

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALFENAS

FLAVIO HENRIQUE DE SOUZA MOREIRA

**INTERAÇÕES ENTRE ESCOAMENTO SUPERFICIAL,
HIDROSEDIMENTOS E RADIONUCLÍDEOS (^{210}Pb , ^{226}Ra , ^{228}Ra , Th e U)
NO ALTO RIBEIRÃO DAS ANTAS, POÇOS DE CALDAS-MG.**

POÇOS DE CALDAS/MG
2017

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALFENAS

FLAVIO HENRIQUE DE SOUZA MOREIRA

**INTERAÇÕES ENTRE ESCOAMENTO SUPERFICIAL,
HIDROSEDIMENTOS E RADIONUCLÍDEOS (^{210}Pb , ^{226}Ra , ^{228}Ra , Th e U)
NO ALTO RIBEIRÃO DAS ANTAS, POÇOS DE CALDAS-MG.**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre no Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Alfenas.
Área de concentração: Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos
Orientador: Dr. Antônio Marciano da Silva

M838i Moreira, Flavio Henrique de Souza.
Interações entre escoamento superficial, hidrossedimentos e radionuclídeos (^{210}Pb , ^{226}Ra , ^{228}Ra , Th e U) no Alto Ribeirão das Antas, Poços de Caldas-MG / Flavio Henrique de Souza Moreira. – Poços de Caldas, 2017.

136 f. –

Orientador: Antônio Marciano da Silva.

Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, MG, 2017.
Bibliografia.

1. Engenharia Ambiental. 2. Escoamento. 3. Sedimentos (Geologia). 4. Substâncias radioativas – Análise. I. Silva, Antônio Marciano da. II. Título.

CDD: 628

FLAVIO HENRIQUE DE SOUZA MOREIRA

**INTERAÇÕES ENTRE ESCOAMENTO SUPERFICIAL,
HIDROSEDIMENTOS E RADIONUCLÍDEOS (^{210}Pb , ^{226}Ra , ^{228}Ra , Th e U)
NO ALTO RIBEIRÃO DAS ANTAS, POÇOS DE CALDAS-MG.**

A Banca examinadora abaixo-assinada aprova a Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre no Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Alfenas. Área de concentração: Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos.

Aprovada em: 10/08/2017



Prof. Dr. Antônio Marciiano da Silva, D.Sc.

Instituição: Universidade Federal de Alfenas



Dr. Alexandre Pereira de Oliveira, D.Sc.

Instituição: Comissão Nacional de Energia Nuclear



Prof. Dr. Paulo Henrique Brctanha Junker Menezes, D.Sc.

Instituição: Universidade Federal de Alfenas

AGRADECIMENTOS

A Deus pela constante presença em minha vida.

À toda a minha família, especialmente as minhas avós Paulina e Maria Aparecida (*in memoriam*), aos meus pais Aroldo e Mariza, aos meus irmãos Everton, Bruna, Aroldo e Manuela, pelo apoio, suporte, paciência, conselhos, carinho e dedicação incondicional.

À minha noiva, Olímpia, pelo amor, compreensão, carinho e por sua capacidade de transformar meus grandes problemas em menores.

Aos queridos orientadores Prof. Dr. Antônio Marciano da Silva e Msc. Heber Luiz Caponi Alberti, pela dedicação, incentivos, suporte, confiança e amizade.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia Ambiental (PPGCEA-UNIFAL), pelo auxílio científico e técnico.

Ao Laboratório de Poços de Caldas (LAPOC), unidade da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), pelo apoio e infraestrutura oferecidos ao longo de todo a pesquisa.

À Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) por meio da Secretaria de Formação Especializada (SEFESP), pelo auxílio financeiro.

Ao Departamento Municipal de Energia de Poços de Caldas-DME, pelo apoio instrumental e auxílio financeiro.

À Fazenda Moinhos, por permitir instalação da estação fluviométrica dentro da propriedade, bem como pela manutenção e limpeza do local.

Aos mentores e colegas de pesquisa, em especial a “turma do cafezinho”, do Laboratório de Poços de Caldas (LAPOC).

