explicação e assim por diante. Juntas, todas as componentes explicam toda a variabilidade dos dados.

TABELA 12: Tabela de autovalores e variâncias das componentes principais de A1 na estação seca e chuvosa.

	<i>AUTOVALORES</i>	<i>VARIANCIA %</i>	<i>VARIANCIA ACUMULADA %</i>
<i>Dim.1</i>	4,375	72,909	72,909
<i>Dim.2</i>	0,750	12,494	85,402
<i>Dim.3</i>	0,544	9,073	94,476
<i>Dim.4</i>	0,157	2,617	97,093
<i>Dim.5</i>	0,113	1,888	98,981
<i>Dim.6</i>	0,061	1,019	100,000

Na Tabela 12, verifica-se que a primeira dimensão explica 72,90% da variabilidade dos dados, enquanto a segunda explica 12,49%. Somadas, as duas primeiras dimensões explicam 85,40% da variabilidade. A primeira componente principal já representa mais de 60% e é a única que possui autovalores maiores que 1.

Aqui, foi considerado o critério do diagrama de inclinação (Scree test), que aponta como ponto de inflexão a segunda dimensionalidade (FIELD, 2009; CATTELL, 1966). Nesse caso podemos considerar as duas dimensionalidades como o mínimo de fatores que maximiza a quantidade de variância total explicada.

Na Figura 35, temos as medidas das duas primeiras componentes principais no espaço, com pontos nomeados das variáveis em A1 na estação seca e chuvosa, conforme será mostrado a seguir.

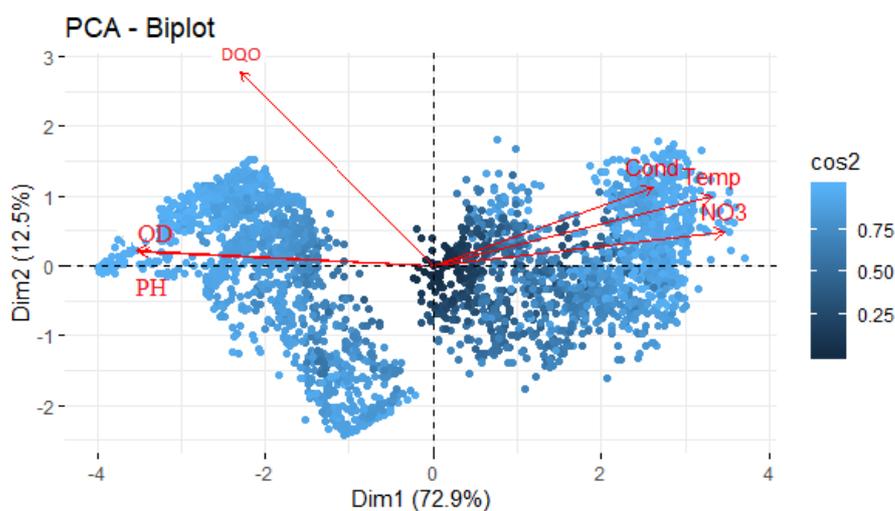


FIGURA 35: Ordenação biplot pela Análise de Componentes Principais (ACP) das medidas geradas em A1 na estação seca e chuvosa, a partir de seis variáveis de qualidade de água.

No gráfico de ordenação biplot das medidas, temos a distribuição espacial dos pontos, onde se pode observar que existe uma classificação da influência das medidas no resultado da PCA. As medidas que estão mais claras são as que mais influenciam na direção das variáveis.

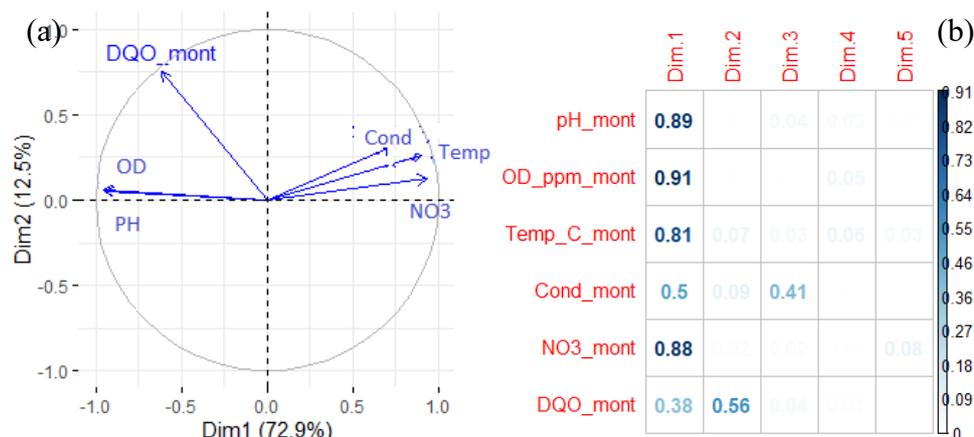


FIGURA 36: (a) Mapa perceptual das medidas geradas em A1 na estação seca e chuvosa, a partir de seis variáveis de qualidade de água, (b) Tabela de dimensionalidade das variáveis de qualidade da água em A1 na estação seca e chuvosa.

No mapa perceptual (Fig. 36a) temos apenas as duas maiores dimensionalidades, a primeira dimensão explica 72,9%, e a segunda explica 12,5% da variabilidade dos dados e a representação dos fasores das variáveis.

Pode-se observar que o OD e pH estão muito fortemente correlacionados positivamente entre si (0,93). A temperatura, condutividade e Nitrato também estão fortemente correlacionados entre si, o que significa que o aumento de uma das variáveis tende a aumentar os outros dois que estão no mesmo quadrante. Ao mesmo tempo o aumento da temperatura irá diminuir OD e pH, que estão no quadrante oposto.

O DQO apresenta correlação moderada com pH e OD e correlação fraca com os demais.

A primeira componente dimensional pode ser interpretado como uma comparação das concentrações do OD com todos os componentes, com a exceção do DQO, onde pH e OD estão em anticorrelação com condutividade, com a Temperatura e com o Nitrato.

A segunda componente dimensional pode ser interpretada como um indicador para comparar o DQO com os demais parâmetros da água.

4.3.4. A2 estação seca – Jusante da PCH Eng^o José Gelázio da Rocha

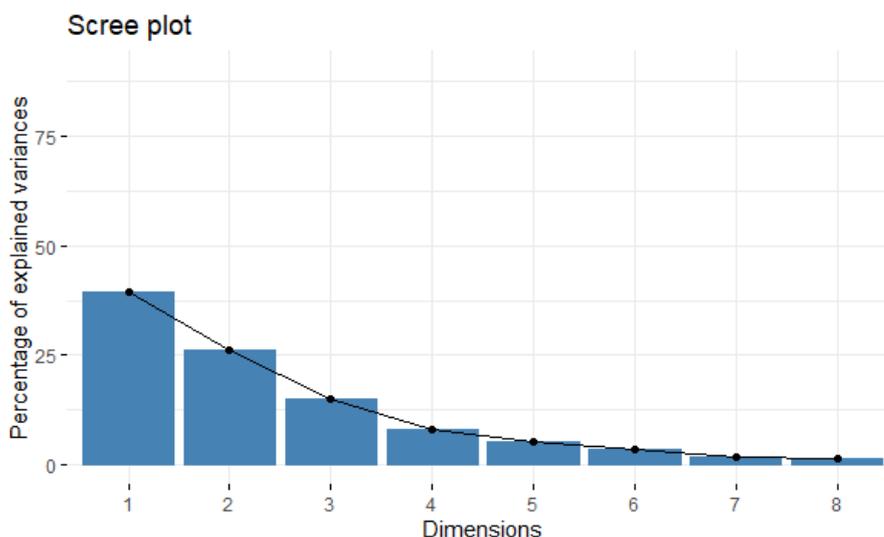


FIGURA 37: Diagrama de declividade da variância das componentes principais de A2 estação seca.

O gráfico do diagrama de declividade da variância das componentes principais (Fig. 37) mostra o quanto a variância as primeiras componentes representam. A primeira componente explica a maior parte da variância, depois a segunda é a que possui maior poder de explicação e assim por diante. Juntas, todas as componentes explicam toda a variabilidade dos dados.

TABELA 13: Tabela de autovalores e variâncias das componentes principais de A2 na estação seca.

	<i>AUTOVALORES</i>	<i>VARIANCIA %</i>	<i>VARIANCIA ACUMULADA %</i>
<i>Dim.1</i>	2,983	42,619	42,619
<i>Dim.2</i>	1,695	24,211	66,830
<i>Dim.3</i>	1,039	14,840	81,670
<i>Dim.4</i>	0,629	8,985	90,655
<i>Dim.5</i>	0,342	4,884	95,539
<i>Dim.6</i>	0,209	2,987	98,526
<i>Dim.7</i>	0,103	1,474	100,000

Na Tabela 13 verifica-se que a primeira dimensão explica 42,61% da variabilidade dos dados, enquanto a segunda explica 24,21%, explicando 66,83% da variabilidade.

As duas primeiras componentes principais já representam mais de 60% e podemos considerar as duas dimensionalidades como o mínimo de fatores que maximiza a quantidade de variância total explicada.

Ainda que três componentes dimensionais possuam autovalores maiores que 1, apenas duas dimensionalidades foram consideradas, com o mínimo de fatores que maximiza a quantidade de variância total explicada. O valor pH (terceira componente de dimensionalidade) está moderadamente correlacionado com o DQO, sendo que este possui correlações muito fracas com os demais parâmetros. Uma alteração do DQO alteraria apenas o pH e o OD, parâmetros da terceira componente de dimensionalidade.

O gráfico dos dados no espaço das duas primeiras componentes principais, com pontos nomeados das variáveis em A2 na estação seca, será mostrado a seguir na Figura 38.

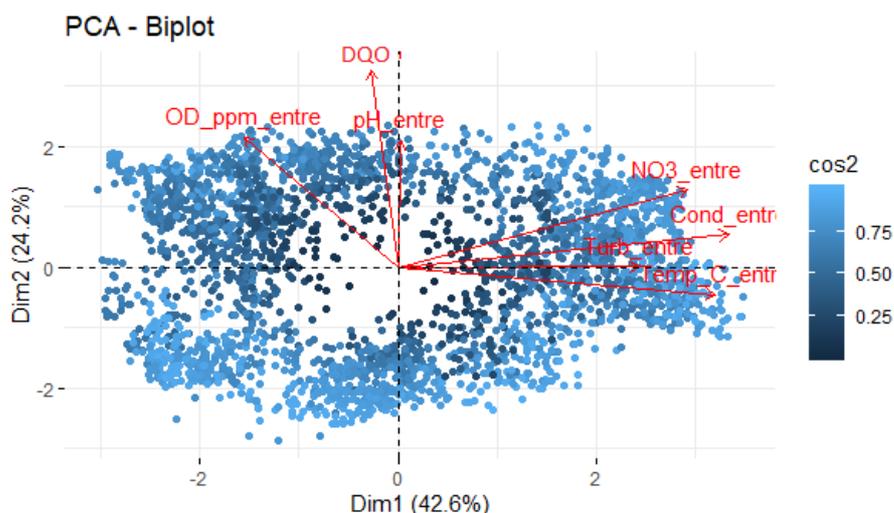


FIGURA 38: Ordenação biplot pela Análise de Componentes Principais (ACP) das medidas geradas em A2 na estação seca, a partir de sete variáveis de qualidade de água.

No gráfico de ordenação biplot das medidas existe uma classificação da influência das medidas no resultado da PCA, onde as medidas que estão mais claras são as que mais influenciam na direção das variáveis.

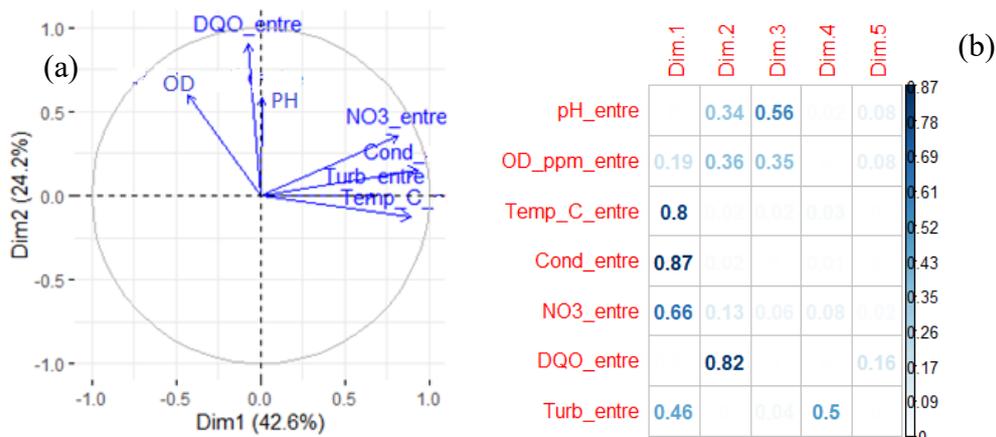


FIGURA 39: (a) Mapa perceptual das medidas geradas em A2 na estação seca, a partir de sete variáveis de qualidade de água, (b) Tabela de dimensionalidade das variáveis de qualidade da água em A2 na estação seca.

No mapa perceptual (Fig. 39a), temos apenas as duas maiores dimensionalidades, a primeira dimensão explica 42,6% e a segunda explica 24,2% da variabilidade dos dados.

Pode-se observar que a Turbidez, Condutividade e Nitrato são correlacionados positivamente entre si (assim como em A1 na estação seca), o que significa que o aumento de uma das variáveis tende a aumentar os outros dois que estão no mesmo quadrante. No mapa, DQO e OD apresentam correlação fraca ou muito fraca com os demais parâmetros. O pH apresenta correlação fraca apenas com o DQO, com os demais parâmetros não apresenta correlação (Fig.22).

A primeira componente dimensional pode ser interpretada como uma comparação das concentrações da temperatura da água, Turbidez, Condutividade e Nitrato com os demais elementos medidos. Logo, quanto menor o valor dessa componente, maiores também serão os valores desses parâmetros em relação aos demais parâmetros da água e vice-versa.

A segunda componente dimensional pode ser interpretada como um indicador para comparar a DQO, pH e OD com os demais parâmetros da água, quanto menor os valores desse índice, maiores são os valores desses parâmetros em relação aos dos demais elementos e vice-versa.

4.3.5. A2 estação chuva – Jusante da PCH Eng° José Gelázio da Rocha

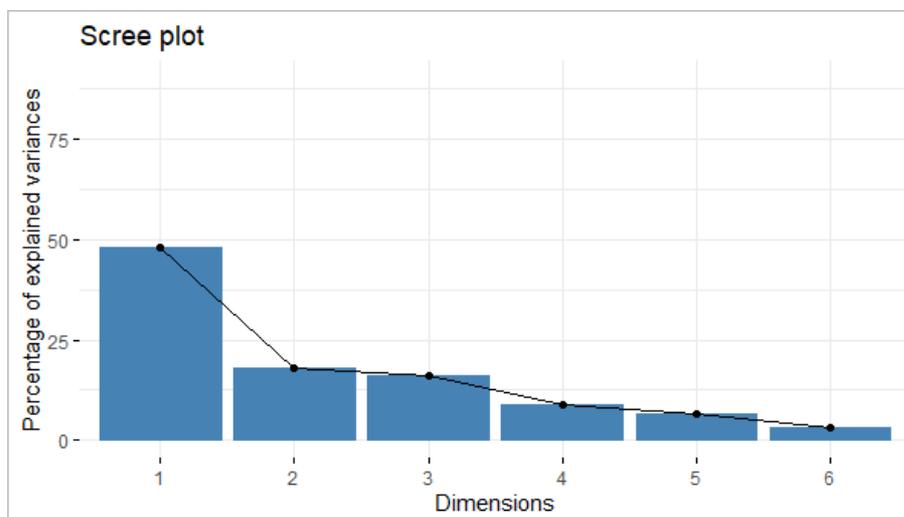


FIGURA 40: Gráfico de diagrama da declividade da variância das componentes principais de A2 na estação chuvosa.

O gráfico do diagrama de declividade da variância das componentes principais (Fig. 40) mostra o quanto a variância das primeiras componentes representam. A primeira componente explica a maior parte da variância, depois a segunda é a que possui maior poder de explicação e assim por diante. Juntas, todas as componentes explicam toda a variabilidade dos dados.

TABELA 14: Tabela de autovalores e variâncias das componentes principais de A2 na estação chuvosa.

	<i>AUTOVALORES</i>	<i>VARIANCIA %</i>	<i>VARIANCIA ACUMULADA %</i>
<i>Dim.1</i>	2,884	48,061	48,061
<i>Dim.2</i>	1,067	17,788	65,850
<i>Dim.3</i>	0,956	15,938	81,788
<i>Dim.4</i>	0,524	8,732	90,520
<i>Dim.5</i>	0,389	6,483	97,002
<i>Dim.6</i>	0,180	2,998	100,000

Na Tabela 14 verifica-se que a primeira dimensão explica 48,06% da variabilidade dos dados, enquanto a segunda explica 17,78%, explicando 65,85% da variabilidade. As duas primeiras componentes principais já representam mais de 60%

e podemos considerar as duas dimensionalidades como o mínimo de fatores que maximiza a quantidade de variância total explicada.

O gráfico dos dados no espaço das duas primeiras componentes principais, com pontos nomeados das variáveis em A2 na estação chuvosa, será mostrado a seguir na Figura 41.

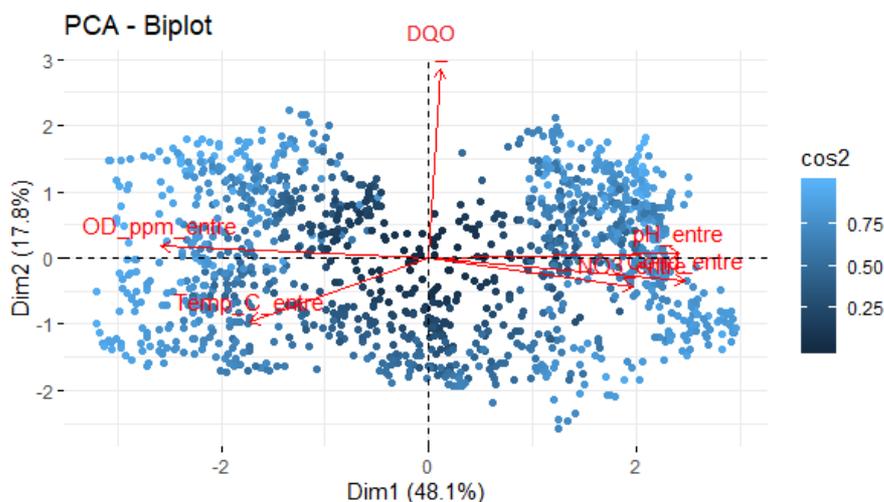


FIGURA 41: Ordenação biplot pela Análise de Componentes Principais (ACP) das medidas geradas em A2 na estação chuvosa, a partir de seis variáveis de qualidade de água.

No gráfico de ordenação biplot das medidas, existe uma classificação da influência das medidas no resultado da PCA, as medidas que estão mais claras são as que mais influenciam na direção das variáveis.

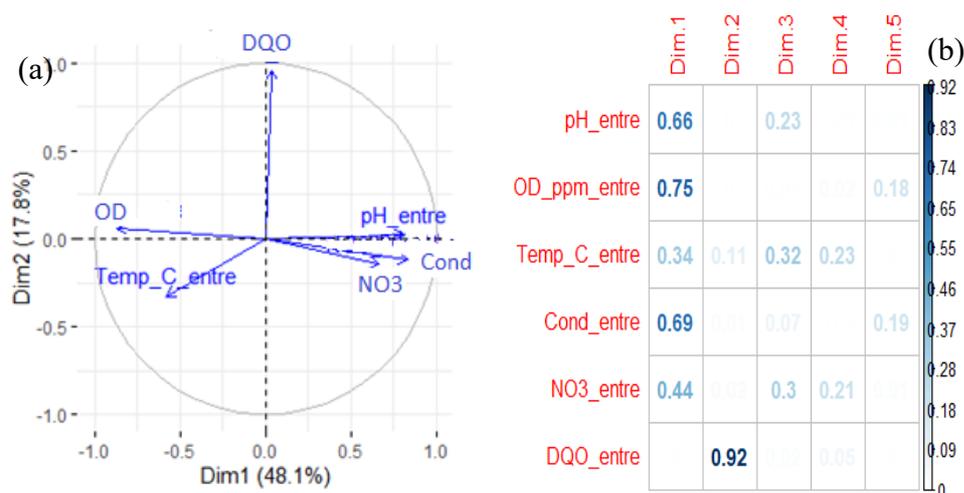


FIGURA 42: (a) Mapa perceptual das medidas geradas em A2 na estação chuvosa, a partir de seis variáveis de qualidade de água, (b) Tabela de dimensionalidade das variáveis de qualidade da água em A2 na estação chuva.

No mapa perceptual (Fig. 42a), temos apenas as duas maiores dimensionalidades, a primeira dimensão explica 48,1% e a segunda explica 17,8% da variabilidade dos dados e a representação das variáveis em fasores.

O pH, condutividade e Nitrato estão correlacionados positivamente entre si, o que significa que o aumento de uma das variáveis tende a aumentar os outros dois que estão no mesmo quadrante. Ao mesmo tempo, esses parâmetros são relacionados negativamente e estão correlacionados com OD e Temperatura da água.

A primeira componente dimensional (OD) pode ser interpretada como uma comparação das concentrações do OD e Temperatura da água com os demais elementos medidos. Logo, quanto menor o valor dessa componente, maiores serão OD e Temperatura da água em relação aos demais parâmetros da água e vice-versa.

No mapa perceptual (Fig.42a), vemos que o DQO (a segunda componente dimensional) está perpendicular aos demais parâmetros, fazendo com que ele não apresente correlação com nenhum outro parâmetro (Fig.23).

Aparece uma forte anticorrelação entre pH e OD (-0,71), que é um comportamento oposto ao que acontece no trecho natural em A1 (0,84), no mesmo período.

4.3.6. A2 estação seca e chuvosa – Jusante da PCH Engº José Gelázio da Rocha

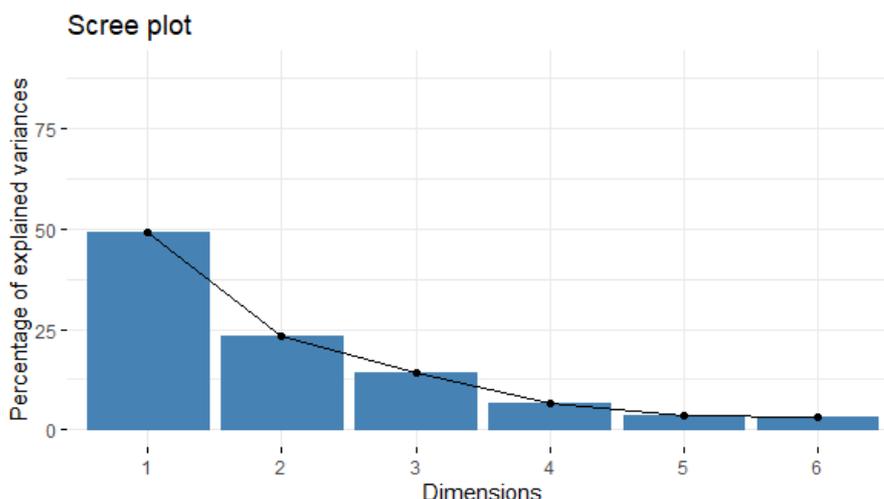


FIGURA 43: Gráfico do diagrama de declividade da variância das componentes principais de A2 estação seca e chuvosa.

O gráfico do diagrama de declividade da variância das componentes principais (Fig. 43) mostra o quanto a variância as primeiras componentes representam. A primeira componente explica a maior parte da variância, depois a segunda é a que possui maior poder de explicação e assim por diante. Juntas, todas as componentes explicam toda a variabilidade dos dados.

TABELA 15: Tabela de autovalores e variâncias das componentes principais de A2 na estação seca e chuvosa.

	<i>AUTOVALORES</i>	<i>VARIANCIA %</i>	<i>VARIANCIA ACUMULADA %</i>
<i>Dim.1</i>	2,957	49,287	49,287
<i>Dim.2</i>	1,388	23,136	72,423
<i>Dim.3</i>	0,853	14,216	86,639
<i>Dim.4</i>	0,403	6,712	93,351
<i>Dim.5</i>	0,215	3,589	96,940
<i>Dim.6</i>	0,184	3,060	100,000

Na Tabela 15 verifica-se que a primeira dimensão explica 49,28% da variabilidade dos dados, enquanto a segunda explica 23,13%, explicando 72,42% da variabilidade. As duas primeiras componentes principais já representam mais de 60% e são as únicas com autovalor maior que 1. Podemos considerar as duas

dimensionalidades como o mínimo de fatores que maximiza a quantidade de variância total explicada.

Na Figura 44, temos as medidas das duas primeiras componentes principais no espaço, com pontos nomeados das variáveis em A2 na estação seca e chuvosa, conforme será mostrado a seguir.

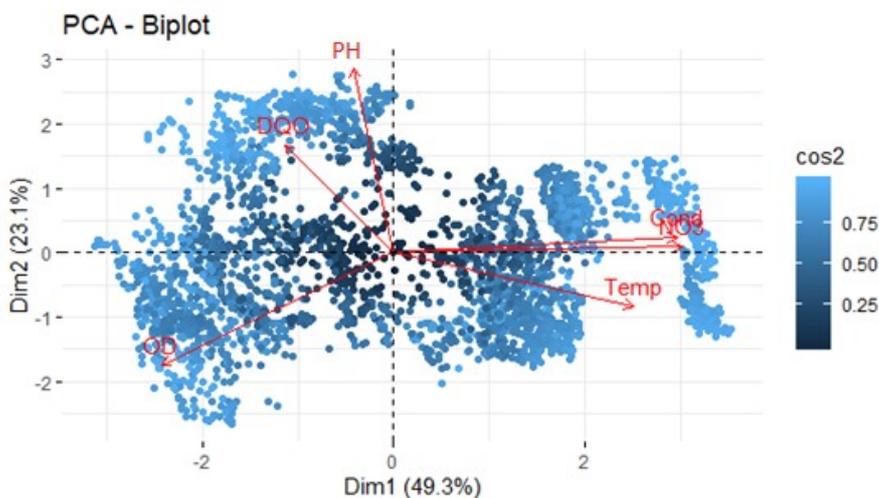


FIGURA 44: Ordenação biplot pela Análise de Componentes Principais (ACP) das medidas geradas em A2 na estação seca e chuvosa, a partir de seis variáveis de qualidade de água.

No gráfico de ordenação biplot das medidas, pode ser observado que existe uma classificação da influência das medidas no resultado da PCA, as medidas que estão mais claras são as que mais influenciam na direção das variáveis.