A todos os servidores, bolsistas e terceirizados do LAPOC, pela ajuda e auxílio sempre que solicitados.

Aos colegas do programa de Pós-graduação pelo companheirismo e amizade.

Aos meus grandes amigos que sempre estiveram ao meu lado me apoiando.

RESUMO

O conhecimento sobre a dinâmica hidrológica e sedimentológica de uma bacia hidrográfica é fundamental para gestão adequada dos recursos hídricos, e pode auxiliar na identificação de contaminantes na água, na estimativa de erosão hídrica, na estimativa do assoreamento de reservatórios e até na redução dos gastos com o tratamento da água. A pesquisa realizada na Bacia Hidrográfica do Alto Ribeirão das Antas, avaliou em todas sazonaisidades as interações entre o escoamento superficial e o transporte de hidrossedimentos em suspensão e de fundo, através de monitoramento direto em dois pontos na calha do Ribeirão das Antas. Simultaneamente, avaliou-se a potencialidade do monitoramento indireto da concentração de sólidos em suspensão, utilizando sensor óptico de turbidez. Os resultados hidrológicos apontam uma elevada precipitação na região, porém, com distribuição bem equilibrada entre os meses úmidos, concorrendo para elevada capacidade da bacia em transformar precipitação em escoamento superficial. As taxas de transporte de sedimentos posicionam a região da pesquisa como de baixa produção de sedimentos. O regime sedimentológico mostrou-se em sintonia com o regime de escoamento superficial, refletido pela sazonalidade das massas transportadas. A estimativa do transporte de sedimentos em suspensão via sensor óptico de turbidez, apresentou resultados promissores. A maioria dos resultados dos radionuclídeos ^{210}Pb , ^{226}Ra , ^{228}Ra , Th e U na água e no hidrossedimento suspenso foi abaixo do limite de detecção da metodologia, já no hidrossedimento de leito houve quantificação de radionuclídeos. Os resultados radiométricos obtidos sinalizam que não há carreamento de radionuclídeos da Represa de Águas Claras na INB Caldas, para o Ribeirão das Antas. Considera-se que a pequena quantidade de elementos radioativos determinada na pesquisa, como de origem natural, pois o Planalto de Poços de Caldas apresenta constituição geológica dotada de anomalias associadas a radionuclídeos.

Palavras-chave: Regime de Escoamento. Taxa de Transporte de Hidrossedimento. Monitoramento indireto. Análises de Radionuclídeos.

ABSTRACT

Knowledge about hydrological and sedimentological dynamics of a river basin is fundamental to the adequate management of water resources, and it can support the identification of contaminants in the water, the estimation of water erosion, the estimation of reservoir siltation, and even the reduction of water treatment costs. The study carried out in Alto Ribeirão das Antas River Basin assessed, throughout seasons, all interactions between the surface runoff and the transport of suspended and underwater hydro-sediments, through direct monitoring of two sites at the Ribeirão das Antas channel. Concurrently, the potential of the indirect monitoring of suspended solids concentration was evaluated using an optical turbidity sensor. The hydrological results point to a high precipitation in the region, however with a well balanced distribution among the humid months, allowing the basin's high capacity to transform precipitation into surface runoff. Sediment transport rates characterize the studied area as a low sediment production region. The sedimentological regime was found to be in accordance with the surface runoff regime, reflected by the seasonality of the transported masses. The estimation of transport of sediment in suspension through optical turbidity sensor presented promising results. Most of the results of radionuclides ^{210}Pb , ^{226}Ra , ^{228}Ra , Th and U observed in water and in suspended hydro-sediment were below the detection limit of the methodology, whereas in the riverbed hydro-sediments quantification of radionuclides was possible. The radiometric results indicate absence of radionuclide carriage from the Águas Claras Dam at INB Caldas to Ribeirão das Antas. The low concentration values of radioactive elements observed in the study may be of natural origin, once the Poços de Caldas Plateau region presents a geological constitution endowed with anomalies associated to radionuclides.

Keywords: Flow regime. Hydro-sediment Transportation Rate. Indirect monitoring. Radionuclide analyses.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BHRA	– Bacia Hidrográfica do Ribeirão das Antas
BHARA	– Bacia Hidrográfica do Alto Ribeirão das Antas
CNEN	– Comissão Nacional de Energia Nuclear
CSL	– Concentração de Sedimento de Leito
CSS	– Concentração de Sedimento Suspensão
CSS(TURB)	– Concentração de Sedimento Suspensão via Turbidez
DAM	– Drenagem Ácida de Mina
DMAE	– Departamento Municipal de Água e Esgoto de Poços de Caldas/MG
DME	– Departamento Municipal de Eletricidade de Poços de Caldas/MG
EPAMIG	– Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais
INB	– Indústrias Nucleares do Brasil
INB Caldas	– Indústrias Nucleares do Brasil, unidade de Caldas/MG
IAEA	– Agência Internacional de Energia Atômica
LAPOC	– Laboratório de Poços de Caldas
MSST	– Massa de Sedimento Suspensão Transportada
MOU	– Mina de urânio Osamu Utsumi
OMM	– Organização Meteorológica Mundial
PSEH	– Perda Solo por Erosão Hídrica
TTSS	– Taxa de Transporte de Sedimento Suspensão
TRAP	– Taxa de Restituição do Aquífero
UNIFAL	– Universidade Federal de Alfenas/MG
USGS	– Serviço Geológico dos Estados Unidos

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA	11
2	OBJETIVOS.....	15
2.1	OBJETIVO GERAL.....	15
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
3.1	HIDROLOGIA	16
3.1.1	Importância dos Recursos Hídricos	16
3.1.2	Quantidade dos Recursos Hídricos	17
3.1.3	Bacia Hidrográfica	18
3.1.4	Escoamento Superficial	19
3.2	SEDIMENTOLOGIA	21
3.2.1	Erosão e Processos Erosivos	21
3.2.2	Transporte de Hidrossedimento	22
3.2.3	Formas de Transporte de Hidrossedimento	23
3.2.4	Fatores Significativos na Erosão e no Transporte	24
3.3	SEDIMENTOMETRIA	25
3.3.1	Distribuição e Granulometria do Hidrossedimento	25
3.3.2	Quantificação do Hidrossedimento em Suspensão	26
3.3.3	Quantificação do Hidrossedimento de Leito.....	29
3.4	TURBIDEZ E SENSORES ÓPTICOS	30
3.5	INTERAÇÃO ENTRE ROCHA, ÁGUA E HIDROSEDIMENTO.....	31
4	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA	33
4.1	PLANALTO DE POÇOS DE CALDAS.....	33
4.2	BACIA HIDROGRAFICA DO ALTO RIBEIRÃO DAS ANTAS.....	35
4.3	CLIMATOLOGIA DO PLANALTO	37

4.3.1	Precipitação.....	37
4.3.2	Umidade Relativa do Ar	41
4.3.3	Temperatura.....	42
4.5	INB CALDAS.....	43
4.5.1	Drenagem Ácida Mineira na INB Caldas.....	44
4.5.2	Limites Radioativos dos Pontos de Interface da INB Caldas	46
5	METODOLOGIA.....	47
5.1	AMOSTRAGEM	47
5.2	HIDROMETRIA	52
5.2.1	Determinação da Descarga Líquida.....	53
5.2.2	Caracterização do Regime de Escoamento Superficial	55
5.3	SEDIMENTOMETRIA	59
5.3.1	Determinação da Descarga Sólida Suspensa.....	59
5.3.2	Determinação da Descarga Sólida de Leito.....	63
5.3.3	Determinação Granulométrica Sedimento de Leito	65
5.4	ANÁLISES RADIOLÓGICAS.....	65
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	67
6.1	RESULTADOS FÍSIOGRÁFICOS DA BHARA.....	67
6.1.1	Geologia	68
6.1.2	Solos e Declividade	69
6.1.3	Uso e Ocupação.....	72
6.2	RESULTADOS CLIMATOLÓGICOS NA BHARA 2016-2017	73
6.2.1	Precipitação.....	73
6.2.2	Umidade Relativa do Ar	74
6.2.3	Temperatura.....	75
6.3	RESULTADOS HIDROMÉTRICOS DA BHARA	76