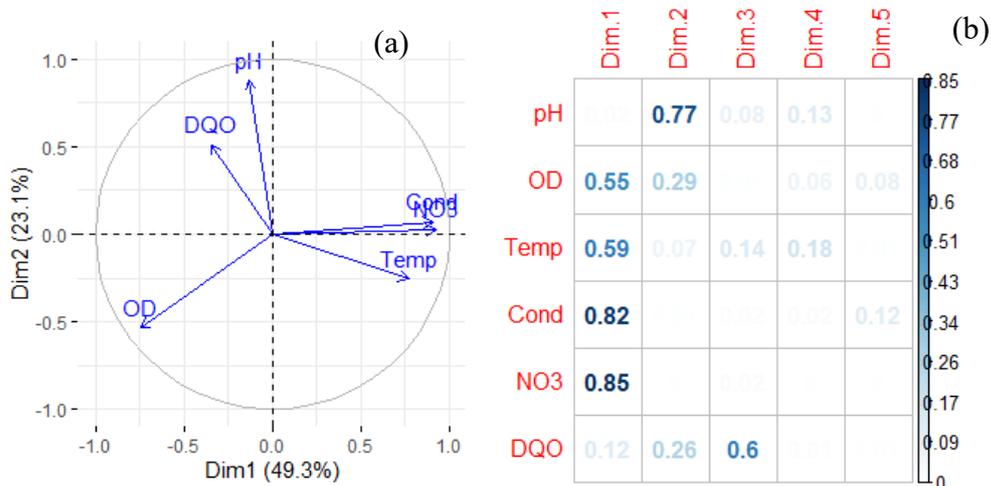


FIGURA 45: (a) Mapa perceptual das medidas geradas em A2 na estação seca e chuvosa, a partir de seis variáveis de qualidade de água, (b) Tabela de dimensionalidade das variáveis de qualidade da água em A2 na estação seca e chuvosa.

No mapa perceptual (Fig. 45a), temos apenas as duas maiores dimensionalidades, a primeira dimensão explica 49,3% e a segunda explica 23,1% da variabilidade dos dados e a representação das variáveis em fasores.

Na Figura 21, OD e pH estão fortemente correlacionados positivamente em A1 (0,93) e perdem essa forte correlação em A2 (Fig.24), passando a ter uma anticorrelação moderada, também observada no mapa perceptual (Fig.45a).

Condutividade, Nitrato e temperatura, assim como em A1, são correlacionados positivamente entre si, o que significa que o aumento de uma das variáveis tende a aumentar os outros dois. Observa-se, também, a diminuição da correlação negativa entre OD e temperatura de 0,82 para 0,34.

A primeira componente dimensional (NO_3^-) pode ser interpretada como uma comparação das concentrações da condutividade e Nitrato com os demais elementos medidos, inclusive com a Temperatura, que está fortemente correlacionado com esses parâmetros e que ajuda a formar essa dimensão. Logo, quanto menor o valor dessa componente, maiores serão condutividade e Nitrato e, por correlação, a Temperatura em relação aos demais parâmetros da água e vice-versa.

A segunda componente dimensional (pH) pode ser interpretada como um indicador para comparar o pH com os demais parâmetros da água, quanto menor os valores desse índice, maiores são as concentrações desses parâmetros em relação a dos demais elementos e vice-versa.

4.3.7. A3 estação seca – Jusante da PCH Rondonópolis

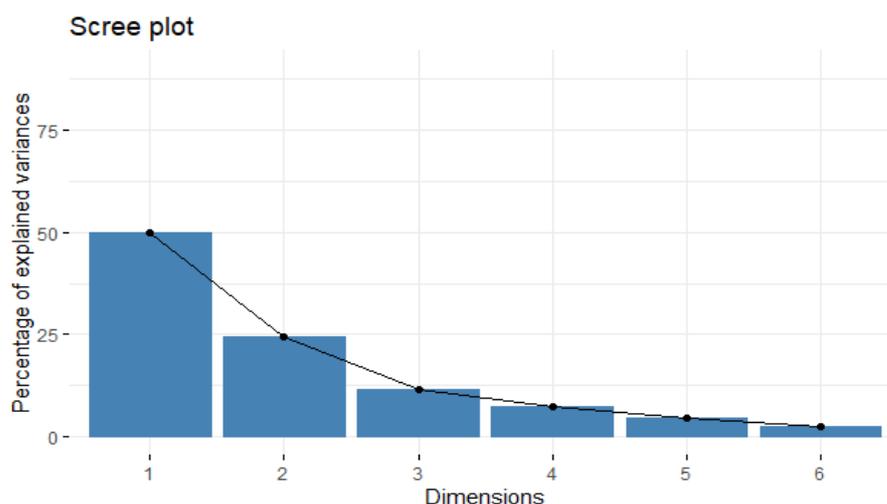


FIGURA 46: Gráfico do diagrama de declividade da variância das componentes principais de A3 estação seca.

O gráfico do diagrama de declividade da variância das componentes principais (Fig. 46) mostra o quanto a variância as primeiras componentes representam. A primeira componente explica a maior parte da variância, depois a segunda é a que possui maior poder de explicação e assim por diante. Juntas, todas as componentes explicam toda a variabilidade dos dados.

TABELA 16: Tabela de autovalores e variâncias das componentes principais de A3 na estação seca.

	<i>AUTOVALORES</i>	<i>VARIANCIA %</i>	<i>VARIANCIA ACUMULADA %</i>
<i>Dim.1</i>	2,568	36,685	36,685
<i>Dim.2</i>	2,291	32,735	69,420
<i>Dim.3</i>	0,862	12,321	81,741
<i>Dim.4</i>	0,496	7,081	88,822
<i>Dim.5</i>	0,376	5,370	94,192
<i>Dim.6</i>	0,256	3,657	97,849
<i>Dim.7</i>	0,151	2,151	100,000

Na Tabela 16, verifica-se que a primeira dimensão explica 36,68% da variabilidade dos dados, enquanto a segunda explica 32,73%, explicando 69,42% da variabilidade. As duas primeiras componentes principais já representam mais de 60%

e são as únicas com autovalor maior que 1. Podemos considerar as duas dimensionalidades como o mínimo de fatores que maximizam a quantidade de variância total explicada.

De todas as análises, este ponto nesta estação foi o que apresentou a maior equilíbrio entre os autovalores de primeira e segunda dimensionalidades.

Na figura 47, temos as medidas das duas primeiras componentes principais no espaço, com pontos nomeados das variáveis em A3 na estação seca, como será mostrado a seguir.

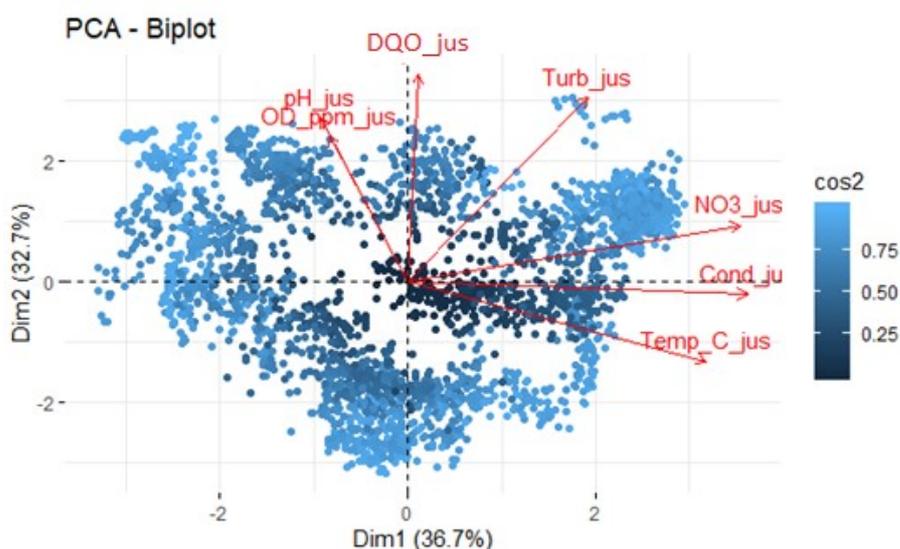


FIGURA 47: Ordenação biplot pela Análise de Componentes Principais (ACP) das medidas geradas em A3 na estação seca, a partir de sete variáveis de qualidade de água.

No gráfico de ordenação biplot existe uma classificação da influência das medidas no resultado da PCA, as medidas que estão mais claras são as que mais influenciam na direção das variáveis.

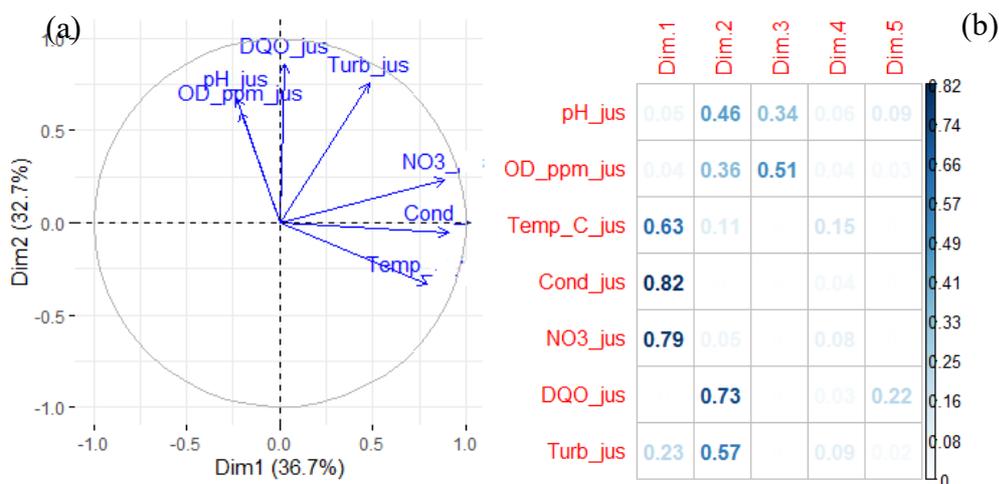


FIGURA 48: (a) Mapa perceptual das medidas geradas em A3 na estação seca, a partir de sete variáveis de qualidade de água, (b) Tabela de dimensionalidade das variáveis de qualidade da água em A3 na estação seca.

No mapa perceptual (Fig. 48a), temos apenas as duas maiores dimensionalidades, a primeira que explica 36,7% da variabilidade dos dados, a segunda que explica 32,7% da variabilidade e a representação das variáveis em fasores.

Pode-se observar que a Turbidez, Condutividade e Nitrato são correlacionados positivamente entre si (assim como em A1 e A2 na estação seca), o que significa que o aumento de uma das variáveis tende a aumentar os outros dois que estão no mesmo quadrante. No mapa também é possível ver que pH, DQO e OD estão inversamente correlacionados com a temperatura da água (assim como em A2).

A primeira componente dimensional pode ser interpretada como uma comparação das concentrações da temperatura da água, Condutividade e Nitrato com os demais elementos medidos. Logo, quanto menor o valor dessa componente, maiores serão os valores desses parâmetros em relação aos demais parâmetros da água e vice-versa.

A segunda componente dimensional pode ser interpretada como um indicador para comparar a DQO, pH, OD e turbidez com os demais parâmetros da água, quanto menor os valores desse índice, maiores são os valores desses parâmetros em relação a dos demais elementos e vice-versa.

4.3.8. A3 estação chuvosa – Jusante da PCH Rondonópolis

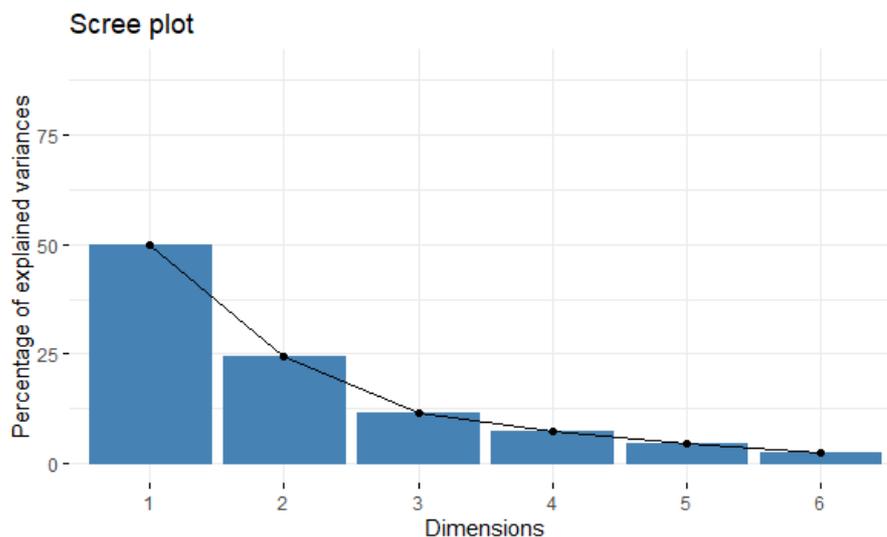


FIGURA 49: Gráfico do diagrama de declividade da variância das componentes principais de A3 na estação chuvosa.

O gráfico do diagrama de declividade da variância das componentes principais (Fig. 49) mostra o quanto a variância as primeiras componentes representam. A primeira componente explica a maior parte da variância, depois a segunda é a que possui maior poder de explicação e assim por diante. Juntas, todas as componentes explicam toda a variabilidade dos dados.

TABELA 17: Tabela de autovalores e variâncias das componentes principais de A3 na estação chuvosa.

	<i>AUTOVALORES</i>	<i>VARIANCIA %</i>	<i>VARIANCIA ACUMULADA %</i>
<i>Dim.1</i>	2,998	49,961	49,961
<i>Dim.2</i>	1,468	24,465	74,426
<i>Dim.3</i>	0,688	11,462	85,888
<i>Dim.4</i>	0,434	7,231	93,120
<i>Dim.5</i>	0,264	4,395	97,515
<i>Dim.6</i>	0,149	2,485	100,000

Na Tabela 17, verifica-se que a primeira dimensão explica 49,96% da variabilidade dos dados, enquanto a segunda explica 24,46% explicando 74,42% da variabilidade. As duas primeiras componentes principais já representam mais de 60% e são as que possuem autovalores maiores que 1. Podemos considerar as duas dimensionalidades como o mínimo de fatores que maximizam a quantidade de variância total explicada.

Na Figura 50, temos as medidas das duas primeiras componentes principais no espaço, com pontos nomeados das variáveis em A3 na estação chuvosa, conforme será mostrado a seguir.

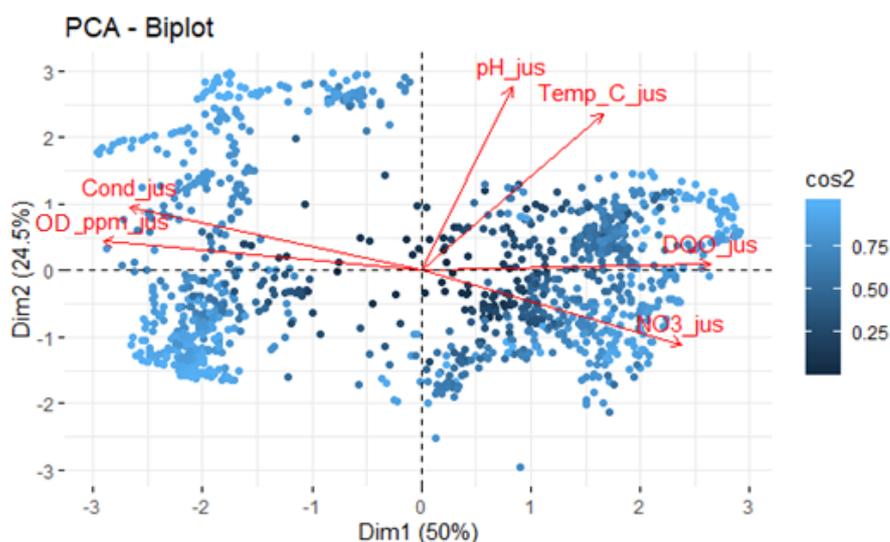


FIGURA 50: Ordenação biplot pela Análise de Componentes Principais (ACP) das medidas geradas em A3 na estação chuvosa, a partir de seis variáveis de qualidade de água.

No gráfico de ordenação biplot existe uma classificação da influência das medidas no resultado da PCA, as medidas que estão mais claras são as que mais influenciam na direção das variáveis.

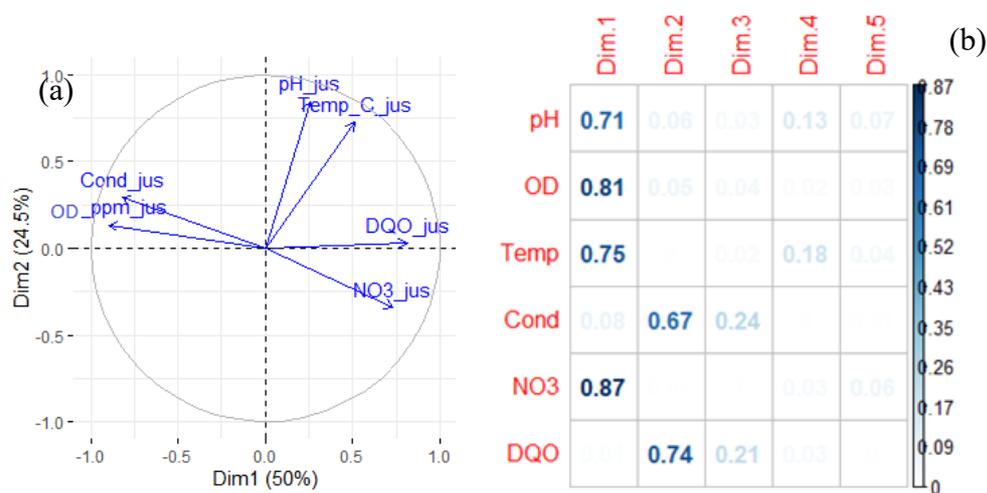


FIGURA 51: (a) Mapa perceptual das medidas geradas em A3 na estação chuvosa, a partir de seis variáveis de qualidade de água, (b) Tabela de dimensionalidade das variáveis de qualidade da água em A3 na estação chuva.

No mapa perceptual (Fig. 51a) temos apenas as duas maiores dimensionalidades, a primeira dimensão explica 49,96% e a segunda explica 24,46% da variabilidade dos dados e a representação das variáveis em fasores.

A primeira componente dimensional pode ser interpretada como uma comparação das concentrações do Nitrato com os demais parâmetros.

A segunda componente dimensional pode ser interpretada como um indicador para comparar o DQO com os demais parâmetros da água.

A condutividade e OD são fortemente correlacionados positivamente entre si (0,78) e de forma moderada negativamente com Nitrato, o que significa que o aumento de uma das variáveis tende a aumentar as outras que estão no mesmo quadrante e diminuir o Nitrato.

A temperatura da água e o pH estão moderadamente correlacionados entre si e com nenhum outro parâmetro, mostrando uma menor influência deste parâmetros sobre os demais, facilmente visto no mapa perceptual, onde estão perpendiculares aos demais parâmetros.

4.3.9. A3 estação seca e chuvosa – Jusante da PCH Rondonópolis

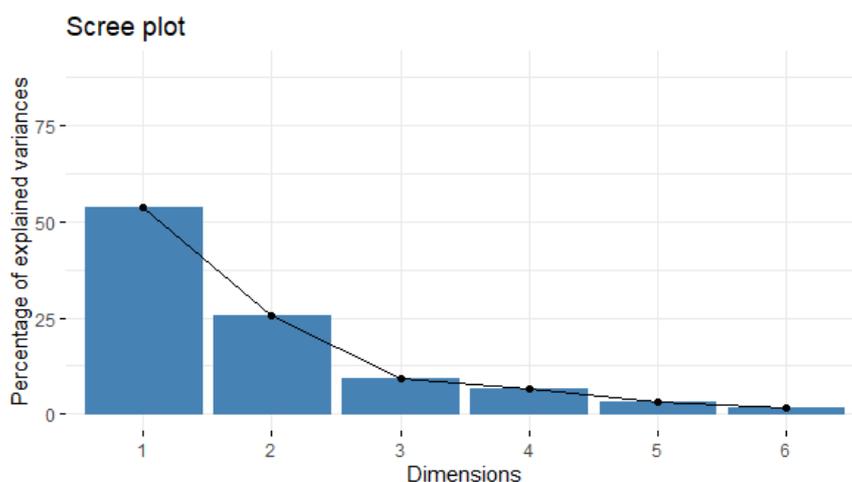


FIGURA 52: Gráfico de barras da variância das componentes principais de A3 na estação seca e chuvosa.

O gráfico do diagrama de declividade da variância das componentes principais (Fig. 52) mostra o quanto a variância as primeiras componentes representam. A primeira componente explica a maior parte da variância, depois a segunda é a que possui maior poder de explicação e assim por diante. Juntas, todas as componentes explicam toda a variabilidade dos dados.

TABELA 18: Tabela de autovalores e variâncias das componentes principais de A3 na estação seca e chuvosa.

	<i>AUTOVALORES</i>	<i>VARIANCIA %</i>	<i>VARIANCIA ACUMULADA %</i>
<i>Dim.1</i>	3,225	53,756	53,756
<i>Dim.2</i>	1,536	25,605	79,362
<i>Dim.3</i>	0,544	9,060	88,421
<i>Dim.4</i>	0,399	6,645	95,066
<i>Dim.5</i>	0,193	3,215	98,281
<i>Dim.6</i>	0,103	1,719	100,000

Na Tabela 18, verifica-se que a primeira dimensão explica 53,75% da variabilidade dos dados, enquanto a segunda explica 25,60%, explicando 79,36% da variabilidade. As duas primeiras componentes principais já representam mais de 60% e são as que possuem autovalores maiores que 1. Podemos considerar as duas

dimensionalidades como o mínimo de fatores que maximizam a quantidade de variância total explicada.

Na Figura 53, está o gráfico dos dados das duas primeiras componentes principais, representadas no espaço, com pontos nomeados das variáveis em A3 na estação seca e chuvosa.

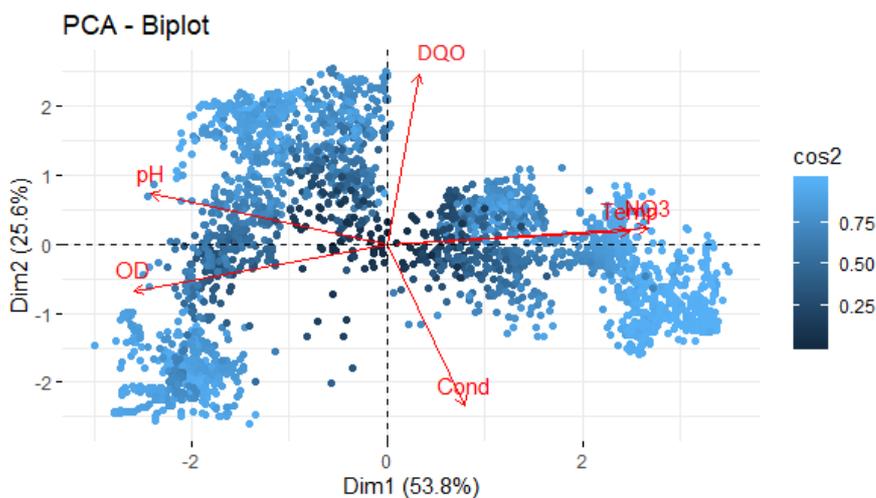


FIGURA 53: Ordenação biplot pela Análise de Componentes Principais (ACP) das medidas geradas em A3 na estação seca e chuvosa, a partir de seis variáveis de qualidade de água.

No gráfico de ordenação, biplot das medidas pode ser observado que existe uma classificação da influência das medidas no resultado da PCA. As medidas que estão mais claras são as que mais influenciam na direção das variáveis.

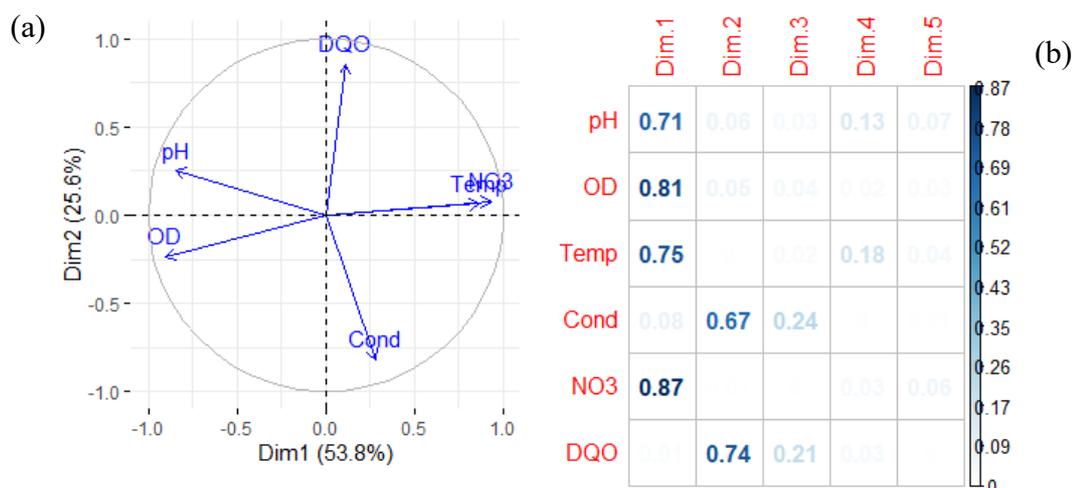


FIGURA 54: (a) Mapa perceptual das medidas geradas em A3 na estação seca e chuvosa, a partir de seis variáveis de qualidade de água, (b) Tabela de dimensionalidade das variáveis de qualidade da água em A3 na estação seca e chuvosa.

No mapa perceptual (Fig. 54a) temos apenas as duas maiores dimensionalidades, a primeira dimensão explica 53,75% e a segunda explica 25,60% da variabilidade dos dados e a representação das variáveis em fasores.

A primeira componente dimensional pode ser interpretada como uma comparação das concentrações de Nitrato com os demais elementos medidos (Fig. 54b), inclusive com a Temperatura com quem está fortemente correlacionado (0,71) e ajuda a formar essa dimensão.

A segunda componente dimensional pode ser interpretada como um indicador para comparar o DQO com os demais parâmetros da água.