6.3.1	Análise do regime de escoamento no Ponto-2	76
6.3.2	Análise do regime de escoamento no Ponto-1	86
6.3.3	Balanço Hidrológico Simplificado	89
6.4	RESULTADOS SEDIMENTOS SUSPENSO DA BHARA	90
6.4.1	Concentração de Sedimento Suspenso, Ponto-2	90
6.4.2	Taxa de Transferência de Sedimentos Suspensos.....	95
6.4.3	Taxa de Transporte de Sedimento Suspenso, via Turbidez	96
6.4.4	Concentração de Sedimento Suspenso, Ponto-1	100
6.5	RESULTADOS SEDIMENTOS DE LEITO DA BHARA	101
6.5.1	Transporte de Sedimento de Leito, Ponto-2	101
6.5.2	Transporte de Sedimento de Leito, Ponto-1	105
6.5.3	Granulometria.....	107
6.5.4	Produção Total de Sedimento de Leito.....	108
6.6	RESULTADOS RADIOMÉTRICOS DA BHARA.....	109
6.6.1	Radionuclídeos na Água	109
6.6.2	Radionuclídeos no Sedimento Suspenso	112
6.6.3	Radionuclídeos no Sedimento de Leito	114
7	CONCLUSÕES E SUGESTÕES	117
7.1	CONCLUSÕES HIDROLÓGICAS	117
7.2	CONCLUSÕES HIDROSEDIMENTOLÓGICAS.....	117
7.3	CONCLUSÕES RADIOLÓGICAS.....	118
7.4	SUGESTÕES	118
	REFERÊNCIAS	119
	APÊNDICE A	128
	APÊNDICE B	130
	APÊNDICE C	131

APÊNDICE D132

ANEXO A135

1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

A água é recurso natural fundamental à vida na Terra, um recurso limitado e que possui papel significativo no desenvolvimento econômico e social. O suprimento de demandas de água é uma continua preocupação da humanidade, devido ao crescimento populacional, às incertezas a respeito de fatores climáticos e à crescente poluição hídrica. Por outro lado, águas em excesso, durante cheias podem causar grandes prejuízos e perdas de vidas humanas. Além disso, quantidade e qualidade de água são interdependentes e a análise das condições qualitativas de um curso d'água depende do conhecimento das condições quantitativas (PAIVA; PAIVA, 2001).

Conhecer os processos de precipitação, de escoamento, de transporte de sedimento e de armazenamento hídrico de uma bacia hidrográfica é essencial para uma gestão adequada, e para a longevidade de seus recursos hídricos. As interações entre tais características, levando em conta a variabilidade espaço-temporal do sistema, possibilitam a interpretação dos fenômenos de transformação da chuva em escoamento superficial na bacia hidrográfica (MELLO; SILVA, 2013).

O monitoramento hidrométrico e sedimentométrico de uma bacia permite o diagnóstico de eventuais impactos em sua área de drenagem ao longo do tempo, sendo um importante indicador ambiental. É relevante ressaltar que os processos de erosão e sedimentação numa bacia hidrográfica podem trazer problemas como o assoreamento de reservatórios, a elevação dos gastos com tratamento da água e também a possibilidade de contaminações dos afluentes (BELINASSO; PAIVA, 2007).

A erosão hídrica é a principal forma de erosão na maioria dos países, especialmente nos tropicais e subtropicais, sendo a água, associada às suas fases no ciclo hidrológico, o mecanismo principal de geração e transporte de solo erodido. Assim, conforme destacado, a chuva, além de ser o principal componente de entrada do ciclo da água, propicia o início do processo erosivo, pois provoca o desprendimento de solo pelo impacto das gotas. As partículas d'água ao colidirem com a superfície da terra exercem um trabalho, transformando energia potencial em cinética, certa parte dessa energia é

dissipada ao atingir ao terreno e podendo causar o desprendimento de pequenos fragmentos de solo (MELLO; SILVA, 2013).