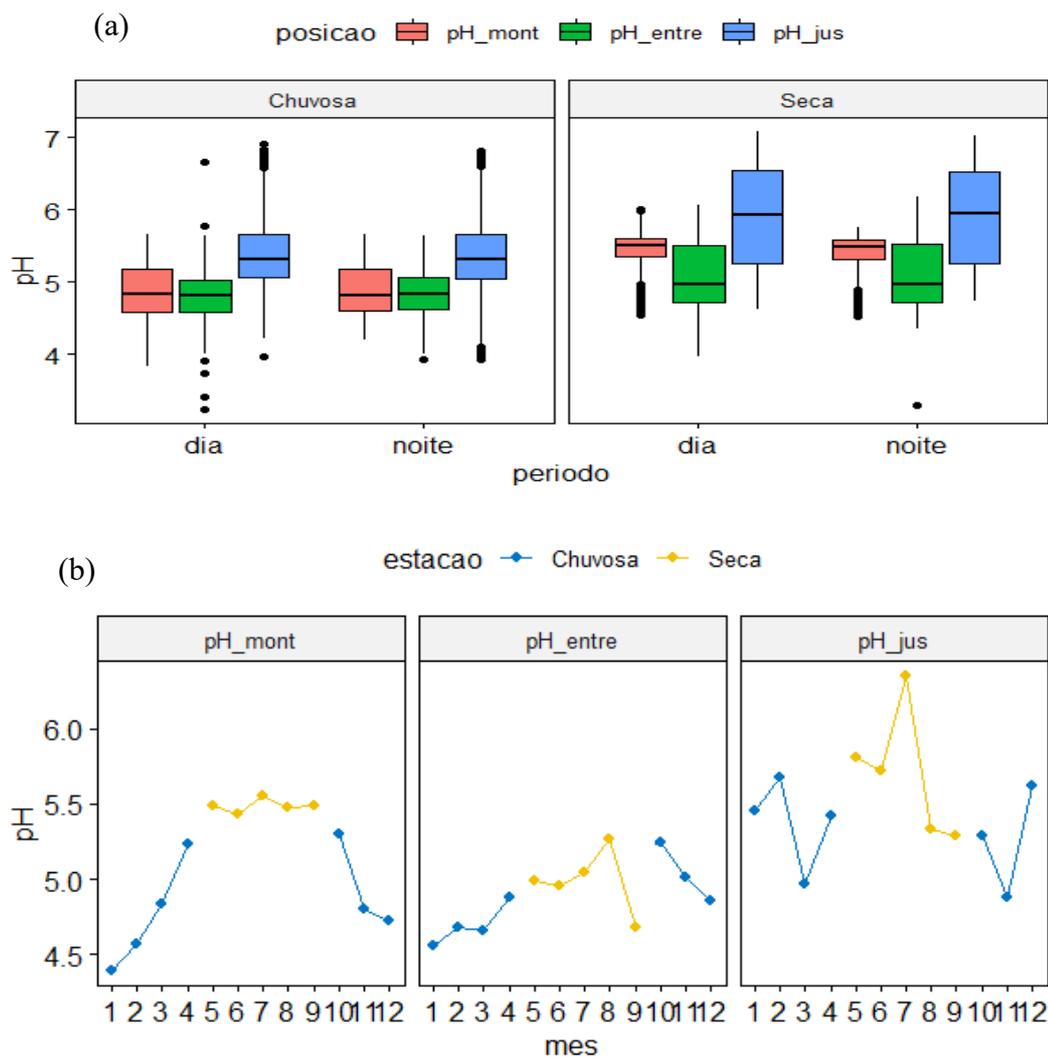
Temperatura e Nitrato estão fortemente correlacionados (assim como em A1), o que significa que o aumento de uma das variáveis tende a aumentar o outro, OD e pH que têm correlação muito forte em A1 (0,93) apresentam correlação positiva moderada (0,65) em A3.

No mapa perceptual, observa-se que DQO e Condutividade estão perpendiculares aos demais parâmetros, o que faz com que tenham correlação fraca ou muito fraca com esses parâmetros.

4.4. ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA)

Como os dados das variáveis analisadas não possuem distribuição normal, foram utilizados a ANOVA não paramétrica.

4.4.1. PH.



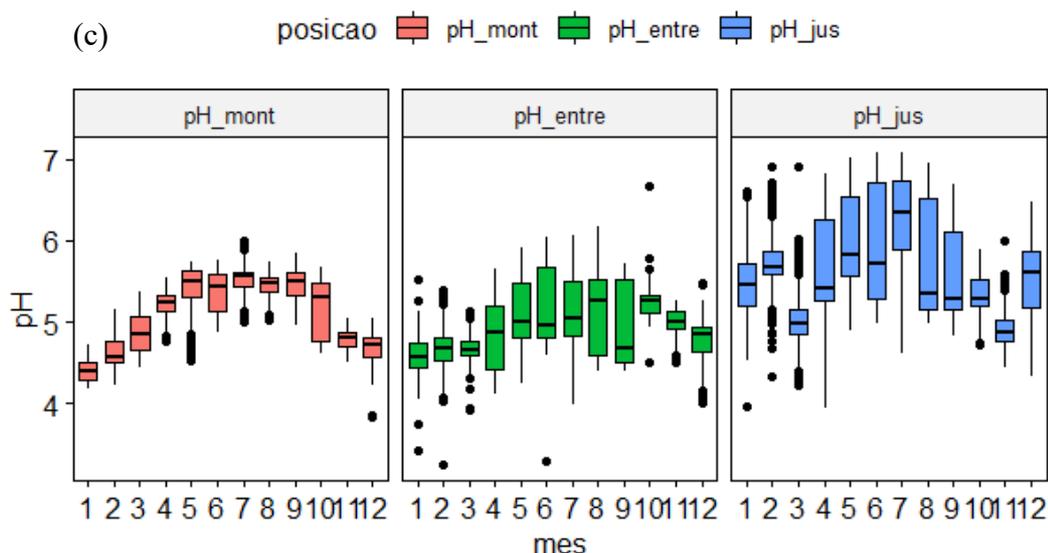


FIGURA 55: (a) Mediana do pH durante o dia na estação seca e chuvosa e durante a noite na estação seca e chuvosa, nos pontos A1 (pH_mont), A2 (pH_entre) e A3 (pH_jus); (b) Mediana do pH em cada mês do ano nos pontos A1 (pH_mont), A2 (pH_entre) e A3 (pH_jus); (c) Box-plot do pH em cada mês do ano nos pontos A1 (pH_mont), A2 (pH_entre) e A3 (pH_jus).

Na Figura 55a., considerando todos os pontos e levando em consideração a variação do valor da variável pH em relação aos períodos do dia, as estações de chuva e seca, nos pontos de medição A1, A2 e A3, não se verifica nenhuma variação da mediana entre o dia e noite.

Na estação seca, por conta dos processos bioquímicos influenciados pela incidência da radiação solar, há um pequeno decréscimo no valor do pH no período noturno e, na estação chuvosa, há um pequeno acréscimo no período diurno; que não tem significância estatística.

A mudança de estação chuvosa para seca provoca um aumento significativo ($p < 0,001$) do valor da mediana nos três pontos. Houve uma elevação significativa do valor do pH da estação chuvosa para a seca, independente de ser dia ou noite.

Na Figura 55b, temos as medianas dos pontos mês a mês nos três pontos de medição, onde se observa que, nos meses da estação seca, o pH é menos ácido.

Em A1, na estação seca, há uma menor variação da mediana e de faixa de valores (Fig. 55c). Na estação chuvosa, a faixa de valores é maior no mês de outubro (mês 10), começo da estação chuvosa, havendo uma diminuição dos valores da

mediana do pH de outubro a janeiro, quando começa novamente a subir até o mês de abril.

No ponto A2, na estação seca, o valor das medianas são inferiores quando comparados mês a mês com a estação A1, ou seja, apresenta um caracter mais ácido. De forma geral, houve uma menor variação das medianas mensais, período de seca e chuvosa, quando comparado com A1. No entanto, há uma faixa muito maior de valores de dados medidos nos meses de abril a setembro (Fig. 55c).

Em A3, na estação seca, as medianas são superiores aos valores nos pontos A1, e A2. Não há um comportamento linear das medianas (Fig. 55b), como acontece no curso natural em A1, havendo uma faixa ainda maior de valores de dados medidos nos meses de abril a setembro e, também, nos meses de dezembro e janeiro.

TABELA 19: Tabela de medianas máximas e mínimas da variável pH nas estações seca e chuvosa em A1, A2 e A3.

ESTAÇÃO	A1	A2	A3
MEDIANA CHUVOSA	4,872	4,825	5,389
MEDIANA SECA	5,439	5,112	5,923
MÁXIMO CHUVOSA	5,670	6,6699	6,903
MÍNIMO CHUVOSA	3,837	3,2334	3,933
MÁXIMO SECA	6,004	6,176	7,081
MÍNIMO SECA	4,525	3,288	4,620

Na Tabela 19, confirmam-se nas máximas e mínimas medianas medidas a maior estabilidade da faixa de valores medidos em A1. Além disso, verificam-se o caracter mais ácido em A2 na seca e os valores mais altos em A3.

Há um aumento significativo de valor da mediana do pH da estação chuvosa para a seca nos três pontos considerados (Tabela 13), principalmente em A1 (14%) e A3 (12%).

De acordo com o Conceito do rio contínuo, o aumento do pH é esperado no decorrer do curso do rio, mas não em espaço longitudinal tão curto, como aconteceu entre A2 e A3. Essa aumento súbito do pH está diretamente ligado ao controle da vazão provocado pelas PCHs, fato que está previsto de acontecer no Conceito de descontinuidade serial.

4.4.2. OD

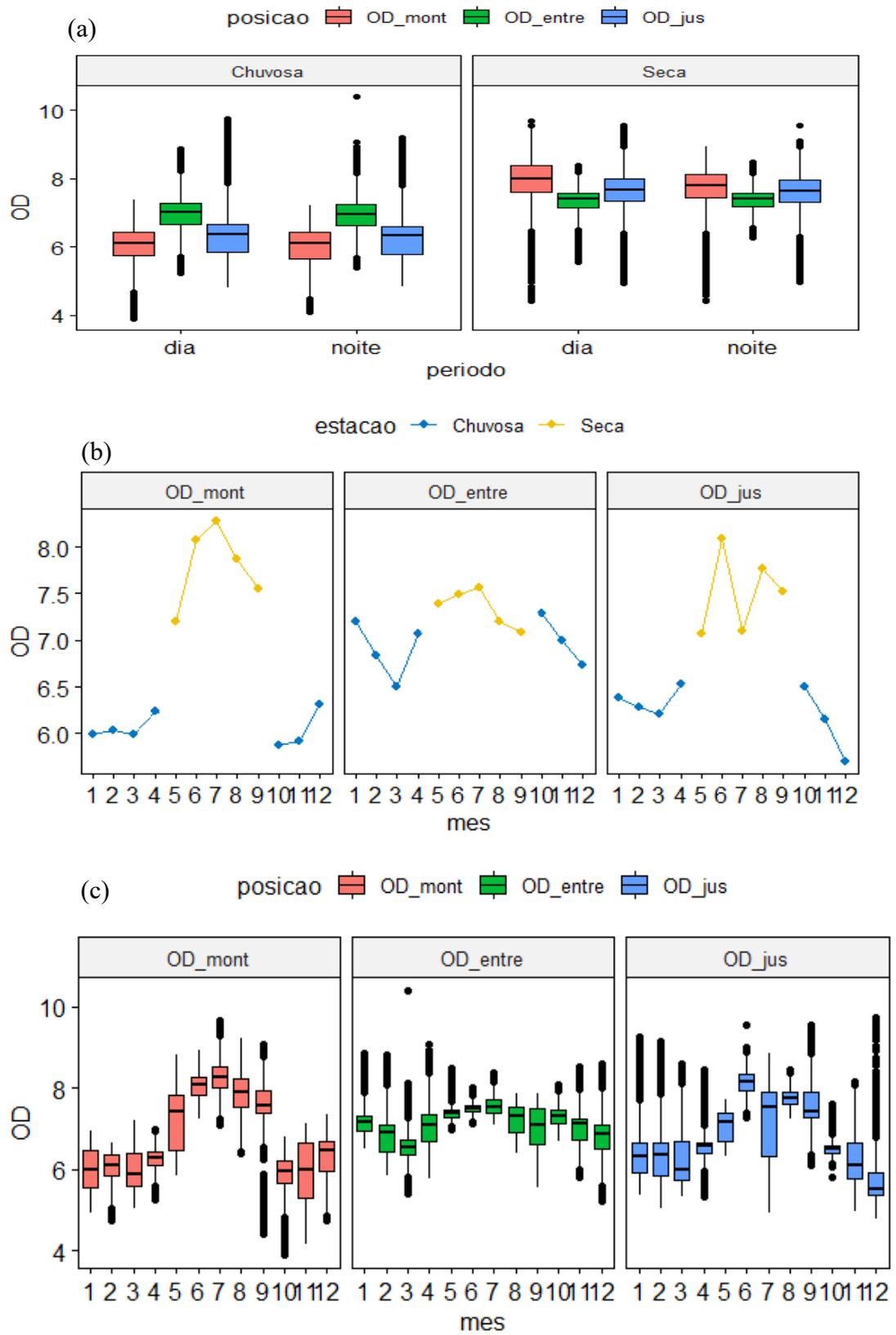


FIGURA 56: (a) Mediana do OD durante o dia na estação seca e chuvosa e durante a noite na estação seca e chuvosa nos pontos A1 (OD_mont), A2 (OD_entre) e A3 (OD_jus); (b) Mediana do OD em cada mês do ano nos pontos A1 (OD_mont), A2 (OD_entre) e A3 (OD_jus); (c) Box-plot do OD em cada mês do ano nos pontos A1 (OD_mont), A2 (OD_entre) e A3 (OD_jus).

Na Figura 56a, considerando todos os pontos, levando em consideração a variação do valor da variável OD em relação aos períodos do dia, as estações chuvosa e seca, os pontos de medição A1, A2 e A3; não se verifica nenhuma variação da mediana entre o dia e noite.

Há um pequeno decréscimo no valor de OD do dia para a noite, que está associado a ausência do processo fotossintético durante o período noturno.

Quando são consideradas as estações chuvosa e seca (Fig. 56a), pode-se dizer que há um aumento significativo ($p < 0,001$) da mediana de OD da estação chuvosa para a seca, independente se o valor é durante o dia ou noite

Em A1, na estação seca, há uma grande variação da mediana (Fig. 56b) que segue a variação da Temperatura da água (Fig.57b). Na estação chuvosa há uma diminuição dos valores da mediana de OD, que fica num mesmo patamar todos os meses desta estação. A maior faixa de valores aconteceu em janeiro, maio e novembro (Fig.56c), sendo maio e novembro meses de transição entre as estações seca e chuvosa, e janeiro um mês de bastante precipitação.

No ponto A2, na estação seca, quando comparados mês a mês com a estação A1, os valores das medianas são inferiores e mais próximos. De forma geral, quando comparado com A1, houve uma menor variação da mediana mensal no período de seca e uma maior variação da mediana mensal na estação chuvosa. Há uma menor faixa de valores de dados medidos (Fig. 56c).

Em A3, na estação seca, as medianas apresentam um comportamento de sobe e desce (Fig. 56b) muito diferente do que acontece no curso natural em A1. Houve uma grande faixa de valores de dados medidos no mês de julho.

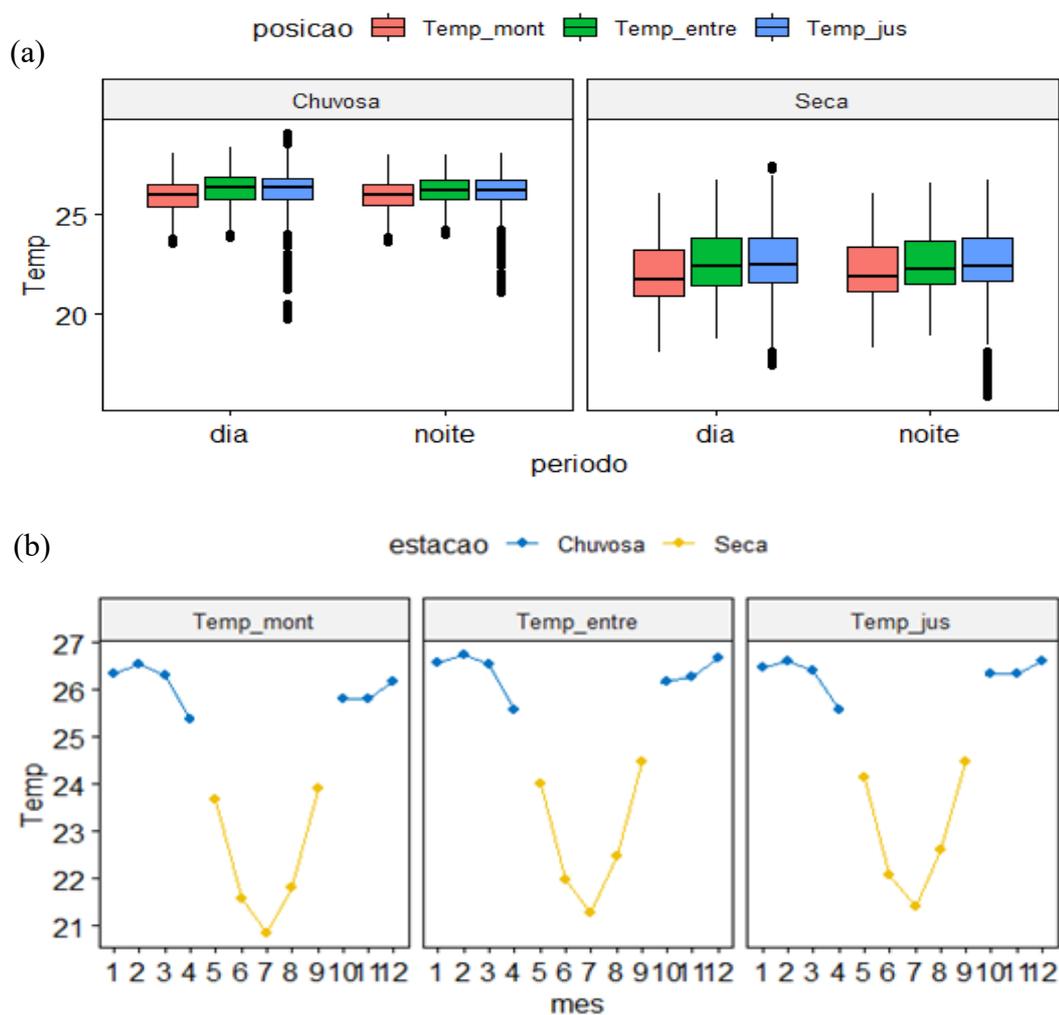
Na estação chuvosa em A3, assim como em A2, há um grande número de outliers.

TABELA 20: Tabela de medianas, máximas e mínimas da variável OD nas estações seca e chuvosa em A1, A2 e A3.

ESTAÇÃO	A1	A2	A3
MEDIANA CHUVOSA	6,052	6,935	6,258
MEDIANA SECA	7,811	7,315	7,531
MÁXIMO CHUVOSA	7,364	10,390	9,744
MÍNIMO CHUVOSA	3,883	5,217	4,790
MÁXIMO SECA	9,672	8,489	9,544
MÍNIMO SECA	4,398	5,554	4,937

A diferença das mediana entre as estações seca e chuvosa (Tabela 20) mostra um comportamento similar, tanto em relação ao período, quanto à posição; não mostrando as reais alterações que acontecem devido à mudança de estação e de posição.

4.4.3. Temperatura da água



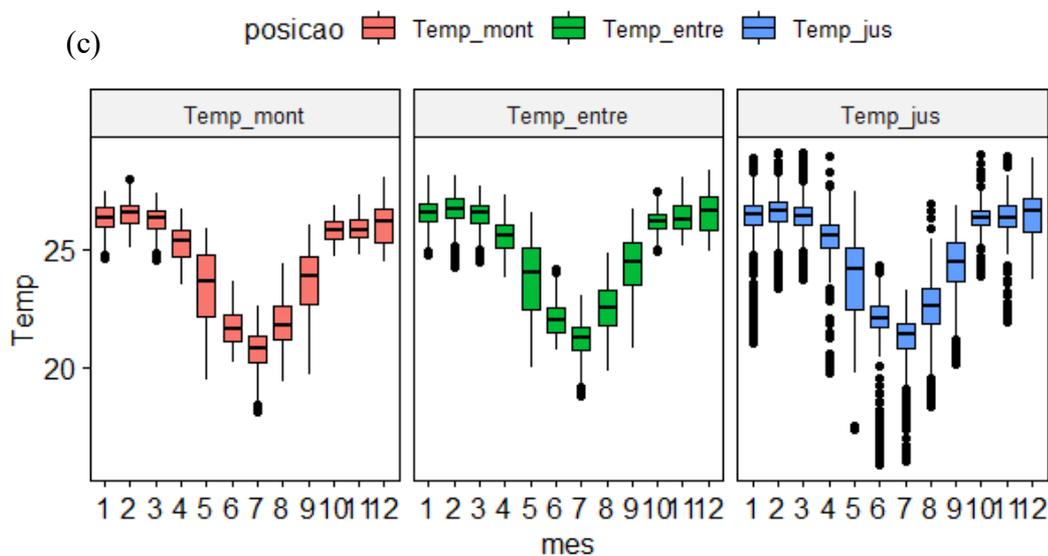


FIGURA 57: (a) Mediana da Temperatura da água durante o dia na estação seca e chuvosa e durante a noite na estação seca e chuvosa nos pontos A1 (Temp_mont), A2 (Temp_entre) e A3 (Temp_jus); (b) Mediana do Temperatura da água em cada mês do ano nos pontos A1 (Temp_mont), A2 (Temp_entre) e A3 (Temp_jus); (c) Box-plot do Temperatura da água em cada mês do ano nos pontos A1 (Temp_mont), A2 (Temp_entre) e A3 (Temp_jus).

Na estação seca houve um pequeno acréscimo da Temperatura da água durante o dia. Isso se explica pela troca de calor latente entre o corpo hídrico e o solo. Nesta estação, a água retém por mais tempo o calor do que o solo seco, então, no período noturno, o solo fornece calor latente para o corpo hídrico.

Quando foram consideradas todas as leituras (Fig. 57a), apesar da sazonalidade diária, essas alterações não tiveram significância estatística.

Como o amortecimento da temperatura da água acontece lentamente, a mediana do dia e da noite não varia.

Apesar da visível estabilidade do comportamento da Temperatura da água nos três pontos de coleta de dados (Fig.57b), a mudança da estação seca para chuvosa provoca um aumento do valores das medianas (Fig.57a).

Na estação seca, que inclui os meses de inverno, há diminuição da temperatura do ar, conseqüentemente da temperatura da água (Fig. 57a). Nessa estação também há uma maior faixa de valores medidos.

Na Figura 56c, as faixas de variações mensais são similares nos três pontos de medição. No entanto, houve um acréscimo de temperatura de A1 para A2 e de A2 para

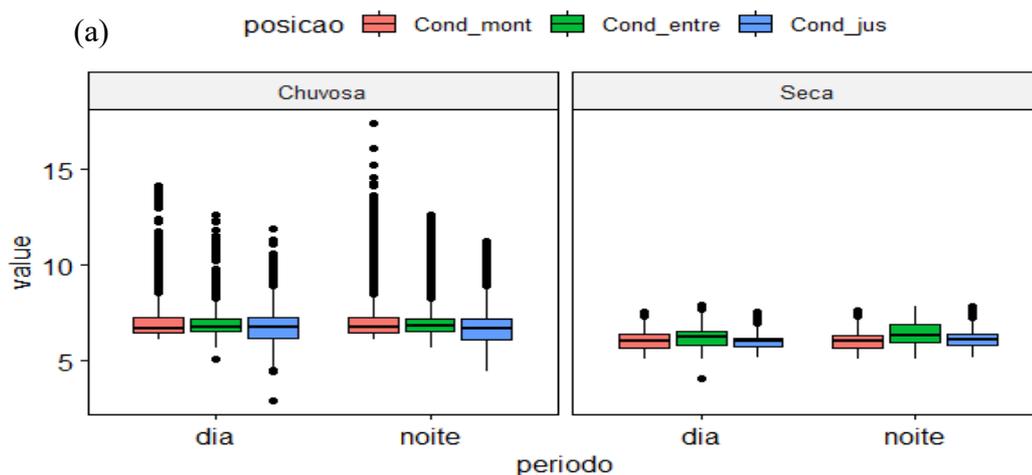
A3, o que pode estar associado a um efeito acumulativo da Temperatura da água devido à presença das instalações das PCHs em cascata.

TABELA 21: Tabela de mediana, máximas e mínimas da variável Temperatura da água nas estações seca e chuvosa em A1, A2 e A3.

ESTAÇÃO	A1	A2	A3
MEDIANA CHUVOSA	25,93	26,24	26,22
MEDIANA SECA	22,16	22,63	22,72
MÁXIMO CHUVOSA	28,03	28,37	29,1
MÍNIMO CHUVOSA	23,52	23,81	19,74
MÁXIMO SECA	26,07	26,7	27,48
MÍNIMO SECA	18,13	18,77	15,83

Há um aumento do gradiente de temperatura medida de A1 para A3 (tab. 21) devido ao pequeno lago de acumulação e ao longo canal de adução. Na estação chuvosa esse aumento foi de 1,14% (A1 para A2) e de 1,07% (de A1 para A3). Na estação seca, de 2,24% (A1 para A2) e de 2,63% (de A1 para A3).

4.4.4. Condutividade



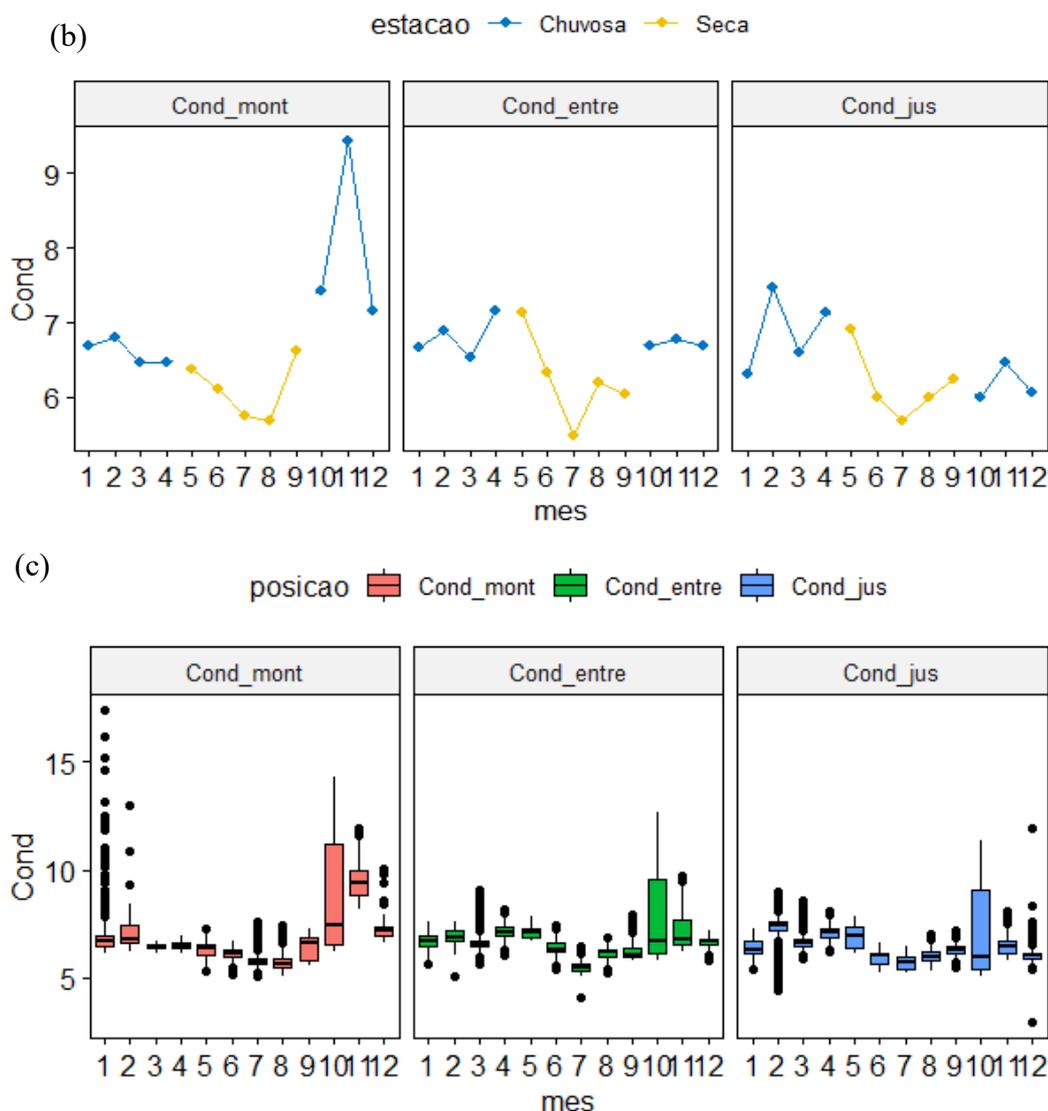


FIGURA 58: (a) Mediana da Condutividade durante o dia na estação seca e chuvosa e durante a noite na estação seca e chuvosa nos pontos A1 (Cond_mont), A2 (Cond_entre) e A3 (Cond_jus); (b) Mediana do Condutividade em cada mês do ano nos pontos A1 (Cond_mont), A2 (Cond_entre) e A3 (Cond_jus); (c) Box-plot do Condutividade em cada mês do ano nos pontos A1 (Cond_mont), A2 (Cond_entre) e A3 (Cond_jus).

Não houve variação das medianas entre o dia e noite (Fig. 58a).

Entre as estações chuvosa e seca (Fig. 58b) há uma diferença estatística significativa ($p < 0.001$) das medianas. Devido aos baixos valores da Condutividade, essa diferença estatística não representa uma diferença que possa alterar a qualidade do corpo hídrico.

Há uma certa estabilidade nos valores da condutividade nas estações chuvosa e seca (Fig. 58b.c) nos três pontos de coletas de medição. Apenas o mês de outubro apresenta uma grande faixa de medidas. No mês de outubro, acontecem as primeiras chuvas e a limpeza da calha do rio, o que provoca um aumento do valor da Condutividade nos três pontos de medição.

Nos meses de seca, período de baixa precipitação, aconteceram os menores valores de condutividade. Esse parâmetro está diretamente correlacionado com a precipitação, principalmente com as primeiras, mas não necessariamente diretamente correlacionada com a vazão (Fig.15).

TABELA 22: Tabela de medianas máximas e mínimas da variável Condutividade nas estações seca e chuvosa em A1, A2 e A3.

ESTAÇÃO	A1	A2	A3
MEDIANA CHUVOSA	7,27	7,03	6,80
MEDIANA SECA	6,07	6,32	6,12
MÁXIMO CHUVOSA	17,40	12,66	11,91
MÍNIMO CHUVOSA	6,093	5,074	2,902
MÁXIMO SECA	7,62	7,95	7,82
MÍNIMO SECA	5,08	4,12	5,19

A Condutividade na estação chuvosa apresenta valores maiores nos três pontos, no entanto, essas alterações são pequenas em escala (Tabela 22). Há um grande número de outliers, mas uma estabilidade dos valores médios nos três pontos de medição A1, A2 e A3 (Fig. 58a).

4.4.5. Nitrato

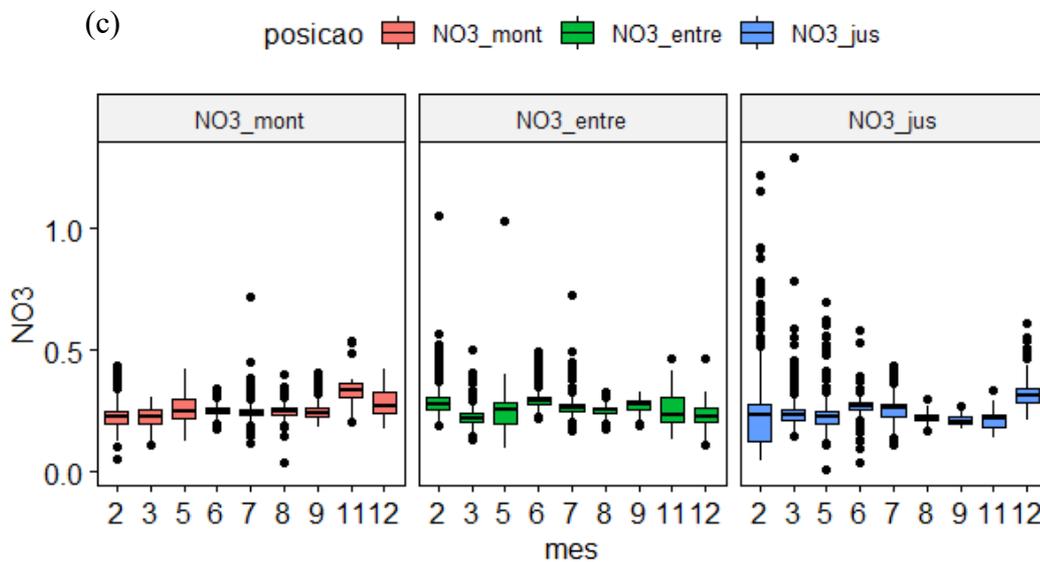
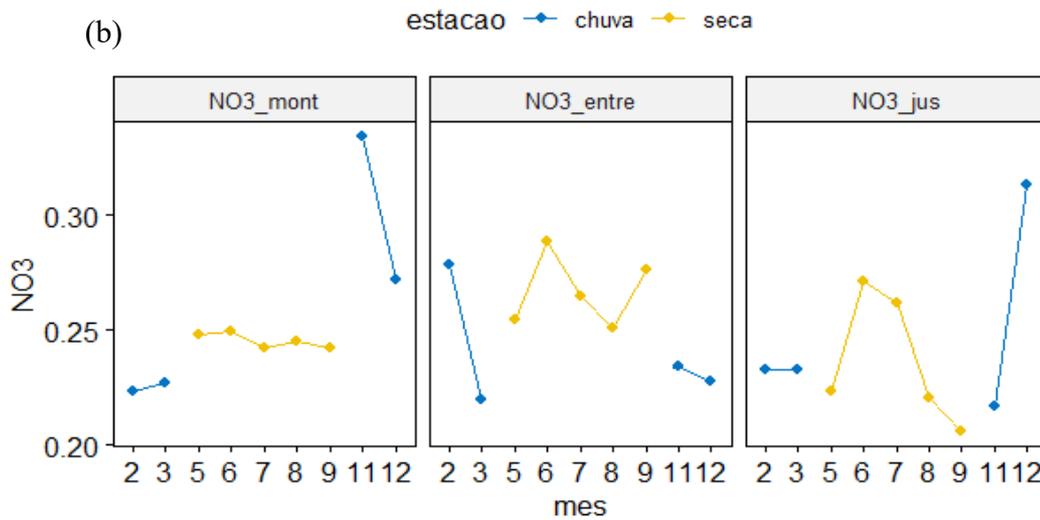
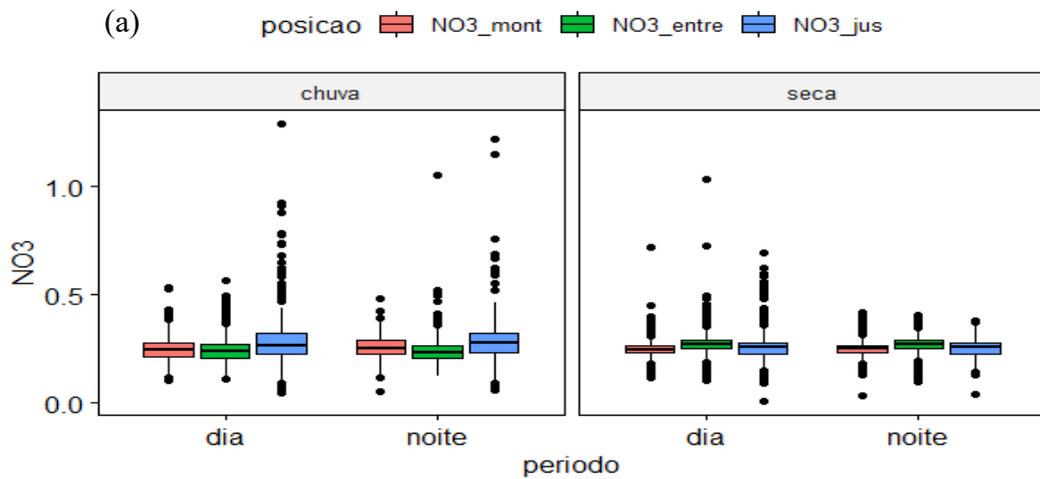


FIGURA 59: (a) Mediana da Nitrato durante o dia na estação seca e chuvosa e durante a noite na estação seca e chuvosa nos pontos A1 (Nitrato_mont), A2 (Nitrato_entre) e A3 (Nitrato_jus); (b) Mediana do Nitrato em cada mês do ano nos pontos A1 (Nitrato_mont), A2 (Nitrato_entre) e A3 (Nitrato_jus); (c) Box-plot do Nitrato em cada mês do ano nos pontos A1 (NO₃-_mont), A2 (NO₃-_entre) e A3 (NO₃-_jus).

A carga de Nitrato é muito baixa em todos os pontos de medição, ficando no limite de detecção do equipamento.

Na Figura 59^a, não se verifica nenhuma variação da mediana do Nitrato entre o dia e noite, independente das estações chuvosa ou seca. Em ambas as estações há um mínimo acréscimo (10^{-3}) dos valores lidos entre o dia e a noite.

A mudança das estações varia muito pouco a carga de Nitrato.

Em A1, na estação seca, o Nitrato aparenta ter o seu comportamento relacionado com a precipitação, apresentando os menores valores nos meses com menor precipitação e os maiores valores nos meses do início das chuvas.

Não houve um comportamento padrão do Nitrato durante os meses do ano nos pontos A2 e A3.

Por problemas técnicos nos meses de janeiro, abril e outubro não foram feitas leituras.

TABELA 23: Tabela de medianas, máximas e mínimas da variável Nitrato nas estações seca e chuvosa em A1, A2 e A3.

ESTAÇÃO	A1	A2	A3
MEDIANA CHUVOSA	0,252	0,240	0,276
MEDIANA SECA	0,250	0,267	0,250
MÁXIMO CHUVOSA	0,434	1,054	1,291
MÍNIMO CHUVOSA	0,050	0,107	0,048
MÁXIMO SECA	0,421	1,032	0,697
MÍNIMO SECA	0,126	0,097	0,005

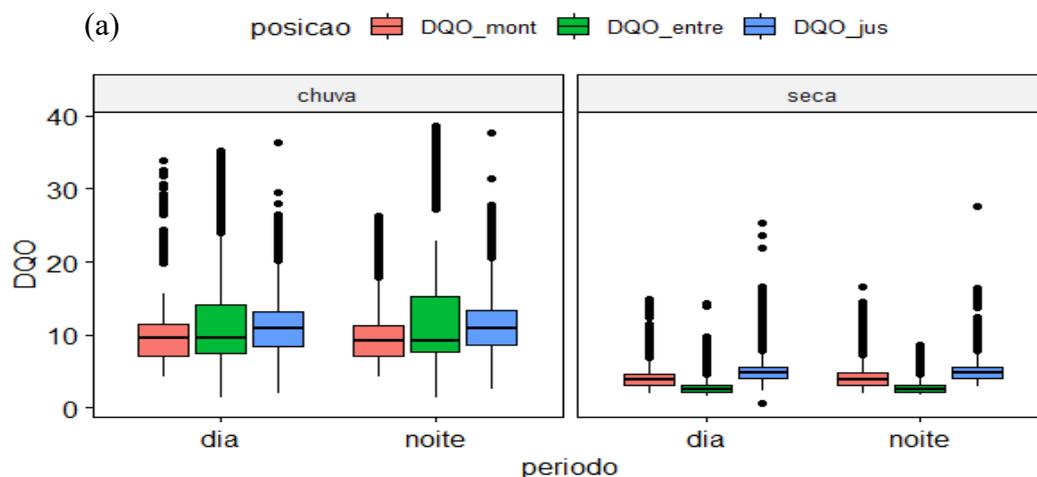
As medianas nas estações seca e chuvosa mostram uma estabilidade do valor médio nos três pontos de medição (Tabela 23).

O Nitrato, em ambas as estações, apresentou uma taxa de variação da mediana em torno de 10% de A1 para A3. Essa variação foi positiva na estação chuvosa e negativa na estação seca.

A consideração da variação percentual de 10%, associada ao fato que há diferença estatística relevante dos valores das medianas de Nitrato entre os pontos A1, A2 e A3, poderia indicar uma grande alteração. Essa afirmação seria uma leitura simplista e errônea, pois os valores assumidos de Nitrato são muito pequenos e uma alteração de 10% não deve trazer consequências na qualidade do corpo hídrico.

Apesar de não fazer parte deste estudo, vale citar que na resolução 357/2005 do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA, para rios de água doce Classe 1 e 2, o valor limite do Nitrato (NO_3^-) é de 10mg/L, muito abaixo das medianas encontradas nos três pontos em qualquer estação.

4.4.6. DQO



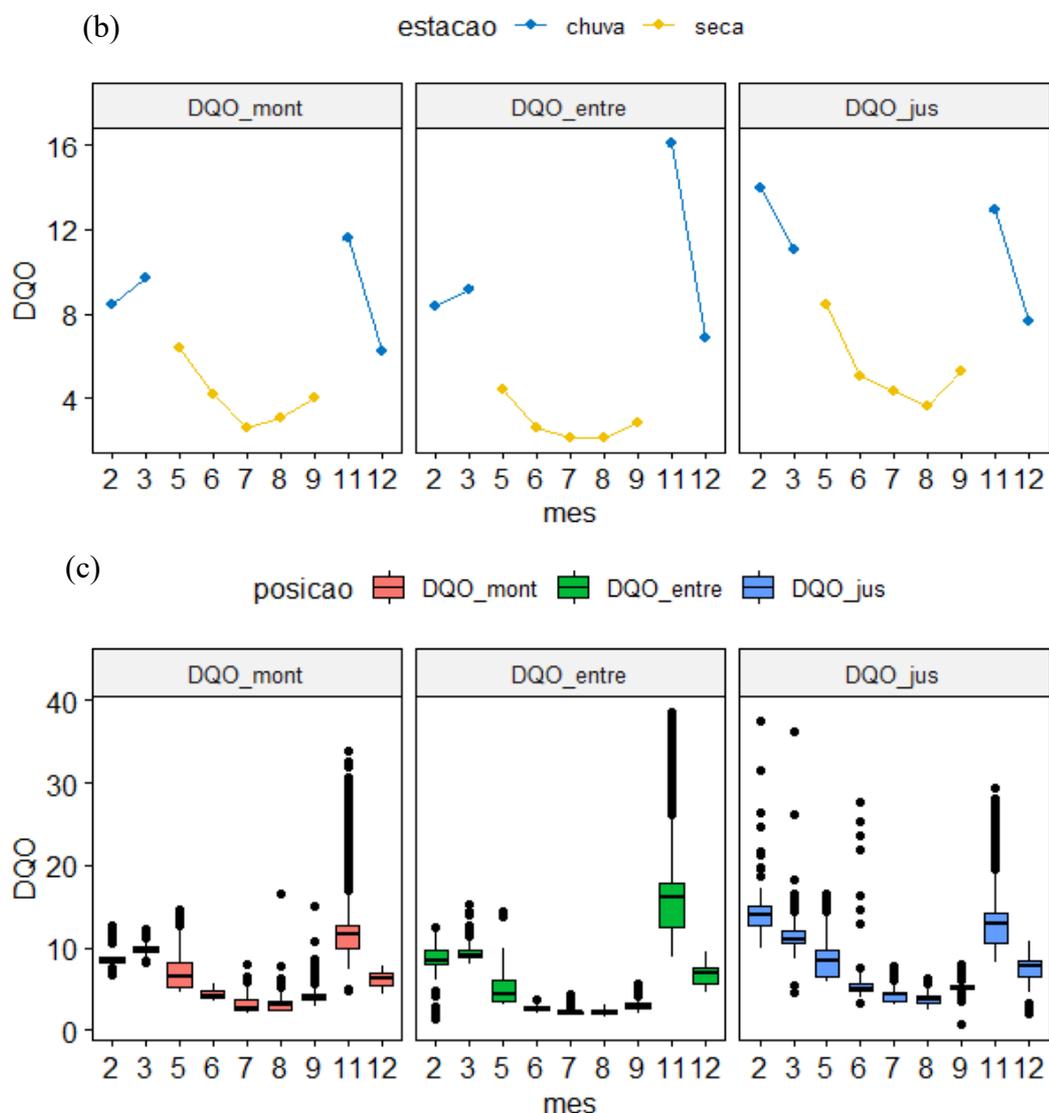


FIGURA 60: (a) Mediana do DQO durante o dia na estação seca e chuvosa e durante a noite na estação seca e chuvosa nos pontos A1 (DQO_mont), A2 (DQO_entre) e A3 (DQO_jus); (b) Mediana do DQO em cada mês do ano nos pontos A1 (DQO_mont), A2 (DQO_entre) e A3 (DQO_jus); (c) Box-plot do DQO em cada mês do ano nos pontos A1 (DQO_mont), A2 (DQO_entre) e A3 (DQO_jus).

A variação do período do dia (Fig. 60a) não interfere nas medianas em nenhum dos pontos de medição (A1, A2 e A3).

Na estação chuvosa há um acréscimo dos valores das medianas (Fig. 60a) e, também, um grande número de outliers, o que não altera a estabilidade do valor médiano nos três pontos de medição (A1, A2 e A3).

Nas medidas em A1, considerando os meses do ano (Fig.60b.c), o comportamento natural do DQO é de certa forma repetido em A2 e A3.

O DQO apresenta uma boa correlação com a vazão (Fig.17) e pouca correlação com os demais parâmetros.

Na mudança da estação seca para chuvosa, neste caso o mês de novembro (não houve dados nos meses de janeiro, abril e outubro), há um aumento dos valores de DQO. Esse aumento de valores aconteceu nos três pontos de monitoramento, principalmente em A2.

No mês de novembro também há alteração na faixa de valores medidos e número de outliers. Essa faixa maior de valores medidos se repete nos três pontos monitorados no mês de maio (final das chuvas).

TABELA 24: Tabela de medianas, máximas e mínimas da variável DQO nas estações seca e chuvosa em A1, A2 e A3.

ESTAÇÃO	A1	A2	A3
MEDIANA CHUVOSA	9,687	11,557	11,415
MEDIANA SECA	4,165	2,847	5,226
MÁXIMO CHUVOSA	33,91	38,58	37,59
MÍNIMO CHUVOSA	4,316	1,329	2,069
MÁXIMO SECA	16,54	14,41	27,69
MÍNIMO SECA	2,010	1,523	0,594

Quando considerados todos os pontos, houve variação positiva dos valores medidos do DQO, entre as estações seca e chuvosa (Tabela 24) nos três pontos de medição.

Na estação seca há uma diminuição de 31,6% da mediana do DQO de A1 para A2, que volta a subir 83,5% em A3. Essa diminuição sugere que houve retenção de matéria orgânica no lago de acumulação e uma recuperação no trecho do leito natural entre A2 e A3, apesar dos baixos valores encontrados.

No caso do DQO, assim como do Nitrato, uma significância estatística não necessariamente representa uma significância real de alteração da qualidade de água, visto a baixa concentração de nutrientes no ribeirão Ponte de Pedra.

4.4.7. Turbidez

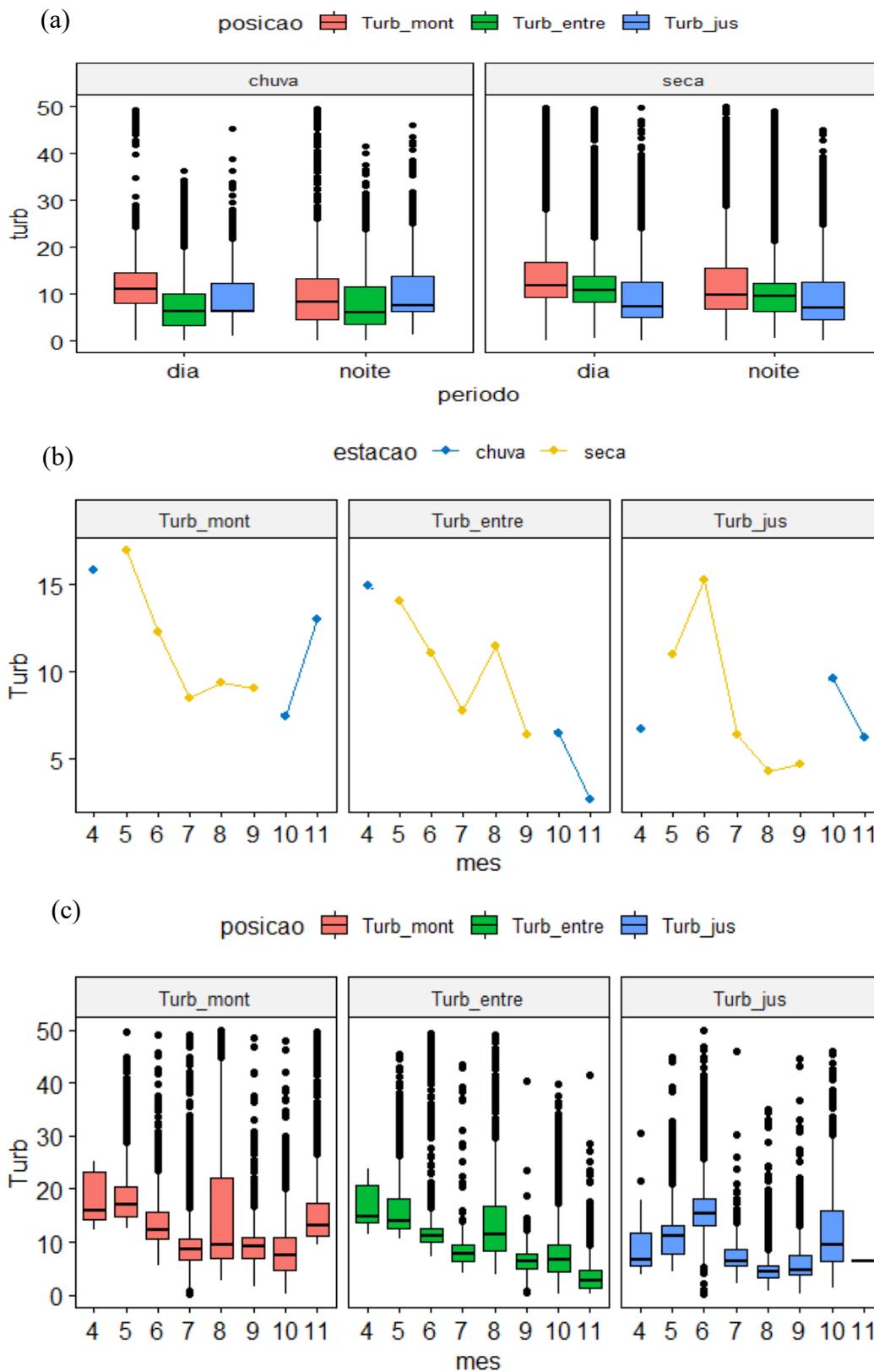


FIGURA 61: (a) Mediana da Turbidez durante o dia na estação seca e chuvosa e durante a noite na estação seca e chuvosa nos pontos A1 (Turb_mont), A2 (Turb_entre) e A3 (Turb_jus); (b) Mediana da Turbidez em cada mês do ano nos pontos A1 (Turb_mont), A2 (Turb_entre) e A3 (Turb_jus); (c) Box-plot da Turbidez em cada mês do ano nos pontos A1 (Turb_mont), A2 (Turb_entre) e A3 (Turb_jus).

Na estação chuvosa, a turbidez se deve aos particulados de origem mineral, a água tem mais cor (o que impede a aumento da população de algas).

No estação seca, apesar da água ser mais clara, a turbidez é maior devido ao aumento da população de micro-algas nos trechos estudados.

A Turbidez durante a noite foi um pouco menor (Fig.61a), no entanto, não houve alteração significativa do valor da mediana entre o dia e a noite.

Nas medidas em A1, considerando os meses do ano (Fig.60b,c), o comportamento natural é de certa forma repetido em A2, com valores menores nos meses de seca.

A Turbidez apresenta uma forte correlação com a vazão na estação chuvosa (Fig.17) e pouca correlação com os demais parâmetros (Fig.21,24,27).

Não houve dados nos meses de janeiro, fevereiro, março e dezembro; o que dificultou a caracterização mês a mês na estação chuvosa.

A retenção de particulados pela infraestrutura das PCHs e lago de acumulação parece não existir ou não interfere na mediana da Turbidez em A2.

TABELA 25: Tabela de medianas, máximas e mínimas da variável Turbidez nas estações seca e chuvosa em A1, A2 e A3.

ESTAÇÃO	A1	A2	A3
MEDIANA CHUVOSA	11,32	7,90	9,79
MEDIANA SECA	13,30	11,33	9,30

Na estação Seca houve alterações em todas as medianas de Turbidez, sendo de 17% em A1 e de 5% em A3. No ponto de medição A2 houve um grande incremento de aproximadamente 43% do valor em relação à estação chuvosa (Tabela 25).

Os valores de máximo e de mínima não foram considerados pois valores acima de 50unt foram considerados como erros de leitura e foram retirados da série.

O aumento da turbidez pode estar relacionado com a limpeza de grades e descarregador de fundo, mas também a grandes volumes de precipitação (ver item 4.5).

4.5. ANÁLISE DA VARIAÇÃO DAS VARIÁVEIS DEVIDO AO USO DA COMPORTA DE LIMPEZA. PARADA DE GERAÇÃO E DE CHUVAS SAZONAIS

Grades são equipamentos mecânicos dotados de barras verticais igualmente espaçadas, com a finalidade de evitar a entrada de detritos que possam danificar os equipamentos dispostos a sua jusante.

Os detritos a serem retidos pelas grades podem ser classificados em duas categorias: os naturais e os resultantes da ação poluidora do homem. Dentre os naturais, destacam-se os troncos de árvore, galhos, folhas, musgos e plantas aquática. Dos produzidos pelo homem, podemos citar os pneus, os plásticos, as latas e as garrafas.

A acumulação de detritos junto às grades depende de fatores tais como o tipo de barragem, a proximidade de cidades e a existência de árvores submersas no reservatório.

Como boa parte dos detritos é flutuante, as grades superficiais sofrem mais com os detritos do que as grades profundas.

Periodicamente é realizada a limpeza da grade da comporta da tomada d'água das usinas.

Essa limpeza consiste na retirada de partículas suspensas que se acumulam nas grades de entrada da tubulação forçada. Através da abertura lateral do vertedouro, há a retirada de detritos juntamente com a vazão vertida para o leito natural do ribeirão Ponte de Pedra.

Manter a grade limpa é muito importante para evitar a cavitação dos geradores com a entrada indesejada de detritos nas turbinas.

A PCH_{JG} possui descarregador de fundo (descarga de fundo) que integra câmaras de válvulas subterrâneas para manobra local e para conservação das comportas. O descarregador de fundo permite o rebaixamento do reservatório, bem como a descarga de sedimentos acumulados, em particular na área mais próxima da barragem.

A operacionalidade do descarregador de fundo leva a tomar precauções em relação ao respectivo equipamento hidromecânico. Para assegurar a sua operacionalidade deve colocar-se periodicamente em funcionamento o descarregador

de fundo. Este aspecto pode tornar-se muito importante quando existe preocupação relativamente ao assoreamento a montante e perda de sedimentos a jusante.

Foram fornecidas pela empresa ENGIE, concessionária das PCH_{JG} e PCH_{Rond.}, as datas de abertura de comporta para limpeza de grade e descarga de fundo no período estudado. Os dados de movimentação de comporta foram utilizados para a verificação de detecção de alteração abrupta de curta duração das variáveis estudadas neste trabalho.