A erosão do solo também é decorrente de fatores antropogênicos, e.g., como nas atividades agrícolas que se mal praticadas promovem uma erosão que remove a camada superficial do solo, reduzindo a produtividade (BERTONI; LOMBARDI NETO, 2005). Em atividades de mineração, a erosão é proveniente principalmente do processo de remoção parcial de camada de solo ou da remoção total do solo, que são realocados na área ociosa da mina, e em alguns casos as áreas permanecem totalmente improdutivas (LIMA et al., 2006).

Os sedimentos gerados por processos erosivos são transportados para os corpos d'água por escoamento superficial direto (enxurradas), estando a qualidade da água diretamente vinculada às propriedades do sedimento transportado por ela (MELLO; SILVA, 2013).

Os rios e os hidrossedimentos formam um sistema dinâmico e complexo, onde as águas podem tanto ser contaminadas quanto descontaminadas através das interações entre os constituintes. Sabe-se que a contaminação do hidrossedimento e da água se dá em função de vários fatores, como a formação geológica da bacia hidrográfica, a intensidade de erosão das rochas e dos solos, das condições climáticas da região e também da magnitude da influência antropogênica (SIMPONS, 2005).

Os hidrossedimentos podem servir como veículos carreadores de materiais poluentes ou contaminantes, através da adsorção e da associação hidroquímica. A deposição do material carreado ocorre habitualmente nas áreas de várzeas da bacia hidrográfica, que são locais caracterizados por baixa capacidade de transporte de hidrossedimentos, sendo que a longo prazo este processo reduz a capacidade da estrutura hidráulica. (GUIMARÃES; SÍGOLO, 2008; SOUZA, 2013).

A Bacia Hidrográfica do Alto Ribeirão das Antas (BHARA) abordada nesta pesquisa, abrange a região de cabeceira do Ribeirão das Antas e o terceiro maior reservatório de água do Planalto de Poços de Caldas, a Represa de Águas Claras, que está localizada dentro da área da INB Caldas.

A INB Caldas é uma unidade de extração e tratamento de minério das Indústrias Nucleares do Brasil (INB) em descomissionamento, localizada no município de Caldas, Minas Gerais. Esta unidade foi o primeiro empreendimento de extração de urânio do Brasil, tendo iniciada a implantação em 1977 e findada a operação em 1995 (CIPRIANI, 2002).

Segundo (NOBREGA et al., 2008) desde 1995, a INB Caldas mantém um sistema de manutenção ativo, cujo o foco principal é o tratamento do problema ambiental de drenagem ácida de mina, gerada na cava e nas pilhas de estéril. O problema ambiental decorre da intensa precipitação e da drenagem natural da região, fatores que favoreceram a oxidação e lixiviação do material na pilha de estéril.

O Ribeirão das Antas possui aproximadamente 62 km de extensão, é o rio principal da Bacia Hidrográfica do Ribeirão das Antas, bacia que ocupa aproximadamente 60 % da área total do Planalto de Poços de Caldas. O Planalto detém formação geológica peculiar, caracterizada por uma enorme intrusão alcalina associada à anomalias de urânio e tório (ALBERTI, 2008).

A Bacia Hidrográfica do Alto Ribeirão das Antas (BHARA) abrange uma área equivalente à 152,4 km², equivalente a 33,5 % de toda a Bacia Hidrográfica do Ribeirão das Antas. A área da pesquisa apresenta coeficiente de compacidade de 1,36, valor atribuído à bacia hidrográfica com tendência mediana a ocorrências de enchentes. Na BHARA a declividade da calha do Ribeirão das Antas é de 17,72 m.km⁻¹, sendo importante ressaltar que na região há um reservatório de água denominado, Represa de Águas Claras.

Nesta pesquisa foram caracterizadas em todas as sazonalidades, o escoamento superficial e o transporte de hidrossedimento suspenso e de leito, na Bacia Hidrográfica do Alto Ribeirão das Antas. As caracterizações do escoamento superficial e do hidrossedimento suspenso foram realizadas de forma direta, em duas seções de monitoramento, e de forma indireta, em uma seção de monitoramento na calha do Ribeirão das Antas. O transporte de hidrossedimentos de leito foi determinado de forma direta, em duas seções de monitoramento na calha do ribeirão.