4.5.1. Movimentação da comporta em 29/03/2018

Em 29/03/2018 as comportas verteram $38,34 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ às 07h30min saindo do nível vertedouro 365,26 m para 363,86 m e às 07h48min as comportas foram abertas novamente, vertendo $26,52 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ saindo do nível vertedouro 365,38 m para o 363,19 m.

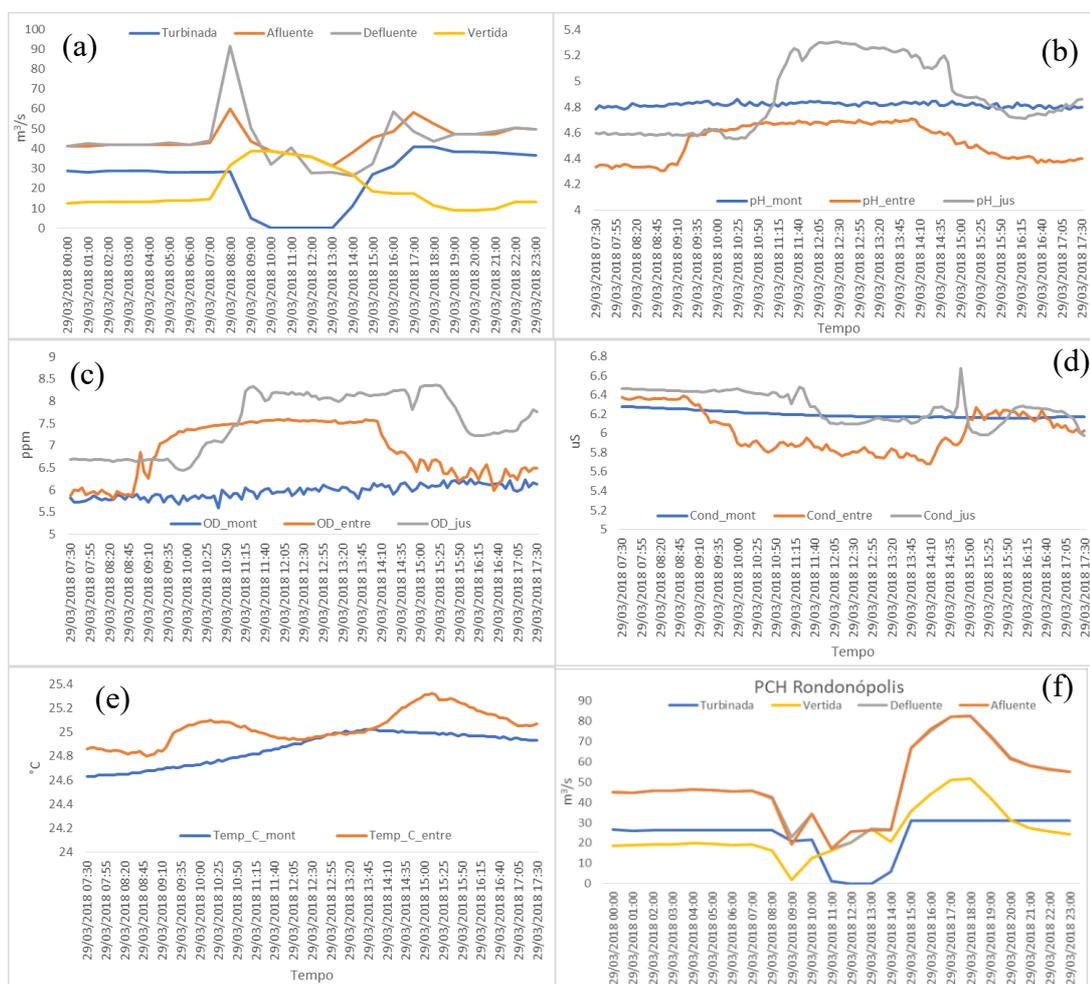


FIGURA 62: Leitura de parâmetros em 29/03/2018 em A1, A2 e A3 (a) Vazão PCH_{JG}; (b) pH; (c) OD; (d) Condutividade; (e) Temperatura da água; (f) Vazão PCH_{Rond}.

Na Figura 62 em (a) temos as vazões na PCH_{JG}.

Em (b) temos o comportamento natural do pH em A1 e, após aproximadamente 1h50min da abertura da comporta, o aumento do pH em 6% em A2, que permanece por cerca de 8h, quando decresce ao patamar anterior. O pH aumenta em A3 em 15% após 3h10min e permanece por cerca de 8h.

Em (c) A1 apresenta o comportamento natural do OD no Ribeirão Ponte de Pedra. Em A2, após aproximadamente 1h25min da abertura da comporta, houve um aumento de 13% do OD, que permaneceu por cerca de 8h. Em A3, o OD aumentou em 23% após 2h50min da abertura da comporta e permaneceu por cerca de 8h.

Em (d) A1 apresenta o comportamento natural da Condutividade do Ribeirão. Em A2, após aproximadamente 1h50min da abertura da comporta, houve uma diminuição de 8% da condutividade e seu efeito permaneceu por 5h20min. Em A3 a Condutividade diminuiu 5% após 4h20min e seu efeito permaneceu por cerca de 5h20min.

Em (e) A1 temos o comportamento natural da Temperatura da água do Ribeirão. Em A2, após aproximadamente 1h50min da abertura da comporta, a Temperatura da água aumenta e começa a decair após cerca de 2h30min. Esse aumento é devido a dois fatores: ao aumento da insolação e temperatura do ar e devido à vazão inicial ser da água superficial. Houve uma nova elevação dos valores da Temperatura da água após cerca de 6h50min depois da abertura das comportas, que perdurou por cerca de 2h50min. Esse novo pico de temperatura foi devido à volta da geração e à utilização da água retida no canal de adução. Em ambos os casos, a alteração não passou de 2%. Devido a problemas no sensor, não houve dados de Temperatura da água em A3.

As alterações em A3 coincidem com a diminuição de vazão turbinada na PCH_{Rond}.

A vazão vertida na captação em A3 não influencia parâmetros nesse ponto, pois em A3 mede-se apenas a vazão turbinada pela PCH_{Rond}.

4.5.2. Movimentação da comporta em 02/04/2018

Em 02/04/2018 as comportas verteram $32,25 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ às 14h11min, saindo do nível vertedouro 365,18 m para 363,23 m e às 14h22min as comportas foram abertas novamente, vertendo $23,27 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ saindo do nível vertedouro 365,35 m para o 363,43 m.

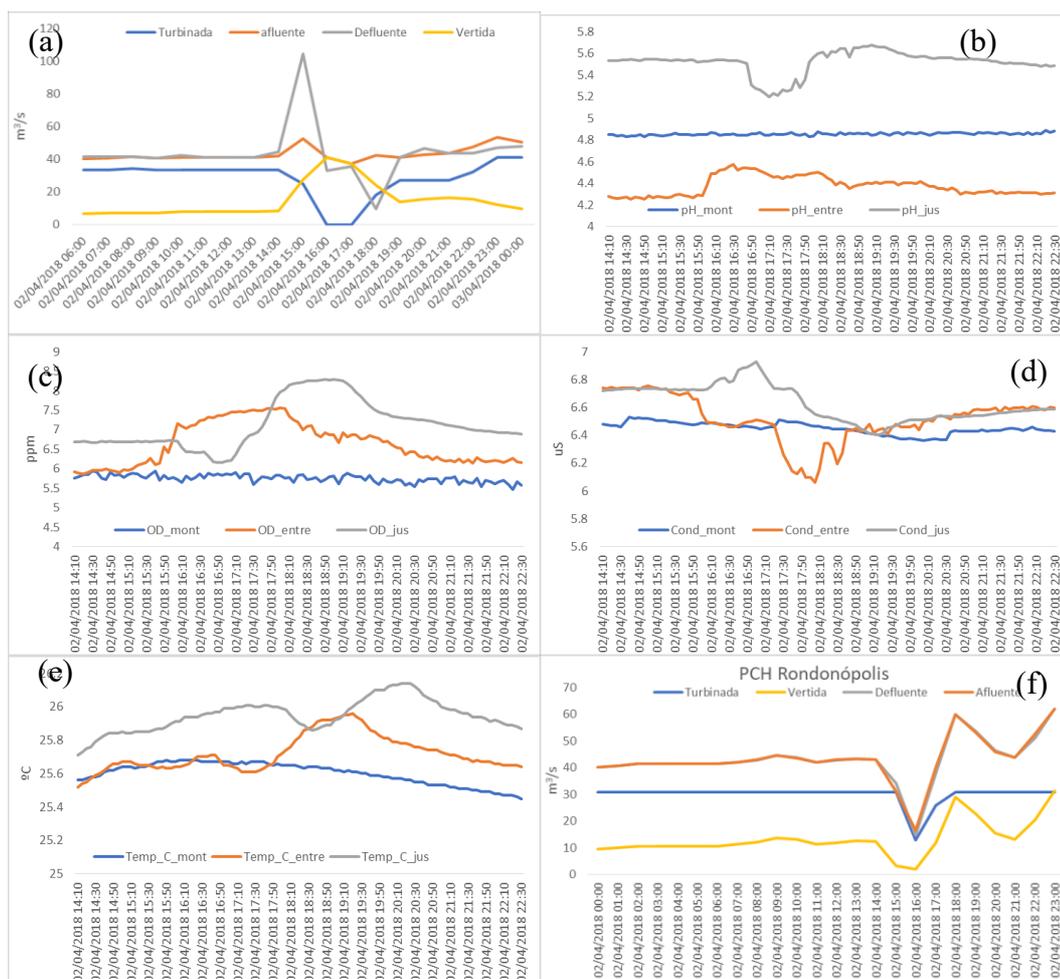


FIGURA 63: Leitura de parâmetros em 02/04/2018 em A1, A2 e A3 (a) Vazão PCH_{JG}; (b) pH; (c) OD; (d) Condutividade; (e) Temperatura da água; (f) Vazão PCH_{Rond}.

Na Figura 63 temos em (a) as vazões na PCH_{JG}.

Em A2, quando a vazão turbinada é zerada (Fig.63a), houve um aumento de 4,6% do pH (Fig.63b) e até 25% do OD (Fig. 63c). Houve uma diminuição de 1,5% da condutividade (Fig. 63d) e a temperatura (Fig.63e) oscila e tem acréscimo de 0,8%. Quando a PCH volta a gerar, a condutividade diminui e, na sequência, retornando aos patamares de antes da parada.

Em A3, entre 16h e 17h há uma diminuição da vazão turbinada com diminuição do pH (1,8%) e OD (23%) e um aumento da condutividade em cerca de 4,5%, a temperatura da água oscila para baixo e depois para cima em A3 a partir das 18h, com mesmo acréscimo de A2 (0,8%).

4.5.3. Movimentação da comporta em 03/04/2018

Em 03/04/2018, as comportas verteram $34,47 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ às 14h saindo do nível vertedouro 365,25 m para 364,13 m e às 14h22min as comportas foram abertas novamente, vertendo $23,27 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, saindo do nível vertedouro 365,36 m para 363,51 m.

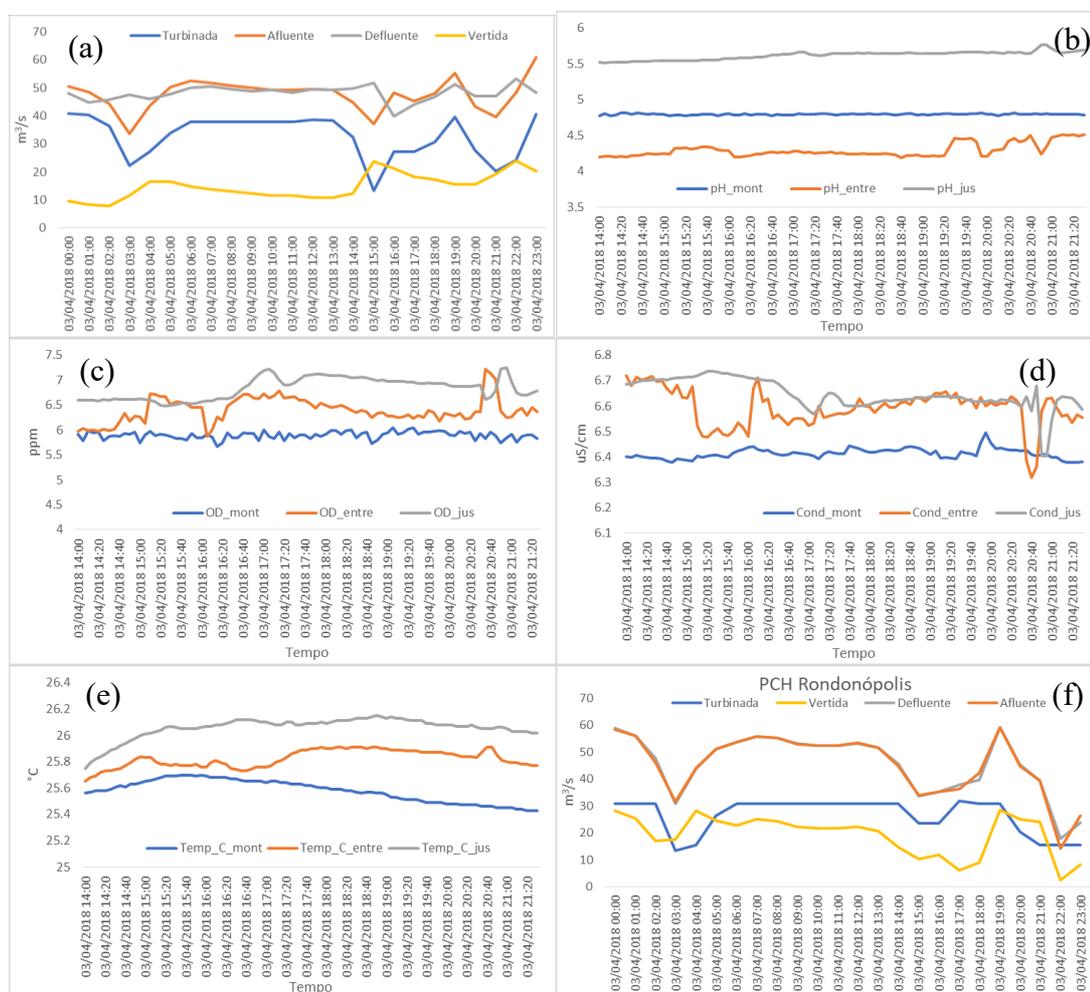


FIGURA 64: Leitura de parâmetros em 03/04/2018 em A1, A2 e A3 (a) Vazão PCH_{JG}; (b) pH; (c) OD; (d) Condutividade; (e) Temperatura da água; (f) Vazão PCH_{Rond.}

Na Figura 64a temos a vazão na PCH_{JG}. O comportamento do pH (Fig 64b) em A1 é natural. Em A2, após a abertura da comporta, aumenta cerca de 2% por cerca de 1h. Em A3 quase não se percebe o efeito da abertura da comporta no valor do pH.

Devido à chuva de 12,3mm registrada em A1, entre 16h40min e 18h25min, o pH tem um aumento em A2 entre 19h30min e 20h50min, cerca de 3h após o começo da chuva em A1. Houve, também, uma pequena alteração do pH em A3 entre 20h45min e 21h05min.

Na Figura 64c, temos o comportamento do OD, natural em A1.

Quando houve uma diminuição da água turbinada na PCH_{JG}, houve um aumento de cerca de 8%, entre 20h30min e 20h55min, do valor de OD em A2, que tem um pico negativo quando chega à água vertida. Em A2 e A3, houve uma pequena alteração positiva do valor de OD entre 20h45min e 21h05min, também por uma diminuição da água turbinada. Verifica-se um vínculo entre a diminuição da água turbinada e o aumento do OD.

A Condutividade (Fig.64d) tem em A1 o comportamento natural. Em A2, após aproximadamente 1h05min da abertura das comportas de limpeza, a condutividade diminui e permanece por cerca de 1h, entre 16h40min e 18h25min. A Condutividade diminui novamente em A2 e A3 entre 20h30min e 21h05min. O comportamento da condutividade é o oposto ao do OD.

A Temperatura da água (Fig. 64e) em A1 apresenta o comportamento natural. Em A2, houve uma diminuição da Temperatura da água com a diminuição da água turbinada na PCH_{JG} entre às 15h e às 17h20min e pelo mesmo motivo há um acréscimo de temperatura entre às 20h30min e 20h45min. O acréscimo devido à passagem da água vertida pelo leito do rio é da ordem de décimos e só foi possível ser detectada devido aos dados de alta frequência de amostragem e à precisão do equipamento.

4.5.4. Movimentação da comporta em 06/04/2018

Em 06/04/2018, as comportas verteram $35,51 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ às 09h49min, saindo do nível vertedouro 365,19 m para 364,33 m e às 10h as comportas foram abertas novamente vertendo $14,72 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, saindo do nível vertedouro 365,26m para o 364,33m.



FIGURA 65: Leitura de parâmetros em 06/04/2018 em A1, A2 e A3 (a) Vazão PCH_{JG}; (b) pH (c) OD (d) Condutividade. (e) Temperatura da água; (f) Vazão PCH_{Rond}.

Na Figura 65a, temos as vazões nos três pontos de monitoramento, quando na PCH_{JG} a vazão turbinada é zerada.

Com a parada das turbinas da PCH_{JG}, houve um aumento da água vertida que refletiu em pequenos aumentos das medidas do pH (Fig.65b), OD (Fig. 65c) e Temperatura da água (Fig. 65e) e uma diminuição da condutividade (Fig. 65d) em A2.

Entre às 11h e entre às 13h e às 17h houve uma diminuição da vazão turbinada pela PCH_{Rond} que provocou o aumento do pH, OD e Temperatura, e a diminuição da condutividade. Essas alterações foram maiores que as provocadas pela parada das turbinas na PCH_{JG} em A2.

4.5.5. Parada de geração de PCH José Gelázio em 25/05/2018 a 26/05/2018

Em 25/05/2018 houve uma parada contínua de geração na PCH_{JG} a partir das 06h. conforme relatório de vazão da ENGIE.



FIGURA 66: Leitura de parâmetros em 25/05/2018 em A1. A2 e A3 (a) Vazão PCH_{JG}; (b) pH; (c) OD; (d) Condutividade; (e) Temperatura da água; (f) Vazão PCH_{Rond}.

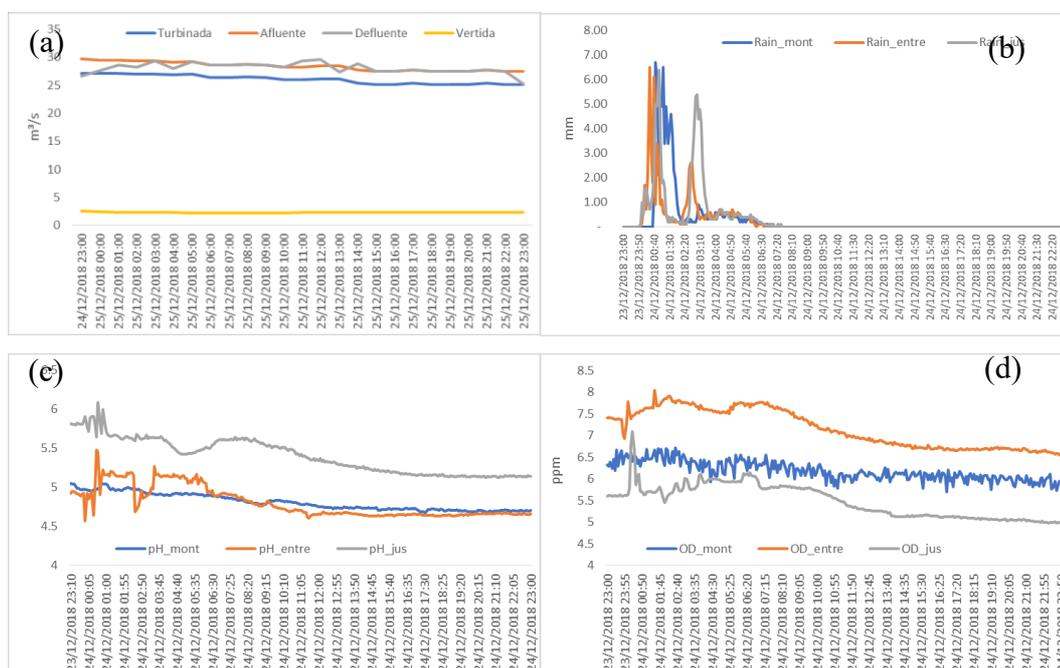
Na Figura 66 temos as leituras das variáveis após a parada das turbinas na PCH_{JG}, em um mês da estação seca, com passagem de toda a água afluente pelo trecho de vazão reduzida do leito natural do ribeirão Ponte de Pedra.

Quando houve a parada de geração na PCH_{JG}, não havia ocorrido precipitação a mais de 72 horas nos pontos monitorados. A passagem da água da vazão vertida pelo leito natural em PCH_{JG}, mesmo após várias horas de observação, não apresentou picos de alteração de nenhuma das variáveis. Verificou-se também o aumento do valor de OD, acompanhando a temperatura da água.

Esse comportamento é o mais próximo do natural que foi medido nos pontos monitoradas A2 e A3. Mesmo sem estar gerando o comportamento da Temperatura da água, não altera em A2 e A3, acumulando o aumento entre os pontos.

Em 29/06/2018, houve uma nova parada de geração da PCH_{JG} e o comportamento das variáveis foram semelhantes aoque aconteceu entre os dia 25 e 26/05/2018.

4.5.6. Chuva em 24/12/2018



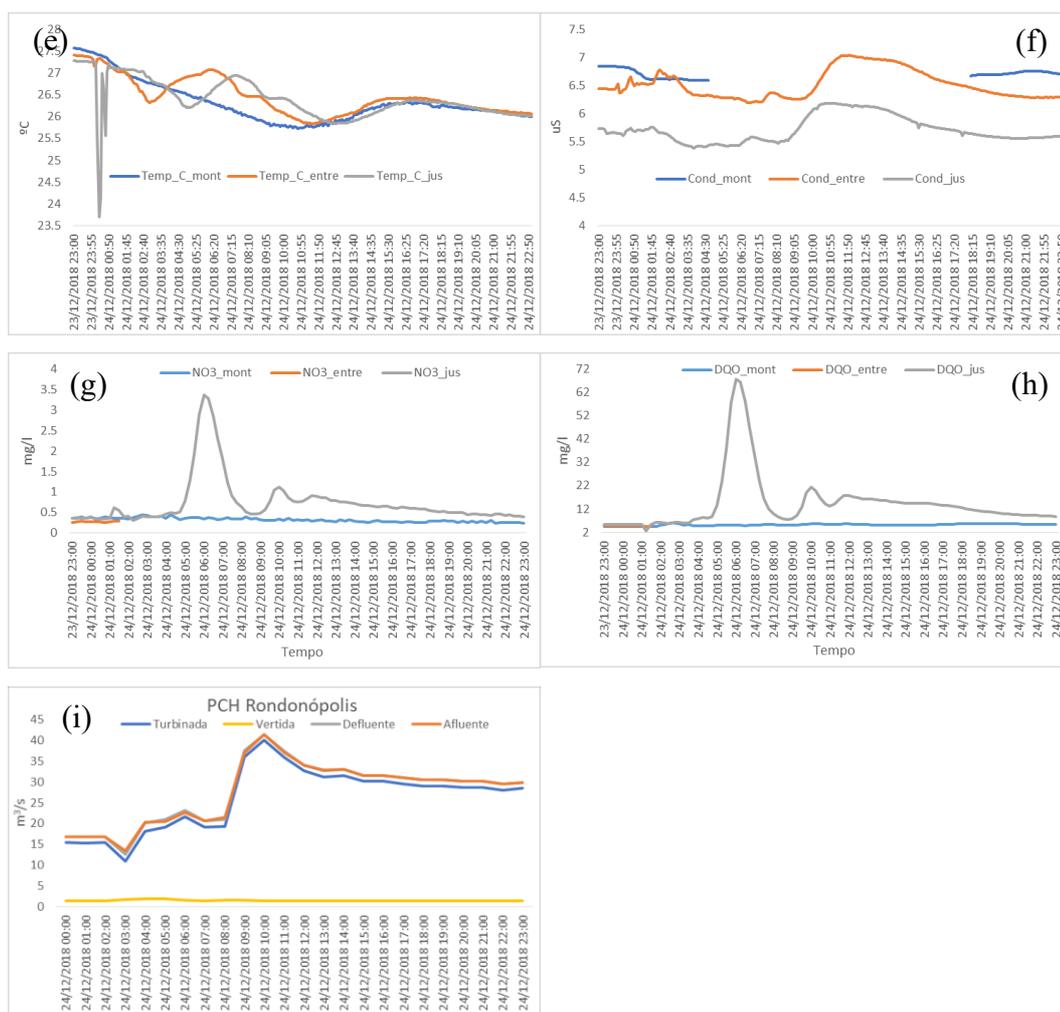


FIGURA 67: Leitura de parâmetros em 24/12/2018 em A1, A2 e A3 (a) vazão (b) precipitação (c) pH (d) OD. (e) Condutividade. (f) Temperatura da água. (g) Nitrato (h) DQO. (i) Vazão PCH_{Rond}

Em 24/12/2018, houve de 00h até às 07h uma precipitação de moderada à forte, considerando moderada maior que 5 e menor que 25mm/h e forte maior que 25mm/h, que somou $82,9 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ em A1, $67,9 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ em A2 e $93,9 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ em A3.

Nas Figura 68, temos as leituras das variáveis após uma forte chuva em um mês da estação chuvosa.

A estabilidade da geração da PCH_{JG} e da vazão vertida (Fig. 67a) não se reflete nas variáveis analisadas.

Na Figura 67b, temos a distribuição da chuva no tempo nos 3 pontos estudados.

O pH (Fig.67c) apresentou oscilação imediata em A2 e A3, com variações entre 4% a 6%.

O OD (Fig. 68d) também oscilou de imediato como o pH, com variações entre 2.5% em A2 a 6.5% em A3.

A temperatura (Fig. 68e) oscilou rapidamente com a chuva em A2 (2.6%) e A3 (4.6%), apresentado também um pico de decréscimo no mesmo instante em que OD e pH subiram.

A condutividade (Fig. 67f) oscila em A2 e A3 de forma similar aoD, pH e Temperatura da água. Em A1 não há dados.

Houve um pico de Nitrato (Fig. 67g) e de DQO (Fig. 67h) que iniciou às 5h e terminou às 8h. O pico chegou a ser 7 vezes o valor inicial do Nitrato e 11 vezes o valor inicial de DQO.

Um segundo pico, tanto de Nitrato quanto de DQO, acontece às 10h, e coincide com o aumento da vazão na PCH_{Rond}. Esses valores permaneceram acima da média até o final da chuva, quando voltou aos patamares de antes do início da chuva.

Na Figura 67i temos as vazões em PCH_{Rond} e vemos que é a chuva, de fato, que provoca as alterações em A3 e não o controle da vazão pelas PCHs.

A forte chuva mostrou a estabilidade das variáveis em A1 mesmo na estação chuvosa e que uma forte chuva pode provocar picos de alterações nas variáveis a jusante das PCHs.

4.5.7. Chuva em 01/05/2019



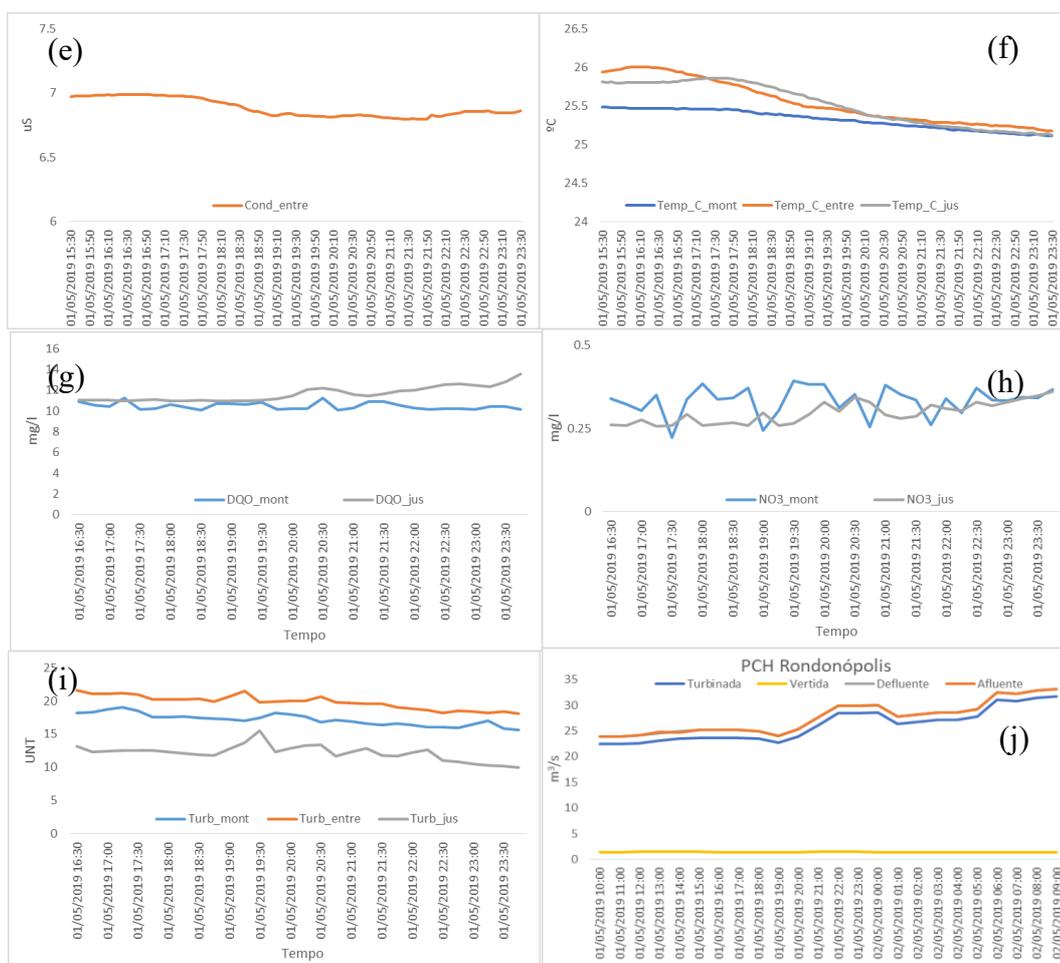


FIGURA 68: Leitura de parâmetros em 01/05/2019 em A1, A2 e A3 (a) vazão (b) precipitação (c) pH. (d) OD. (e) Condutividade. (f) Temperatura da água (g) Nitrato (h) DQO (i) Turbidez. (j) Vazão PCH_{Rond}

Em 01/05/2019 houve de 17h45min até às 21h uma precipitação de fraca à moderada, considerando fraca até 5 mm/h e moderada maior que 5 e menor que 25mm/h e que somou $29.8 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ em A1, $28,5 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ em A2 e $16,5 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ em A3.

Na Figura 68, temos as leituras das variáveis estudadas em um mês da estação seca.

Não foi detectado nenhum pico ou alteração significativos pelos sensores.

4.5.8. Movimentação da comporta em 03/05/2019.

Em 03/05/2019 as comportas verteram $26,58 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ às 09h43min, saindo do nível vertedouro 364,85 m para 363,53 m e às 10h verteram $11,18 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ mantendo em 363,53 m, e às 11h45min verteu $3.19 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, saindo do nível 365,1 m para 364,05m.

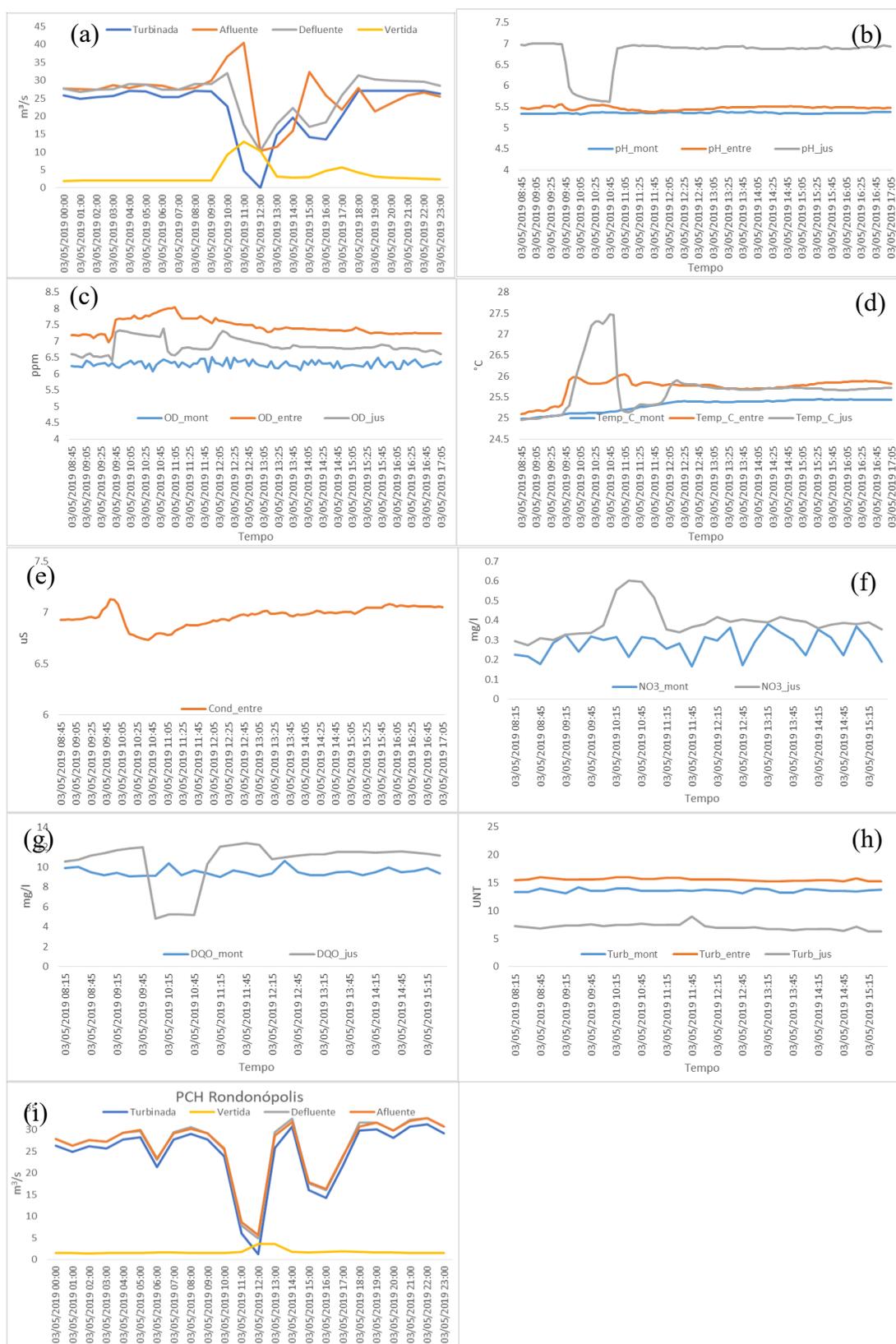


FIGURA 69: Leitura de parâmetros em 03/05/2019 em A1, A2 e A3 (a) Vazão da PCHJG; (b) pH; (c) OD; (d) Temperatura da água; (e) Condutividade; (f) Nitrato; (g) DQO; (h) Turbidez; (i) Vazão da PCHRond.

Na Figura 69, temos as leituras das variáveis após a abertura das comportas, um mês da estação seca, mas ainda com nível alto de vazão do ribeirão Ponte de Pedra.

As vazões turbinadas na PCH_{JG} (Fig. 69a) e da PCH_{Rond.} (Fig. 69i) são zeradas às 12h, no entanto, nem toda água foi vertida.

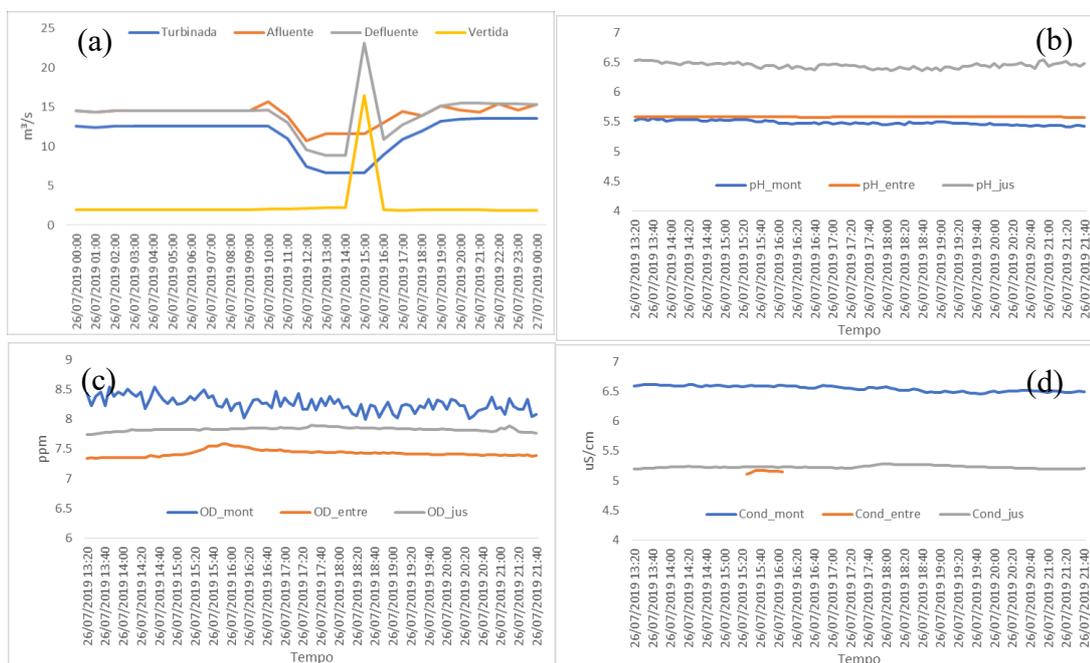
O pH (Fig. 69b), o OD (Fig. 69c), a condutividade (Fig. 69d) e a Temperatura da água (Fig. 69e) apresentaram em A2 um leve aumento dos valores às 9h45min.

Em A3, as alterações foram maiores em amplitude chegando a 10% de diminuição do pH e de aumento do OD.

O nitrato (Fig. 69f) teve um pico que chegou a dobrar o valor entre às 10h e às 11h. O DQO (Fig. 69g) no mesmo período de tempo diminuiu cerca de 50% de seu valor. Em ambos os casos coincide com a retenção da vazão turbinada na PCH_{Rond.}.

4.5.9. Movimentação da comporta em 26/07/2019

Em 26/07/2019, as comportas verteram 29,95 m³s⁻¹ às 14h20min, saindo do nível vertedouro 364,88 m para 363,68 m.



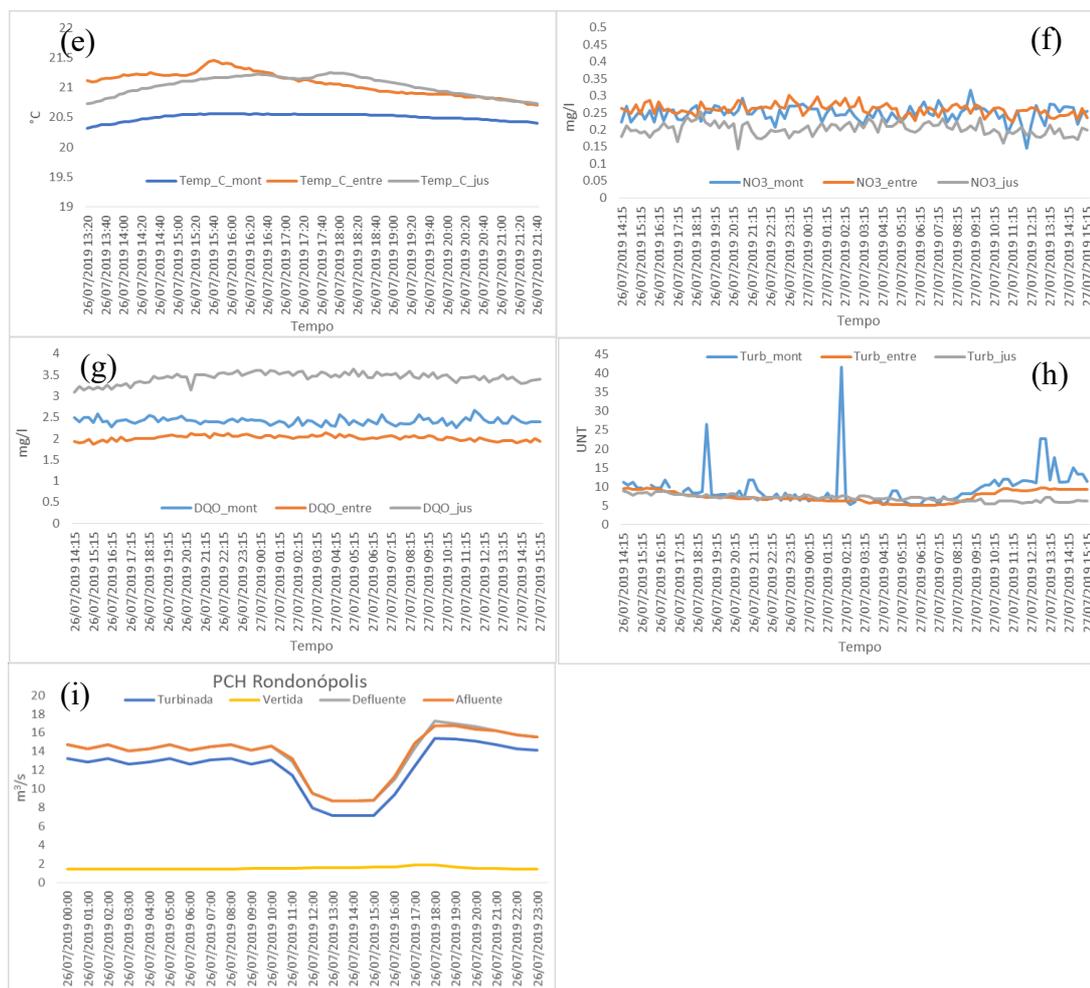


FIGURA 70: Leitura de parâmetros em 26/07/2019 em A1, A2 e A3 (a) Vazão da PCH_{JG}; (b) pH; (c) OD; (d) Condutividade; (e) Temperatura da água; (f) Nitrato; (g) DQO; (h) Turbidez; (i) Vazão da PCH_{Rond}.

Na Figura 70, temos as leituras das variáveis em 26/07/2019, em um mês de seca, com vazão baixa do ribeirão Ponte de Pedra.

Houve uma redução da vazão turbinada da PCH_{JG} entre 11h e 17h e um pico de vazão vertida às 15h, referente à manobra na comporta para limpeza às 14h20min (Fig. 70a).

Não houve alterações significativas em A2 e A3 de nenhuma das variáveis analisadas. Além disso, a temperatura da água tem uma oscilação decorrente do aumento da vazão vertida em A2.

4.6. ANÁLISE DA VARIAÇÃO NATURAL DAS VARIÁVEIS DA QUALIDADE DA ÁGUA

O Domínio Cerrado é naturalmente marcado por solos altamente intemperizados com baixas concentrações de nutrientes (SILVA et al.. 2011). Isso se reflete nos baixos valores relatados para condutividade elétrica ($<10 \mu\text{S cm}^{-1}$) e concentrações de nutrientes nos sistemas aquáticos do Cerrado em condições primitivas (PADOVESI-FONSECA. C.. MARTINS-SILVA. 2012; WANTZEN. 2002).

A capacidade de filtragem de matas ciliares preservadas contribui para baixas concentrações de nutrientes em riachos, principalmente em áreas agrícolas, onde a poluição difusa decorrente do escoamento costuma ser a fonte mais representativa de nutrientes (SILVA et al.. 2011). Wantzen (2002) também descreveu o aspecto cristalino das águas do Cerrado como consequência do efeito de filtro das áreas úmidas do campo, zonas alagadas de riachos muito comuns no domínio do Cerrado.

A análise da variação natural das variáveis da qualidade da água do ribeirão Ponte de Pedra foi realizada no ponto A1, a montante da PCH_{JG}, localizada no trecho fora da influência das hidrelétricas.

Na estação chuvosa houve em A1 um aumento da condutividade elétrica em 19,76% do valor médio e de 132,5% do valor mediano do DQO. No mesmo período, houve uma diminuição do valor mediano do pH de 10,42%, da temperatura de 17,01 %, do OD de 22,52% e da Turbidez de 17,03%. O Nitrato praticamente não apresentou variação no ponto A1.

Observa-se a correlação muito forte (0,93) entre OD e pH e uma forte correlação negativa da temperatura com OD e pH (0,82) (Fig. 21). Comportamento similar foi relatado por Fonseca et al. (2014) em estudo de riachos que se encontram preservados no Cerrado do Distrito Federal, que apresentou mediana de temperatura 21,4 °C , OD=5,27 mg.L⁻¹, Cond= 7,3 $\mu\text{S.cm}^{-1}$, Turb= 2,54 UNT e Nitrato = 0,003 mg.L⁻¹.

Silva et al, (2011), em estudos também realizados em riachos no Distrito Federal, no ambiente de cerrado, encontrou diferenças sazonais em todas as áreas estudadas, sendo que na maioria dos casos as concentrações na estação chuvosa foram maiores do que na estação seca, apesar do aumento da descarga da estação chuvosa.

Em estudo realizado entre o período 2006 e 2013 com dados semestrais dos Relatórios de Monitoramento Ambiental da área de influência das PCH_{JG} e PCH_{Rond}, Oliveria (2016) obteve no mesmo ponto denominado de A1 neste estudo uma temperatura mediana de 24,8°C, com concentrações de OD de 7,00 mg.L⁻¹, O pH de 5,79, condizente com o baixo resultado de outras variáveis, como a dureza (2,00 mg.L⁻¹) e a condutividade elétrica (5,6 μ S.cm⁻¹). Uma turbidez de 10,24 UNT e cor verdadeira 76 mg.Pt.L⁻¹, com as moderadas concentrações de ferro dissolvido medidas (0,34 mg.L⁻¹) e Sólidos totais (75 mg.L⁻¹). A DBO foi de 2 mg.L⁻¹ e a DQO 11 mg.L⁻¹, indicando o aporte de material inorgânica pela bacia. Houve concentrações de nutrientes moderadas tanto para nitrogênio Kjeldahl (0,50 mg.L⁻¹) quanto de fósforo total (0,025 mg.L⁻¹).

Fantin-Cruz (2016) cita que o gradiente do rio Correntes antes do represamento apresentou diferenças na variação natural entre os locais de amostragem na qualidade da água ao longo da longitudinal. A temperatura da água e o pH apresentaram variação entre -2 e + 2%, a condutividade elétrica e sólidos totais na parte superior do rio entre -8 a +4,0%, na parte inferior entre +11 a +32%; turbidez e fósforo total com variação entre -4 e -25%, e oxigênio, nitrato, amônio e ortofosfato com variação entre -13 e 10% . As baixas concentrações de turbidez encontradas no ribeirão Ponte de Pedra foram semelhantes aos valores encontrados no Rio Correntes (FANTIN-CRUZ et al., 2016).

Em estudos realizados nos afluentes da margem esquerda do rio São Lourenço, Fantin da Cruz (2018) verificou uma diminuição de valores da mediana da temperatura da água dos rios Tenente Amaral, Saia Branca, Brilhante e Prata, que variam entre 25,6 e 24,2°C na estação chuvosa e entre 23° e 21,8°C na estação seca. As concentrações de oxigênio dissolvido oscilaram entre 6,15 mg/L no rio São Lourenço e 9,23 mg/L no rio Prata, com maiores valores no Estação Seca, quando também foram registradas as menores temperaturas da água. Em todos os rios, o pH foi menor no período de transição entre as estações seca e chuvosa, com correlação positiva moderada com a vazão. Características diferentes do Ponte de Pedra, que é afluente do rio Vermelho, principal afluente do rio São Loureço, que está em sua margem direita.

A condutividade elétrica oscilou entre 1,4 $\mu\text{S}/\text{cm}$ no rio Prata e 45,7 $\mu\text{S}/\text{cm}$ no rio Areia, nos rios Saia Branca, Brilhante e Prata. A condutividade foi menor na estação de seca e maior na chuvosa, concordando com Ponte de Pedra, a exceção foi o rio Tenente Amaral.

A turbidez e o Nitrato nos rios Saia Branca, Brilhante, Tenente Amaral e Prata se assemelham ao Ponte de Pedra, com baixos valores, inclusive na estação chuvosa quando apresenta os maiores valores.

4.7. ANÁLISE DA VARIAÇÃO DAS VARIÁVEIS DA QUALIDADE DA ÁGUA DEVIDO AS PCHS

As análises de coeficiente de correlação cruzada destenciada entre a vazão e as variáveis estudadas (Fig. 12 a 18) apresentam um comportamento diferente para cada ponto (A1, A2 e A3).

Em A1, a montante da represa, o coeficiente de correlação cruzada destenciada entre a vazão e o pH, OD, condutividade, Nitrato e DQO apresentam o mesmo comportamento na estação seca e chuvosa, ou seja, quando é positiva na estação seca é positiva na estação chuvosa e quando é negativa na estação seca é negativa na estação chuvosa. A temperatura e a turbidez apresentam comportamento inverso nas estações, sendo ambas fortemente correlacionadas na seca e moderadamente anticorrelacionadas na estação chuvosa.

Em A2, a jusante a PCH_{JG}, o coeficiente de correlação cruzada destenciada entre o DQO com a vazão apresentam o mesmo comportamento na estação seca e de chuva, sendo o DQO fortemente correlacionado em ambas as estações. A turbidez é moderadamente anticorrelacionadas na seca com a vazão e fortemente anticorrelacionadas na estação chuva. O pH, OD, temperatura, condutividade e Nitrato apresentam correlações inversas nas estações.

Em A3, a jusante da PCH_{Rond}, o coeficiente de correlação cruzada destenciada entre o pH, o DQO, e a turbidez apresentam o mesmo comportamento na estação seca e chuvosa. O OD, a temperatura, a condutividade e o Nitrato apresentam correlações inversas nas estações, sendo ambos fortemente correlacionados na seca e anticorrelacionados de maneira fraca na estação chuvosa.

Na estação seca: o OD, a temperatura e o DQO têm o mesmo comportamento nos 3 pontos estudados, o pH e o Nitrato têm o mesmo comportamento em A1 e A3, a condutividade, o mesmo comportamento em A1 e A2 e a turbidez, o mesmo comportamento em A2 e A3.

Verificou-se que na estação chuvosa o pH, a temperatura, o DQO e a turbidez têm o mesmo comportamento nos 3 pontos estudados; mas dobram a anticorrelação após as PCHs. A condutividade tem o mesmo comportamento em A1 e A3, o Nitrato em A1 e A2 e o OD, o mesmo comportamento em A2 e A3.

A análise de correlação cruzada destendenciada mostrou que a condutividade tem correlação fraca com a vazão em A3, independente da estação. A turbidez quando tem uma forte correlação na seca apresenta uma fraca correlação na estação chuvosa, e o contrário também acontece, mostrando que a correlação da Condutividade com a vazão dependendo das estações. O DQO apresenta um comportamento igual em todas as estações e pontos estudados, sempre correlacionado positivamente com a vazão. A temperatura demonstra ser a variável mais estável, tendo o mesmo comportamento nos 3 pontos estudados. A temperatura está diretamente correlacionada com a vazão na estação seca e inversamente correlacionada na estação chuvosa.

De forma geral, existe uma maior estabilidade das curvas de correlação das variáveis com a vazão na estação chuvosa, com exceção do Nitrato e DQO em A3 e da condutividade nos três pontos. Esta maior estabilidade das correlações na estação chuvosa sugere um comportamento mais próximo do natural, mesmo com o reservatório e as obras das PCHs.

O controle da vazão faz com que a variação do fluxo nos pontos A2 e A3 tenha comportamento diferente de A1 (natural), principalmente na estação seca.

Não se verificou alteração significativa entre os dados analisados durante o dia e a noite em nenhuma das variáveis analisadas.

As variáveis pH, Condutividade e Turbidez mensuradas no ponto A2 no ribeirão Ponte de Pedra, que apresentaram alterações significativas, apresentaram a mesma característica do Complexo Tenente Amaral e na PCH São Lourenço citados por Fantin da Cruz (2018).

Foram analisados todos os eventos de limpeza de grade e/ou descarregador de fundo no período estudado, com abertura do vertedouro, às vezes com chuva ou com

fechamento de turbina, e em nenhum deles foi verificado que há um padrão de comportamento na variação das variáveis.

Devido às características geológicas do riacho, que apresenta pedras que formam pequenas piscinas em seu leito, dependendo da época do ano e do volume da água vertida na PCH_{JG} para a limpeza de comporta ou desarenação, a água vertida tende a ficar retida no curso do riacho entre as duas PCHs, ocupando áreas que naturalmente estariam com água se não houvesse desvio para as PCHs. A mesma lógica se aplica a pequenos volumes de precipitação.

Quando o volume vertido na PCH_{JG} chega aos pontos monitorado na PCH_{RO}, o tempo percorrido nem sempre é o mesmo. Novamente depende do volume vertido na limpeza ou chuva e, também, do volume vertido para vazão ecológica e da estação do ano.

Após ser realizado o procedimento de limpeza de comporta ou desarenador, o pH e OD aumenta ou não é alterado e a Condutividade diminui ou não é alterada. A Temperatura depende de alguns fatores, como estação do ano e do período do dia em que foi realizado o procedimento. Podendo variar de acordo com a temperatura da água superficial do reservatório, que varia com a temperatura do ar.

Eventos de chuva forte, como a que aconteceu em 24/12/2018, oscila os valores de pH e temperatura, aumenta a condutividade e OD e pode aumentar fortemente os valores de Nitrato e DQO.

A parada de geração, como a da PCH_{JG} em 25/05/2018, com a passagem da vazão pelo curso natural do rio, mostrou o que seria o comportamento natural das variáveis na estação seca nos pontos monitorados em A2 e A3, com curvas suaves e previsíveis seguindo um comportamento semelhante ao ponto A1.

4.7.1. Alterações em A1

A matriz de correlação em A1, realizada através do coeficiente de correlação de postos de Spearman, resultou em 06 correlações fortes ou muito fortes, sendo 2 positivas e 4 negativas. Em A1, a Temperatura da água está fortemente correlacionada de forma negativa com o pH e OD e fortemente correlacionada com Condutividade e Nitrato.

Há uma correlação moderada entre Nitrato e Condutividade (quanto mais íons de Nitrato maior a condutividade) e uma forte correlação negativa entre Nitrato e pH.

Na estação seca as correlações são muito fracas ou fracas. Houve apenas as correlações moderadas negativas da Temperatura da água com o OD e do pH com Nitrato.

Na análise de Componentes Principais em A1 na estação seca (Fig.30), a temperatura é o parâmetro com maior dimensão. No entanto, a temperatura perde essa importância dimensional na estação chuvosa, quando passa a ser o OD o parâmetro com maior dimensionalidade. Quando são considerados todos os dados da estação seca e chuvosa, o OD mantém a sua importância dimensional, sendo o parâmetro com maior dimensão. O OD, pH, Temperatura e Nitrato estão fortemente correlacionados entre si.

Na estação seca há uma faixa menor de valores medidos de pH em A1 (Fig. 56e). Um comportamento semelhante era esperado nos pontos A2 e A3, o que não ocorreu devido à presença das PCHs.

Conforme o Conceito do Rio Contínuo (RCC), o pH deve aumentar de montante para jusante. No entanto, ocorreu uma mudança significativa ($p < 0.001$) no valor da mediana do pH no curto trecho de A2 para A3 e essa alteração pode estar ligada à presença das hidrelétricas (atividade antrópica), conforme o Conceito de Descontinuidade em Série (SDC).

4.7.2. Alterações em A2

A matriz de correlação em A2 realizada através do coeficiente de correlação de postos de Spearman, resultou em 2 correlações positivas fortes. Houve uma diminuição da correlação entre as variáveis de forma geral. Apenas a correlação condutividade x Nitrato é maior em A2 do que em A1.

Na estação seca, algumas características foram mantidas entre A1 e A2, como a correlação positiva entre Nitrato e temperatura e entre Nitrato e condutividade. No entanto, essas correlações que em A1 acontecem de forma moderada, em A2 são fortes. A correlação negativa moderada entre OD e Temperatura em A1 manteve-se em A2. Outras características tiveram pouca alteração, como a correlação negativa moderada entre o pH e Nitrato e entre o pH e a Temperatura. Por outro lado, o DQO e Turbidez

apresentaram correlações entre fracas e moderadas, com parâmetros com os quais só havia correlações muito fraca.

Na análise de Componentes Principais, em A2 temos na estação seca um comportamento muito diferente de A1, quando as variáveis que aparecem com maior dimensionalidade são a condutividade (0,87) e a temperatura (0,8). Na estação chuvosa, essas variáveis passam a ser o OD (0,75) e o DQO (0,92), quando são considerados todos os dados da estação seca e chuvosa, o Nitrato (0,85) e a Condutividade (0,82) apresentam maior dimensionalidade.

4.7.3. Alterações em A3

Em A3, considerando todos os dados, temos 6 correlações fortes, sendo 4 positivas e 2 negativas. Fazendo uma análise do comportamento das variáveis que mais se correlacionaram em A3, considerando as duas estações seca e chuvosa nos pontos da estações A1, A2 e A3, observamos que, das 10 correlações, 7 tendem a voltar para os valores próximos de A1, após terem alterado gradiente em A2. As correlações de $\text{PH} \times \text{NO}_3^-$, $\text{DQO} \times \text{pH}$ e $\text{DQO} \times \text{OD}$ são as únicas que mantêm uma queda contínua de correlação de A1 para A3.

Na estação seca, a maior parte das correlações mantiveram o sinal, mas alteraram o gradiente. Houve aumento da correlação positiva entre Turbidez e DQO, Temperatura e Condutividade, Temperatura e Nitrato, Condutividade e Nitrato e entre a Turbidez e Nitrato. Houve a diminuição da correlação negativa entre a temperatura e OD (diminuiu a sensibilidade de OD à mudança de temperatura da água) e pôr fim à correlação negativa moderada entre pH e Nitrato desapareceu, mostrando que nesse ponto eles não possuem correlação.

Fazendo uma análise em cascata das variáveis que mais se correlacionaram, observa-se que, na estação seca de A1 para A2 todas as variáveis aumentaram a correlação e, com a exceção de OD x pH, os demais parâmetros aumentaram as correlações de A1 para A3. Com menos volume de água na estação seca, as variáveis estão mais sensíveis às alterações provocadas pelas PCHS.

Na estação chuvosa em A1, as variáveis estudadas alteram o gradiente em A2 (à exceção da relação DQO x OD). No entanto, em A3 essas variáveis tendem a retornar aos patamares de A1. Em A2, chama a atenção a forte correlação negativa

entre pH e OD (-0.71), que é um comportamento oposto ao que acontece no trecho natural em A1 no mesmo período. Esse comportamento está de acordo com o Conceito da Descontinuidade Serial. O SRD diz que os efeitos provocados pelo barramento e pelo canal de adução serão amenizados após a entrada de um afluente a jusante do reservatório. No caso, não se trata de um afluente, mas apenas da volta do ribeirão ao leito natural e ao fato de o canal de adução da PCH_{Rond} ser menor e não possuir reservatório.

Na análise de Componentes Principais em A3, na estação seca a condutividade (0,82) e Nitrato (0,79) são as variáveis que apareceram com maior dimensão. Na estação chuvosa, essas variáveis passam a ser o Nitrato (0,87) e OD (0,81). Quando são considerados todos os dados das estações seca e chuvosa, o Nitrato (0,87) passa a ser a maior dimensionalidade, seguido do OD (0,81).

4.7.4. Alterações no pH

Na estação seca há um aumento significativo do pH nos três pontos considerados. Esses aumentos podem estar relacionados com a elevação da atividade fotossintética que acontece nesse período. Como as águas do ribeirão Ponte de Pedra ficaram mais claras, houve uma maior penetração dos raios solares e um aumento da população de algas e do consumo de CO₂ da água (principal fonte natural de acidez da água). Desta forma, com o consumo elevado do CO₂, houve a diminuição da acidificação da água.

Com a assimilação de CO₂ livre pelas microalgas, houve o aumento na proporção das formas de carbono inorgânico combinadas na água, isto é, bicarbonato e carbonato. O carbonato, ao reagir com a molécula de água, libera íons bicarbonato e OH⁻ para a água, elevando, desta forma, o pH (BOYD, 2000), o que é verificado na Figura 55. A magnitude da elevação do pH por ação da fotossíntese dependerá, entre outros fatores, da alcalinidade da água. Em águas de baixa alcalinidade espera-se maior elevação do pH (BOYD, 2000).

Na estação chuvosa, houve um aumento da área alagada do reservatório. A acidez verificada nas amostragens são decorrentes do aumento da presença de ácidos fúlvicos e húmicos resultantes da degradação da matéria orgânica presente nas áreas

alagadas do leito do rio e do reservatório. Essa diminuição do pH não é observada de imediato em A2, que já apresentava um caráter mais ácido na estação seca.

A chegada das chuvas, que possuem caráter ácido, ajuda a explicar a diminuição do pH na estação chuvosa.

Nos testes de correlação cruzada (Fig 12), o pH na estação chuvosa está correlacionado negativamente com a vazão. O valor do ρ DCCA indica que, na estação chuvosa, o aumento da vazão diminui a correlação com o pH.

4.7.5. Alterações no OD

Assim como o aumento do pH, o aumento de OD na estação seca esteve diretamente relacionado ao aumento da atividade fotossintética e à diminuição de ácidos fúlvicos e húmicos no ribeirão Ponte de Pedra. As águas mais limpas facilitaram a entrada do sol e aumentaram a produção de algas. Esse fato foi comprovado em campo, inclusive, pela maior necessidade de limpeza dos equipamentos.

Na estação chuvosa, o OD é maior em A3 e na estação seca é maior em A2 (Fig 56 a, b, c).

Em A2, as medianas do OD variam pouco durante os meses do ano (Fig. 56) e em A1 e A3 essas variações são maiores. Esse amortecimento das alterações dos valores de OD em A2 deve-se à presença do lago de acumulação a montante da PCH_{JG}.

Nos testes de correlação cruzada destendenciada (Fig. 13) na estação seca, o ρ DCCA está correlacionado de forma negativa com a vazão em todos os pontos. Na estação chuvosa, há uma correlação direta do OD com a vazão em A2 e A3.

Na análise de Componentes Principais (Fig. 39. 42 e 45) e nas matrizes de correlação (Fig 22 a 24), o pH e OD possuem forte correlação negativa em A2 apenas na estação chuvosa. O fato está relacionado com o aumento de CO₂ na estação chuvosa.

4.7.6. Alterações na Temperatura da Água

Na estação chuvosa, a temperatura da água tem correlação negativa com a vazão. Nesta estação, quanto maior a vazão, menor, também, a temperatura da água.

Na estação seca, a temperatura da água está diretamente correlacionada com a vazão. Durante o dia há aquecimento da água estocada no reservatório, que, ao ser liberada, está com temperatura maior que a temperatura no trecho natural. Portanto,

com o aumento da vazão, haverá, também, um aumento da temperatura. O mesmo raciocínio se aplica no caso de diminuição da temperatura do ar nos meses de inverno.

Como em A3, os sensores foram instalados muito próximos da saída da água turbinada da PCH_{Rond}, houve um grande número de outliers, pois os sensores ficaram mais expostos ao turbilhonamento. Essa mesma situação não acontece em A2, onde os sensores estavam localizados a alguns metros da saída da água turbinada, que media o volume total da água (turbinada + vertida) em um local menos turbulento.

Na estação seca houve um aumento da temperatura mediana do ponto A1 para o A2 de 0,50 °C e do ponto A1 para A3 esse aumento de temperatura é de 0,59 °C. Há um aumento cumulativo do gradiente de temperatura de A1 para A3. Esse aumento de temperatura no curso natural de um rio é esperado, mas não em trecho longitudinal de 6.7 Km, pois, em medições com sonda multiparamétricas, foi verificado que não há variação da temperatura entre o ponto A1 e o começo do lago de acumulação. No trecho a montante da PCH_{JG}, onde não há influência das obras da PCH, não há aumento da temperatura da água do ribeirão.

A elevação da temperatura da água é decorrente do aquecimento da água superficial do pequeno lago de acumulação e do longo canal de adução.

Na estação chuvosa, houve um aumento da temperatura mediana do ponto A1 para A2 de 0.3 °C e do ponto A2 para A3 há uma pequena diminuição da temperatura de 0.02 °C. Mostrando que, assim como na estação seca, na estação chuvosa houve influência do reservatório, aumentando a temperatura da água no trecho do lago de acumulação até o ponto de monitoramento A2. Entre A2 e A3 a temperatura da água praticamente mantém-se a mesma.

4.7.7. Alterações na Condutividade

Devido à baixa concentração de íons dissolvidos naturalmente e pela baixa carga antrópica de químicos, os valores da condutividade são baixos e variam pouco em mediana, independente se for na estação seca ou chuvosa.

Os testes de correlação cruzada destendenciada (Fig. 15) não definem uma clara relação de correlação entre a vazão e a condutividade.

A condutividade em A1 na estação de seca está moderadamente correlacionado com o Nitrato e turbidez e apresenta correlação forte com a temperatura e Nitrato em

A2 e A3 (Fig. 19. 22 e 25). Houve ainda correlação moderada da Condutividade com a turbidez em A2.

Na estação chuvosa, a condutividade apresenta em A3 correlação moderada negativa com Nitrato e DQO e, nos demais pontos de medição, apenas correlações fracas ou muito fracas.

As análises mostram que na estação seca a condutividade teve correlação forte com a temperatura em A2 e A3, além das correlações fortes esperadas com Nitrato e turbidez. Tal fato remete novamente ao lago de acumulação como uma possível explicação para o fato, visto que, no trecho natural em A1, a correlação da condutividade com a temperatura é muito fraca, independente da estação.

Há uma grande faixa de medidas no mês de outubro em A1 que não aparecem em A2 e A3. Esse aumento na faixa de valores em A1 foi devido ao início da estação chuvosa e foi amortizado pelo lago de acumulação. No mês de novembro, aconteceu o aumento do valor mediano medido em A1 e novamente não se repetiu em A2 e A3.

4.7.8. Alterações no Nitrato

Devido à pequena concentração de íons dissolvidos naturalmente no ribeirão Ponte de Pedra e pela pequena carga antrópica de químicos, os valores de Nitrato são baixos e variam pouco a mediana.

Na estação chuvosa, houve variação em torno de 10% de A1 para A3. O alagamento de áreas maiores na estação chuvosa alteou pouco a dinâmica do Nitrato nos pontos A2 e A3 a jusante do reservatório, no entanto, houve um aumento significativo dos valores de máxima nesses pontos. Em A1, os picos de máxima foram cerca de 70% maiores. Nos pontos A2 e A3 foram 350% maior. Esses picos estão associados a fortes chuvas e à regulação das PCH's, principalmente com a limpeza de calhas e descarregador de fundo, fato identificado na movimentação de comporta em 03/05/2019 (Fig. 71e) e na forte chuva de 24/12/2018 (Fig.67g).

O Nitrato na estação seca em A2 apresentou valores superiores aos medidos em A1. O fato pode estar associado ao reservatório que libera Nitrato estocado na estação chuvosa durante esses meses.

O aumento do valor de Nitrato em A1 no mês de novembro está associado ao aumento da Condutividade neste ponto no mesmo período.

4.7.9. Alterações no DQO

O aumento da concentração de DQO num corpo hídrico deve-se principalmente a despejos de origem industrial. No caso do ribeirão Ponte de Pedra, devido à baixa concentração de íons dissolvidos naturalmente e pela baixa carga antrópica os valores de DQO, que são baixos e variam pouco a mediana.

Um maior valor de DQO na estação chuvosa nos leva a acreditar que se trata de material carregado pela chuva para o leito do ribeirão.

O DQO apresenta como sendo o parâmetro que menos sofre influência das PCHs. O comportamento natural do DQO em A1 é de certa forma repetido em A2 e A3, onde apresentou uma boa correlação com a vazão (Fig.17) e pouca correlação com os demais parâmetros.

Na mudança da estação seca para chuvosa, no mês de novembro, houve um aumento dos valores de DQO nos três pontos de monitoramento, sendo maior em A2 provavelmente devido ao lago de acumulação. No mês de novembro também há alteração na faixa de valores medidos e número de outliers.

Na estação chuvosa houve picos em A2 que chegam a ser 55% maiores que os picos em A1 e A3. Na estação seca, esses picos foram 144% maiores em A2 e 139% maiores em A3. Apesar de não terem sido identificados, podem estar relacionados com a limpeza de grade e descarregador de fundo.

4.7.10. Alterações na Turbidez

Em ambas as estações de seca e chuva houve um decréscimo dos valores lidos à noite, sendo maior na estação seca. Uma possível explicação para o aumento da turbidez na estação seca é o maior alcance do equipamento devido à maior transparência da água e ao aumento da presença de algas pela maior penetração da luz solar. Durante o dia o aumento do campo de visão do equipamento teve como consequência o aumento dos valores medidos durante o dia. Em medições realizadas no período de dezembro de 2006 a janeiro de 2013, no ponto a montante do reservatório da PCH_{JG}, Oliveira (2016) cita:

A cor verdadeira foi relativamente moderada. ...este parâmetro tem relação com as moderadas concentrações de ferro dissolvidos medidas. O aumento do turbidez se deve ao aumento de particulados orgânicos / inorgânicos no corpo hídrico. (OLIVEIRA, 2016)

Os testes de correlação cruzada destendenciada (Fig. 18) mostram em A2 uma fraca correlação entre a vazão e a turbidez.

Na estação seca, em A1, a turbidez apresentou correlação fraca com a condutividade (0,35) e com Nitrato (0,24). Em A2, essas correlações aumentam com a condutividade (0,56) e com Nitrato (0,42). Em A3, além da correlação com a condutividade (0,30) e com Nitrato (0,62), houve correlação com o DQO (0,53). A partir do reservatório, a turbidez apresentou correlação maior e com mais parâmetros.

Apesar da falta de leitura nos meses de dezembro a março em A1, foi verificado que após ter atingido o menor valor no mês de outubro, a turbidez começa a aumentar em novembro. No mês de abril, quando volta a ter medidas, a mediana está cerca de 15% maior que novembro.

Ainda que a Turbidez não tenha apresentado correlação forte com nenhuma das variáveis analisadas, não é esperado um comportamento diferente dos demais parâmetros nem dos valores médios e medianos da Turbidez nesses meses que ficaram sem medição.

Acompanhando a turbidez mês a mês (Fig.61), apesar da falta de dados em alguns meses, foi observado que em A1 a turbidez tende a ser maior nos meses de chuva. Em A2 os meses de outubro e novembro apresentaram os menores valores de Turbidez. A pequena vazão e menor velocidade da água no final da estação seca fizeram com que houvesse uma retenção dos particulados e nutrientes no reservatório e no leito natural.

Em 03/05/2019, em movimentação da comporta na estação seca, o que se observou em alta frequência é que a turbidez não foi alterada em A2 e A3. Na Figura 09, vemos que apesar de estar no começo da estação seca, o volume de vazão na PCH_{JG} ainda é alto. No mesmo período a precipitação foi baixa e apresentou correlação fraca com a turbidez. Praticamente não houve variação da turbidez com a abertura da comporta neste dia.

Em 26/07/2019, havia picos de turbidez em A1 e eles foram alisados em A2 e A3. As partículas perderam velocidade na entrada do lago de acumulação e acabaram sendo depositadas nele, não refletindo em alterações da turbidez nos pontos A2 e A3.

CAPÍTULO 5

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.

As PCH_{JG} e PCH_{Rond} em resposta às mudanças sub-diárias de geração de energia elétrica solicitadas pelo mercado de eletricidade sofrem variações rápidas de vazão de descarga da turbina. Uma flutuação rápida dos níveis de água a jusante dessas usinas aconteceram devido a essas variações na geração. Esse regime de operação provoca hidrpicos que podem causar impactos adversos no ecossistema fluvial do ribeirão Ponte de Pedra.

Os períodos de armazenamento no reservatório a montante da PCH_{JG} resultaram na diminuição do volume do fluxo de base do ribeirão. A imprevisibilidade e a intensidade das variações de fluxo decorrentes da operação das PCHs foram mais permanentes e frequentes do que aquelas causadas por eventos de fluxo natural, como uma precipitação intensa. As alterações provocadas por esse controle podem ser tão ou mais severas do que uma forte precipitação ou, ainda, intensificadas por esses eventos.

Os resultados do monitoramento nas PCH_{JG} e PCH_{Rond} de 7 parâmetros (PH, OD, Temperatura, Condutividade, Nitrato (NO₃-), DQO e Turbidez), através da quantificação e qualificação de dados de alta frequência da qualidade da água do ribeirão Ponte de Pedra, mostraram que a presença do reservatório no ribeirão Ponte de Pedra, somada aos desvios laterais dos canais de adução das PCHs influenciam nas características funcionais do rio a jusante, modificando o volume no trecho desviado e os aspectos temporais dos fluxos e das características físico-químicas das variáveis formadoras da qualidade da água.

A represa e o extenso canal de adução (6,5 Km) fez com que as alterações no ponto A2 (a jusante da PCH_{JG}) fossem mais pronunciadas. A maior parte dos efeitos tiveram uma característica de um processo infra aditivo (em que o efeito cumulativo é menor do que a soma dos efeitos individuais).

Como a PCH_{Rond} não tem lago de acumulação e o seu canal de adução é de 1,4 Km, esta PCH alterou menos as variáveis de qualidade da água no ponto medido e não houve retenção de sedimentos nem acúmulo de água, pois sua vazão depende exclusivamente do controle realizado pela operação da PCH_{JG}. Algumas das variáveis

apresentaram uma tendência de recuperação dos valores encontrados em A1 a montante das PCHs.

Devido ao baixo fluxo de água, a vazão sanitária da PCH_{Rond}, que é a metade da PCH_{JG}, também deve ter levado à acumulação de detritos e matéria orgânica na estação seca no leito desviado do ribeirão entre as duas PCHs. No entanto, essas possíveis alterações não foram analisadas devido a dificuldades de instalação da estação de monitoramento em ponto mais a jusante do local que foi instalado.

As flutuações sazonais da temperatura da água do ribeirão Ponte de Pedra não são alteradas com a presença das PCHS.

As flutuações diárias da temperatura da água do ribeirão Ponte de Pedra estão fortemente correlacionadas com a temperatura do ar, mas também com a vazão regulada pelas PCHS.

Na estação seca houve efeito acumulativo e crescente da temperatura da água do ponto A1 para A3. A maior parte dessa variação ocorreu no curto trecho do reservatório ao pontos de medição A2. Os demais parâmetros não acumulam o efeito, mas se diferenciam muito entre A2 e A3.

No ponto de monitoramento a montante da PCH_{JG} que apresenta condições naturais, as variáveis pH, OD e turbidez apresentaram valores maiores na estação seca do que na estação chuvosa, enquanto a temperatura, condutividade e DQO foram menores e o Nitrato não variou.

O pH e OD têm as variações sazonais diminuídas em A2 em razão da presença da infraestrutura da PCH_{JG} e da regulação de fluxo.

Apesar da baixa carga de Nitrato e DQO, houve retenção de nitrogênio e carbono no reservatório. Essas variações foram verificadas no teste estatístico de ANOVA, quando trabalhadas as medianas mês a mês e na análise dos dados de evento de chuva forte, quando houve um aumento da faixa de valores medidos dessas variáveis nos pontos de monitoramento a jusante do reservatório.

Não foi verificada alteração significativa entre os dados analisados durante o dia e a noite em nenhum dos parâmetro analisados.

Houve diferença significativa das medianas das variáveis de qualidade da água nas estações seca e chuvosa, provavelmente relacionada à presença do reservatório a montante da PCH_{JG}.

Devido às características do ribeirão Ponte de Pedra, as alterações nos pontos monitorados a jusante do reservatório foram mais pronunciadas na estação seca. Com a diminuição natural do fluxo de base do ribeirão, foi necessário um maior tempo de retenção para acumulação de água no reservatório.

Os efeitos de pulsos de descarga de fundo e limpeza de grades foram identificados nas leituras de alta frequência, mas, como trata-se de um rio de baixa carga de concentração de nutrientes e íons, alteraram pouco ou simplesmente não alteraram a média diária das variáveis medidas. As alterações não são percebidas pelo método tradicional de controle de qualidade da água que faz leituras mensais ou com maior janela temporal. As descargas de fundo e limpeza de grades provocaram alterações nas variáveis monitoradas que equivalem a chuvas fracas a moderadas na bacia hidrológica do ribeirão Ponte de Pedra.

De acordo com o Conceito das Descontinuidades Seriais, as alterações que ocorreram no ribeirão Ponte de Pedra tendem a ser amenizadas a cada afluente lateral e se tornar menor ou inexistente na chegada do rio Vermelho. No entanto, não foram obtidos dados que comprovem tal teoria.

Quanto às alterações hidrológicas, podemos dizer que elas existem mas só podem ser observadas em escalas temporais menores (horária ou diária). Em escalas maiores, não podem ser verificadas alterações hidrológicas, como a alteração de fluxo de base e a hidrofásagem que ocorrem em escala sub-horária.

Todas as alterações detectadas em baixa frequência de amostragem podem ser identificadas em alta frequência, com detalhes que não podem ser revelados em baixa frequência.

O monitoramento com dados de alta frequência mostrou-se importante para entender a dinâmica de eventos de intempérie e como eles influenciaram as variáveis monitoradas. O monitoramento também foi eficiente para identificar e quantificar as alterações das variáveis formadoras da qualidade da água devido à variabilidade de fluxo de curto prazo (hidrópicos).

O presente estudo pode ser associado a outros estudos, como do uso e da ocupação da terra e aumentar a precisão das estimativas de carga e retenção de nutrientes, facilitando a produção de modelos hidrológicos e hidroquímicos que ajudem a entender melhor o comportamento de um rio antropizado.

Apesar de não terem sido objeto deste trabalho, os fluxos pulsados também podem ter impactos indiretos sobre os peixes através de efeitos sobre o suprimento de alimentos como macro invertebrados bentônicos.

São necessárias mais pesquisas para estabelecer limites para as operações dos empreendimentos, pois há falta de informações principalmente sobre os efeitos ecológicos de curto prazo como alterações térmicas (Bruno e Siviglia, 2012; Zolezzi et al., 2011) entre outras.

A discussão ecológica sobre a instalação de UHEs ou PCHs é complexa e deve levar em consideração não apenas as alterações que ocorrem nos rios formadores da Bacia do Alto Paraguai, mas também as que acontecem na planície de inundação do Pantanal, destino final de todos os cursos d'água da Região Hidrográfica do Paraguai.

Entender a influência da instalação de empreendimentos energéticos, especificamente no entorno da planície pantaneira, e a sua influência nas variáveis hidrológicas e formadores da qualidade da água, é primordial para propor à sociedade civil e aos tomadores de decisão medidas que evitem ou pelo menos atenuem essas possíveis alterações.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALGERA. D. A. et al. What are the relative risks of mortality and injury for fish during downstream passage at hydroelectric dams in temperate regions? A systematic review. **Environmental Evidence**. v. 9. n. 1. p. 3. 2020.

ALVARES. C. A.; et al Climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**. v. v. 22. 2014.

ANA. **PAE_Pantanal_PT**. [s.l: s.n.].

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA/GEF/PNUMA/OEA). Programa de Ações Estratégicas para o Gerenciamento Integrado do Pantanal e Bacia do Alto Paraguai. Brasília: Projeto GEFPantanal/Alto Paraguai. ANA/GEF/PNUMA/OEA. Síntese Executiva. 2004.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA/GEF/PNUMA/OEA). Programa de Ações Estratégicas para o Gerenciamento Integrado do Pantanal e Bacia do Alto Paraguai. Brasília: Projeto GEFPantanal/Alto Paraguai. ANA/GEF/PNUMA/OEA.. 2005.

ANA. AGENCIA NACIONAL DE AGUAS (Brasil). Panorama da qualidade das águas superficiais no Brasil. Agência Nacional de Águas. Superintendência de Planejamento de Recursos Hídricos. - Brasília: ANA. SPR. 2005. 176P

ANA. AGENCIA NACIONAL DE AGUAS (Brasil). Variáveis e parâmetros de qualidade de água em rios e reservatórios. - 2014.

ANA. AGENCIA NACIONAL DE AGUAS (Brasil). Disponível em:<
<http://pnqa.ana.gov.br/default.aspx>>. Acesso em: 23 jun 2020.

ANEEL. **Banco de Informações sobre Geração (BIG)**. Disponível em:
<<http://www.aneel.gov.br/>>. Acesso em: 19 mar. 2019a.

ANEEL. **PCH aprovadas com Titulares acumulado desde 2015**. Disponível em:
<<http://www.aneel.gov.br/>>. Acesso em: 22 mar. 2019b.

ANEEL. **Relatório de Acompanhamento de Estudos e Projetos de Usinas Hidrelétricas**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/>>. Acesso em: 22 mar. 2019c.

ANEEL. 2021. **Matriz Elétrica Brasileira**. Disponível em: < <https://bit.ly/2IGf4Q0>>.
Acesso em: 23 junho 2021.

- ASSANI, A. A. et al. 2006. Comparison of impacts of dams on the annual maximum flow characteristics in three regulated hydrologic regimes in Québec (Canada) First published: 24 April 2006. <https://doi.org/10.1002/hyp.6150>
- ARRUDA, N. M.B.. 2014 Avaliação de variáveis de qualidade de água dos reservatórios das usinas hidrelétricas de Foz do Areia, Segredo e Caxias, como instrumento de gestão de bacias hidrográficas / Nicole Machuca Brassac de Arruda – 2014. Tese de doutorado - Universidade Federal do Paraná. Setor de Ciências Agrárias. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal.
- ARSHAM, H.. Kuiper's P-value as a measuring tool and decision procedure for the goodness-of-fit test. **Journal of Applied Statistics**. 1988.
- BEJARANO, M. D. et al. Characterizing effects of hydropower plants on sub-daily flow regimes. **Journal of Hydrology**. v. 550. p. 186–200. 2017.
- BELMAR, O. et al. Linking fish-based biological indicators with hydrological dynamics in a Mediterranean river: Relevance for environmental flow regimes. **Ecological Indicators**. v. 95. p. 492–501. 2018.
- BENIN, G. ET AL. Relationships between four measures of genetic distance and breeding behavior in spring wheat. **Genetics and Molecular Research**. v. 11. 2012.
- BERNHARDT, E. S. et al. The metabolic regimes of flowing waters. p. 99–118. 2018.
- BHURTUN, P. et al. Understanding the impact of the changes in weather conditions on surface water quality. **Science of The Total Environment**. v. 652. p. 289–299. 2019.
- BONDAR-KUNZE, E. et al. Antagonistic and synergistic effects on a stream periphyton community under the influence of pulsed flow velocity increase and nutrient enrichment. **Science of The Total Environment**. v. 573. p. 594–602. 2016.
- BOWES, M.J.. SMITH, J.T.. NEAL, C. The value of high-resolution nutrient monitoring: a case study of the River Frome, Dorset, UK. **Journal of Hydrology**. n. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.09.015>. 2009.
- BRANDT, S. Anders. Classification of geomorphological effects downstream of dams. *Catena*. v. 40. n. 4. p. 375-401. 2000;
- BRASIL. Resolução CONAMA nº357, de 17 de março de 2005. Classificação de águas, doces, salobras e salinas do Território Nacional. Publicado no D.O.U
- CAISSIE, D. The thermal regime of rivers: a review. **Freshwater Biology**.. v. 51. p.

1389–1406. 2006.

CHEN. J.; GUPTA. A. K. Parametric statistical change point analysis (Oberwolfach seminars). 2000.

CONOVER. W. J.; IMAN. R. L. Rank transformations as a bridge between parametric and nonparametric statistics. *The American Statistician*. v. 35. n. 3. p. 124-129. 1981.

CARLUER. N.; et al Cumulative impact of reservoirs on the Joint scientific assessment SUMMARY. n. May 2016. p. 146. 2016.

CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. Histórico da legislação hídrica no Brasil (2012). Disponível em: < <http://www.cetesb.sp.gov.br/agua/%C3%81guas-Superficiais/38-Historico-da-Legisla%C3%A7%C3%A3o-H%C3%ADrica-no-Brasil> >. Acesso em: 01 de maio de 2019.

CHAMPMAN. D.; KIMSTACH. V. Selection of water quality variables.. In: WHO; UNESCO; UNEP (Org). *Water Quality Assessments: A Guide to Use of Biota. Sediments and Water in Environmental Monitoring*. Chapman Edition. E& FN Spon. London. 1996. 59-126.

CHEBANA. F.; OUARDA. T.B.M.J. Multivariate non-stationary hydrological frequency analysis. *Journal of Hydrology*. v. 593. p. 125907. 2021..

CHEN. X. et al. Nexus of water, energy and ecosystems in the upper Mekong River: A system analysis of phosphorus transport through cascade reservoirs. **Science of The Total Environment**. v. 671. p. 1179–1191. 2019.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS. Disponível em:<<http://http://cbdb.org.br/>>. Acesso em: 23 jun 2020.

COOPER. M. M.; ZAMPATTI. B. P. History . hydrology and hydraulics : Rethinking the ecological management of large rivers. n. February. p. 1–23. 2018.

COSTA. M. J. et al. Is there evidence for flow variability as an organism-level stressor in fluvial fish? **Journal of Ecohydraulics**. v. 2. n. 1. p. 68–83. 2 jan. 2017.

COSTA. M. J. et al. Do artificial velocity refuges mitigate the physiological and behavioural consequences of hydropeaking on a freshwater Iberian cyprinid? **Ecohydrology**. v. 11. n. 7. p. e1983. 1 out. 2018.

COUTO. T. B. A.; OLDEN. J. D. Global proliferation of small hydropower plants – science and policy. **Frontiers in Ecology and the Environment**. v. 16. n. 2. p. 91–100. 2018.

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

DERÍSIO. J. C. **Introdução ao controle de poluição ambiental**. [s.l.] Oficina de Textos. 2016.

DING. J. et al. Influences of the land use pattern on water quality in low-order streams of the Dongjiang River basin. China: A multi-scale analysis. **Science of the Total Environment**. v. 551–552. n. 19. p. 205–216. 2016.

DUDGEON. D. Prospects for sustaining freshwater biodiversity in the 21st century: linking ecosystem structure and function. **Current Opinion in Environmental Sustainability**. v. 2. n. 5. p. 422–430. 2010.

DUDGEON. D. et al. Freshwater biodiversity: importance . threats . status and conservation challenges. n. 2006. p. 163–182. 2015.

EHLERS. R. S. (2009) A. DE S. T. 5ª EDIÇÃO. 114P. **Análise de Séries Temporais**. [s.l.: s.n.].

ELETROBRÁS. **Diretrizes para estudos e projetos de Pequenas Centrais Hidrelétricas**. Disponível em: <<https://eletrobras.com/pt/Paginas/Manuais-e-Diretrizes-para-Estudos-e-Projetos.aspx>>.

ESTEVES. F. DE A. **Fundamentos de limnologia**. Rio de Janeiro: Interciência. 1998.

FAN. C.; ZHANG. D. On power and sample size of the ANOVA-type rank test. **Communications in Statistics - Simulation and Computation**. v. 46. n. 4. p. 3224–3241. 21 abr. 2017.

FANTIN-CRUZ. I. et al. Changes in river water quality caused by a diversion hydropower dam bordering the Pantanal floodplain. **Hydrobiologia**. v. 768. n. 1. p. 223–238. 2016.

FANTIN DA CRUZ. R. **Impactos de pequenas centrais hidrelétricas com diferentes arranjos na Bacia do Alto São Lourenço**. [s.l.] Universidade Federal de Mato Grosso. 2018.

FEARNSIDE. P. M. Impactos das hidrelétricas na Amazônia e a tomada de decisão. **Novos Cadernos NAEA**. v. 22. n. 3. 2019.

FERREIRA. J. H. I. et al. Assessment of the potential of small hydropower

development in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v. 56. p. 380–387. 2016.

FONSECA. B. M. et al. Nutrient baselines of Cerrado low-order streams: Comparing natural and impacted sites in Central Brazil. **Environmental Monitoring and Assessment**. v. 186. n. 1. p. 19–33. 2014.

FONSECA. G. A. B. DA. **Contribuição Antrópica na Poluição de Reservatórios Hidrelétricos: o Caso da Usina Hidrelétrica de São Simão - GO/MG**. [s.l: s.n.].

GAO. Y.; WANG. B.; LIU. X.; WANG. Y.; ZHANG. J.; JIANG. Y.; WANG. F. Impacts of river impoundment on the riverine water chemistry composition and their response to chemical weathering rate. **Frontiers of Earth Science**. v. v. 7. n. 3. p. 351–360. 2013.

GHOLIZADEH. M. H.; MELESSE. A. M.; REDDI. L. A comprehensive review on water quality parameters estimation using remote sensing techniques. **Sensors (Switzerland)**. v. 16. n. 8. 2016.

GIRARD. P. Efeito cumulativo das barragens no Pantanal. **Instituto Centro Vida**. p. 28 p.. 2002.

GÓRSKI. K. et al. Connectivity and complexity of floodplain habitats govern zooplankton dynamics in a large temperate river system. **Freshwater Biology**. v. 58. n. 7. p. 1458–1470. 2013.

GRAF. William L. Downstream hydrologic and geomorphic effects of large dams on American rivers. *Geomorphology*. v. 79. n. 3-4. p. 336-360. 2006;

GRAFFELMAN. J. A guide to scatterplot and biplot calibration. 2012.

GREIMEL. F. et al. A method to detect and characterize sub-daily flow fluctuations. **Hydrological Processes**. v. 30. n. 13. p. 2063–2078. 2016.

GRILL. G. et al. Mapping the world's free-flowing rivers. **Nature**. v. 569. n. 7755. p. 215–221. 2019.

HAGEMANN. S. et al. Climate change impact on available water resources obtained using multiple global climate and hydrology models. **Earth System Dynamics**. v. 4. n. 1. p. 129–144. 2013.

HARRAR. S. W.; RONCHI. F.; SALMASO. L. A comparison of recent nonparametric methods for testing effects in two-by-two factorial designs. **Journal of Applied Statistics**. v. 46. n. 9. p. 1649–1670. 4 jul. 2019.

HAUER. C. et al. Impact of channel bar form and grain size variability on estimated stranding risk of juvenile brown trout during hydropowering. **Earth Surface Processes and Landforms**. v. 39. n. 12. p. 1622–1641. 30 set. 2014.

HECHT. J. S. et al. Hydropower dams of the Mekong River basin: A review of their hydrological impacts. **Journal of Hydrology**. v. 568. p. 285–300. 2019.

HENNIG. T. et al. Review of Yunnan's hydropower development. Comparing small and large hydropower projects regarding their environmental implications and socio-economic consequences. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v. 27. p. 585–595. 2013.

HONGYU. KUANG; SANDANIELO. VERA LÚCIA MARTINS; DE OLIVEIRA JUNIOR. G. J. Análise de componentes principais: resumo teórico. aplicação e interpretação. **E&S Engineering and Science**. v. V. 5. 2016.

HUMPHRIES. P.; KECKEIS. H.; FINLAYSON. B. The River Wave Concept: Integrating River Ecosystem Models. **BioScience**. v. 64. p. 870–882. 1 out. 2014.

IEA. **International Energy Agency**. Disponível em: <<https://www.iea.org>>. Acesso em: 9 abr. 2019.

Jl. Z.-G. **Hydrodynamics and water quality: modeling rivers, lakes, and estuaries**. New Jersey: John Wiley e Sons. 2008.

JUNK. W. J. et al. Brazilian wetlands : their de fi nition . delineation . and classi fi cation for research . sustainable management . and protection. v. 22. n. August 2013. p. 5–22. 2014.

JUNK. W. J. ET AL. The flood pulse concept in river-floodplain systems. **Canadian special publication of fisheries and aquatic sciences**. v. 10. 1989.

KAISER. H. F. An index of factorial simplicity. *Psychometrika*. v. 39. p. 31-36. 1974.

KELLY-RICHARDS. S. et al. Governing the transition to renewable energy: A review of impacts and policy issues in the small hydropower boom. **Energy Policy**. v. 101. n. March. p. 251–264. 2017.

KELLY. B.; SMOKOROWSKI. K. E.; POWER. M. Impact of river regulation and hydropowering on the growth, condition and field metabolism of Brook Trout (*Salvelinus fontinalis*). **Ecology of Freshwater Fish**. v. 26. n. 4. p. 666–675. 1 out. 2017.

KIBLER. K. M. The Hydraulic size Of A Dam: A metric Indicating potential

- hydrologic impact For storage And diversion. 2017.
- KIBLER. K. M.; TULLOS. D. D. Cumulative biophysical impact of small and large hydropower development in Nu River. China. **Water Resources Research**. v. 49. n. 6. p. 3104–3118. 2013.
- KILLICK. R.; FEARNHEAD. P.; ECKLEY. I. A. Optimal detection of changepoints with a linear computational cost. *Journal of the American Statistical Association*. v. 107. n. 500. p. 1590-1598. 2012.
- KINGSFORD. R. T. et al. Aerial surveys of waterbirds in Australia. **Scientific Data**. v. 7. n. 1. p. 1–6. 2020.
- KINGSFORD. R. T.; JENKINS. K. M.; PORTER. J. L. IMPOSED HYDROLOGICAL STABILITY ON LAKES IN ARID AUSTRALIA AND EFFECTS ON WATERBIRDS. **Ecology**. v. 85. n. 9. p. 2478–2492. 2004.
- KONDOLF. G. M. PROFILE: hungry water: effects of dams and gravel mining on river channels. *Environmental management*. v. 21. n. 4. p. 533-551. 1997
- KRZYSZCZAK. J. et al. Multifractal characterization and comparison of meteorological time series from two climatic zones. p. 1811–1824. 2019.
- LANGE. K. et al. Basin-scale effects of small hydropower on biodiversity dynamics. **Frontiers in Ecology and the Environment**. v. 16. n. 7. p. 397–404. 2018.
- LEHNER. B. et al. High-resolution mapping of the world ' s reservoirs and dams for sustainable river-flow management. v. 2050. n. Bruinsma 2009. 2011.
- LEIGH. C. et al. Predicting Sediment and Nutrient Concentrations in Rivers Using High Frequency Water Quality Surrogates. **arXiv preprint arXiv**. 2019.
- LEMMER. H. H. & S. D. J. A distribution-free analysis of variance for the two-way classification. **South African Statistical Journal**. v. 1. 1967.
- LIGON. F. K.; DIETRICH. W. E.; TRUSH. W. J. Downstream ecological effects of dams. *BioScience*. v. 45. n. 3. p. 183-192. 1995;
- LOESCH. C.; HOELTGEBAUM. M. **Métodos estatísticos multivariados**. [s.l.] Saraiva Educação SA. 2017.
- LUEPSEN. H. The aligned rank transform and discrete variables: A warning. **Communications in Statistics - Simulation and Computation**. v. 46. n. 9. p. 6923–6936. 21 out. 2017.
- LUEPSEN. H. Comparison of nonparametric analysis of variance methods: A vote for

- van der Waerden. **Communications in Statistics - Simulation and Computation**. v. 47. n. 9. p. 2547–2576. 21 out. 2018.
- LYTLE. D. A.; POFF. N. L. Adaptation to natural flow regimes. v. 19. n. 2. 2004.
- MAAVARA. T. et al. Global phosphorus retention by river damming. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**. v. 112. n. 51. p. 15603–15608. 2015.
- MAAVARA. T. et al. Global perturbation of organic carbon cycling by river damming. **Nature Communications**. v. 8. n. 1. p. 15347. 2017.
- MACHADO FILHO. A.; DA SILVA. M. F.; ZEBENDE. G. F. Autocorrelation and cross-correlation in time series of homicide and attempted homicide. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**. 2014.
- MATOS. D. A. S.. RODRIGUES. E. C. Análise fatorial - Brasília: Enap. 2019.
- MCCULLY. Patrick et al. Silenced rivers: The ecology and politics of large dams. Zed Books. 1996;
- MACINTOSH. K. A. et al. Low flow water quality in rivers; septic tank systems and high-resolution phosphorus signals. **Science of the Total Environment**. v. 412–413. p. 58–65. 2011.
- MALLEN-COOPER. M.; ZAMPATTI. B. P. History. hydrology and hydraulics: Rethinking the ecological management of large rivers. **Ecohydrology**. v. 11. n. 5. 2018.
- MANTEL. S. K.; HUGHES. D. A.; MULLER. N. W. J. Ecological impacts of small dams on South African rivers part 1: Drivers of change - water quantity and quality. **Water SA**. v. 36. n. 3. p. 351–360. 2010.
- MARINHO. E. BS; BASSREI. A.; ANDRADE. R. F. DCCA e Análise Espectral: Aplicação em Dados de Poços da Bacia de Jequitinhonha. **International Congress of the Brazilian Geophysical Society & EXPOGEF. Rio de Janeiro. Brazil**. 2017.
- MARVIER. M.; KAREIVA. P.; NEUBERT. M. G. Habitat Destruction. Fragmentation. and Disturbance Promote Invasion by Habitat Generalists in a Multispecies Metapopulation. **Risk Analysis**. v. 24. n. 4. p. 869–878. 1 ago. 2004.
- MEILE T. BOILLAT JL. S. A. **Hydropeaking indicators for characterization of the Upper Rhone River in Switzerland** Aquatic Sciences. . 2011.
- MERTEN. G. H.; MINELLA. J. P. Qualidade da água em bacias hidrográficas rurais:

um desafio atual para a sobrevivência futura. **Agroecologia e desenvolvimento rural sustentável**. v. 3. 2002.

MMA - MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Caderno setorial de recursos hídricos: geração de energia hidrelétrica. Brasília: MMA. 2006. 112p

MMA - MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Caderno da Região Hidrográfica do Paraguai / Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Recursos Hídricos. – Brasília: MMA. 2006. 140 p. : il. color. ; 27cm

MME/ANA. **Plano de Recursos Hídricos da Região Hidrográfica do Rio Paraguai - Relatório Final 2018**. [s.l: s.n.]. v. 53

MME/EPE. **Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisas Energéticas**. Disponível em: <<http://epe.gov.br>>. Acesso em: 22 mar. 2019.

MOREIRA. M. et al. Ecologically-based criteria for hydropeaking mitigation: A review. **Science of The Total Environment**. v. 657. p. 1508–1522. 2019.

NILSSON. C. et al. Fragmentation and flow regulation of the world's large river systems. *Science*. v. 308. n. 5720. p. 405-408. 2005.

OLDEN J.D., NAIMAN. R.J. 2009 Incorporating thermal regimes into environmental flows assessments: modifying dam operations to restore freshwater ecosystem integrity. 15 *Freshwater Biology* Vol 55. December 2009 <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2009.02179.x>

OLIVEIRA. V. A. **Diagnóstico dos usos da água e do solo na bacia do Ribeirão Ponte de Pedra e seus efeitos sobre a qualidade da água. (Dissertação de mestrado: Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos)**. Universidade Federal de Mato Grosso. [s.l: s.n.].

OLIVEIRA. U. et al. Biodiversity conservation gaps in the Brazilian protected areas. **Scientific Reports**. v. 7. n. 1. p. 9141. 2017.

OTTMAR EDENHOFER. RAMÓN PICHES-MADRUGA. YOUNG SOKONA. **IPCC - Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. 2011. Relatórios. Disponível em <https://www.ipcc.ch/>: Último acesso em: 07 de setembro de 2021.

PADOVESI-FONSECA. C.. & MARTINS-SILVA. M. J. Biologic integrity analysis as protection tool of Cerrado's pristine areas. **Sustainable water management in tropics and subtropics and case studies in Brazil**. v. 3. p. pp 685–721. 2012.

- PETTS. G. E. A perspective on the abiotic processes sustaining the ecological integrity of running waters. **Hydrobiologia**. v. 422. n. 0. p. 15–27. 2000.
- PODOBNIK. B.; STANLEY. H. E. Detrended cross-correlation analysis: a new method for analyzing two nonstationary time series. **Physical review letters**. v. v. 100. 2008.
- POFF. N. LeRoy et al. Homogenization of regional river dynamics by dams and global biodiversity implications. **Proceedings of the National Academy of Sciences**. v. 104. n. 14. p. 5732-5737. 2007;
- POFF. N. L.; ZIMMERMAN. J. K. H. Ecological responses to altered flow regimes: a literature review to inform the science and management of environmental flows. **Freshwater Biology**. v. 55. n. 1. p. 194–205. 1 jan. 2010.
- PORTER. J. H. et al. New Eyes on the World: Advanced Sensors for Ecology. **BioScience**. v. 59. n. 5. p. 385–397. 1 maio 2009.
- PREMALATHA. M. et al. A critical view on the eco-friendliness of small hydroelectric installations. **Science of The Total Environment**. v. 481. p. 638–643. 2014.
- PUFFER. B.. HAMNES. B.. KOCH. UGEDAL. F.. VEGAR A. Density-independent use of shallow riverine areas in juvenile Atlantic salmon. **Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences**. 2018.
- PUNYS. P. et al. Riverine hydrokinetic resource assessment. A case study of a lowland river in Lithuania. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v. 50. p. 643–652. 2015.
- RICHTER. B. D.. MATHEWS. R.. HARRISON. D. L.; WIGINGTON. R. Ecologically sustainable water management: Managing river flows for ecological integrity. **Ecological Applications**. p. 206– 224.. 2003.
- RODE. M. et al. Sensors in the Stream: The High-Frequency Wave of the Present. **Environmental Science and Technology**. v. 50. n. 19. p. 10297–10307. 2016.
- ROLLS. R. J.; BOND. N. R. Environmental and Ecological Effects of Flow Alteration in Surface Water Ecosystems. **Water for the Environment: From Policy and Science to Implementation and Management**. n. November. p. 65–82. 2017.
- SANTOS. C.; SOUZA. C. Efeitos da cascata de reservatórios sobre a variabilidade natural de vazões: o caso do rio Paraná em Porto Primavera. **Revista Brasileira de**

Recursos Hídricos. v. 20. n. 3. p. 698–707. 2015.

SEPLAN-MT– Secretaria de Estado de Planejamento e Coordenação Geral. **Altas de Mato Grosso**. Cuiabá: Entrelinhas. 2011.100 p.

SCHÜLTING. L.; FELD. CHRISTIAN K.; GRAF. W. Effects of hydro-and thermopeaking on benthic macroinvertebrate drift. **Science of the Total Environment**. 2016.

SCOTT WINTON. R.; CALAMITA. E.; WEHRLI. B. Reviews and syntheses: Dams, water quality and tropical reservoir stratification. **Biogeosciences**. v. 16. n. 8. p. 1657–1671. 2019.

SILVA. A. C. C. DA et al. Cumulative changes in water quality caused by six cascading hydroelectric dams on the Jauru River, tributary of the Pantanal floodplain. **RBRH**. v. 24. 2019.

SILVA. D.; FILHO. J.; SALES. J.; LOURENÇO. R. Use of morphometric indicators as tools for assessment watershed. *Revista Brasileira de Geografia Física*. 9.. 2016.

SILVA. J. S. O. et al. Effects of land cover on chemical characteristics of streams in the Cerrado region of Brazil. **Biogeochemistry**. v. 105. n. 1. p. 75–88. 2011.

SOUZA. A. V. V.; LOVERDE-OLIVEIRA. S. M. Análise da qualidade da água do rio Vermelho em Mato Grosso: no período de cheia no ano de 2014. **Revista Biodiversidade**. p. v. 13. 115-126. 2014.

STELKENS. R. B. et al. Genetic and phenotypic population divergence on a microgeographic scale in brown trout. **Molecular Ecology**. v. 21. n. 12. p. 2896–2915. 2012.

STOCKER. T. F. et al. Climate Change 2013 The Physical Science Basis Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Edited by. 2013.

SYSTEMS. F. AND FLOW REGULATION OF THE WORLD’S LARGE RIVER. Fragmentation and flow regulation of the world’s large river systems. **Science**. 2005.

TONKIN. J. D. et al. networks in riparian ecosystems. **Nature Ecology & Evolution**. v. 2. n. January. 2018.

TUNDISI. J. G.; TUNDISI. T. M.. T. M.. T. M. **Limnologia**. n. 4 ed. são paulo: [s.n.]. v. 2

VALENZUELA-AGUAYO. F. et al. Human-induced habitat fragmentation effects on

connectivity, diversity, and population persistence of an endemic fish, *Percilia irwini*, in the Biobío River basin (Chile). **Evolutionary Applications**. v. 13. n. 4. p. 794–807. 2020.

VANNOTE, R. L.; et al. The river continuum concept. **Canadian journal of fisheries and aquatic sciences**. v. 37. p. 130--137. 1980.

VANZO, D.; ZOLEZZI, G.; SIVIGLIA, A. Eco-hydraulic modelling of the interactions between hydropeaking and river morphology. **Ecohydrology**. v. 9. n. 3. p. 421–437. 1 abr. 2016.

VASSOLER, R. T.; ZEBENDE, G. F. DCCA cross-correlation coefficient apply in time series of air temperature and air relative humidity. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**. v. v. 391. n.. p. 2438–2443. 2012.

WADE, A. J. et al. Hydrochemical processes in lowland rivers: Insights from in situ, high-resolution monitoring. **Hydrology and Earth System Sciences**. v. 16. n. 11. p. 4323–4342. 2012.

WALKER, K. F.; THOMS, M. C. Environmental effects of flow regulation on the lower River Murray, Australia. **Regulated Rivers: Research & Management**. v. 8. n. 1-2. p. 103-119. 1993.

WANG, F. et al. Effects of dams on riverine biogeochemical cycling and ecology. **Inland Waters**. v. 8. n. 2. p. 130–140. 2018.

WANG, G.-J. ET AL. Random matrix theory analysis of cross-correlations in the US stock market: Evidence from Pearson's correlation coefficient and detrended cross-correlation coefficient. **Physica A: statistical mechanics and its applications**. 2013.

WANG, Q.; LI, S.; LI, R. Forecasting energy demand in China and India: Using single-linear, hybrid-linear, and non-linear time series forecast techniques. **Energy**. v. 161. p. 821–831. 2018.

WANTZEN, K. M. Cerrado streams - Characteristics of a threatened freshwater ecosystem type on the Tertiary Shields of Central South America. **Amazoniana**. v. 17. n. 3–4. p. 481–502. 2002.

WARD, J. V.; STANFORD, J. The serial discontinuity concept: extending the model to floodplain rivers. **Regulated Rivers: Research & Management**. v. 10. p. 159–168. 1995.

WARD, J. V.; STANFORD, J. Ecological connectivity in alluvial river ecosystems and

its disruption by flow regulation. **Regulated rivers: research e management**. v. 11. p. 111–119. 1995.

WARD. J. V. The serial discontinuity concept of lotic ecosystems. *Dynamics of lotic ecosystems*. 1983.

WCD. **Dams and development and framework for decision making**. 2000
Disponível em: <https://www.internationalrivers.org/sites/default/files/attached-files/world_commission_on_dams_final_report.pdf>

WIEJACZKA. Ł. et al. Reservoir's Impact on the Water Chemistry of the Teesta River Mountain Course (Darjeeling Himalaya). **Ecological Chemistry and Engineering S**. v. 25. n. 1. p. 73–88. 2018.

WINEMILLER. K. O. et al. Balancing hydropower and biodiversity in the Amazon. Congo. and Mekong. **Science**. v. 351. n. 6269. p. 128 LP – 129. 8 jan. 2016.

WU. H. et al. Effects of dam construction on biodiversity: A review. **Journal of Cleaner Production**. v. 221. p. 480–489. 2019.

YANG. G.; MOYER. D. L. Estimation of nonlinear water-quality trends in high-frequency monitoring data. **Science of The Total Environment**. v. 715. p. 136686. 2020.

YUAN. N. ET AL. Detrended partial-cross-correlation analysis: a new method for analyzing correlations in complex system. **Scientific reports**. 2015.

ZARFL. C.; LUMSDON. A. E.; TOCKNER. K. A Global Boom in Hydropower dam Construction A global boom in hydropower dam construction. n. February 2015. 2014.

ZEBENDE. G. F. DCCA cross-correlation coefficient: quantifying level of cross correlation. **Physica A. Amsterdam**. 2011.

ZEILHOFER. P.; DE MOURA. R. M. Hydrological changes in the northern Pantanal caused by the Manso dam: Impact analysis and suggestions for mitigation. **Ecological Engineering**. v. 35. n. 1. p. 105–117. 2009.