Posteriormente, foram quantificados os radionuclídeos ²¹⁰Pb, ²²⁶Ra, ²²⁸Ra, Th e U, em todas as amostras de água, de hidrossedimento suspenso e

de hidrossedimento de leito coletadas diretamente na calha do Ribeirão das Antas. Aferir a concentração de atividade dos radionuclídeos na água da BHARA é de suma importância, pois almeja identificar o carreamento de elementos radioativos na região de cabeceira do ribeirão, que potencialmente podem se propagar para todo o restante do manancial.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar as interações entre o escoamento superficial, o transporte de hidrossedimentos e os radionuclídeos ^{210}Pb , ^{226}Ra , ^{228}Ra , Th e U, em seções na calha do Ribeirão das Antas a jusante da Represa de Águas Claras.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Caracterização fisiográfica da Bacia Hidrográfica do Alto Ribeirão das Antas.
- b) Estimar o escoamento superficial de forma direta, em duas seções a jusante da Represa de Águas Claras, abrangendo todas as sazonalidades.
- c) Estimar o escoamento superficial de forma indireta, via sensor hidrostático.
- d) Estimar o transporte de hidrossedimento suspenso de forma direta, em duas seções a jusante da Represa de Águas Claras, abrangendo todas as sazonalidades.
- e) Estimar o transporte de hidrossedimento suspenso de forma indireta, via sensor óptico de turbidez.
- f) Estimar o transporte de hidrossedimento de leito diretamente, em duas seções à jusante da Represa de Águas Claras, abrangendo todas as sazonalidades.
- g) Quantificar os radionuclídeos ^{210}Pb , ^{226}Ra , ^{228}Ra , Th e U, na água.
- h) Quantificar os radionuclídeos ^{210}Pb , ^{226}Ra , ^{228}Ra , Th e U, no hidrossedimento suspenso.
- i) Quantificar os radionuclídeos ^{210}Pb , ^{226}Ra , ^{228}Ra , Th e U, no hidrossedimento de leito.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Destacam-se na revisão bibliográfica conceitos importantes para a compreensão desta pesquisa.

3.1 HIDROLOGIA

3.1.1 Importância dos Recursos Hídricos

Segundo (MELLO; SILVA, 2013), a água é um recurso natural reciclável que aparentemente encontra-se em grande disponibilidade, por ocupar 70 % da superfície do planeta. No entanto, o recurso hídrico não apresenta distribuição qualitativa e quantitativa homogênea na crosta terrestre. Assim, a água sempre foi e continuará sendo, essencial e limitante para o desenvolvimento socioeconômico.

A água do planeta Terra se recicla no decorrer do ciclo hidrológico. O ciclo é descrito como o fenômeno global de circulação fechada da água entre a litosfera, a hidrosfera e a atmosfera, impulsionado fundamentalmente pela energia solar, associada à gravidade e à rotação terrestre (TUCCI, 1993).

A água é fundamental à vida e indispensável em muitas atividades humanas, além de ser componente elementar do meio ambiente e da paisagem. Em atividades como a geração de energia elétrica, o abastecimento doméstico e industrial, a irrigação, a navegação, a recreação, o turismo, a aquicultura, a piscicultura, a pesca e ainda a assimilação de esgoto, o valor do recurso hídrico é inestimável (TEIXEIRA, 2009).

A Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM), denota os percentuais para o consumo de água relativo as principais atividades econômicas em Minas Gerais. Destaca-se o uso na irrigação, que chega a 90 % do total utilizado no estado, em consonância com uma das principais atividades econômicas de Minas Gerais, a agropecuária. No estado mineiro, os restantes dos recursos hídricos estão distribuídos entre o abastecimento humano (8,92 %), o abastecimento industrial (0,60 %) e a dessedentação animal (0,62 %) (FEAM, 2010).

Estudos hidrológicos que permitem estimar o escoamento e a capacidade de transformação da precipitação em vazão, são de primordial importância. Pois fomentam o planejamento dos usos de recursos hídricos, o planejamento da sua ocupação e o controle dos impactos. Sendo notável destacar que informações sobre a quantidade e qualidade da água são cruciais para a compreensão dos processos ambientais, e em particular, dos corpos hídricos com relação aos impactos antrópicos na bacia hidrográfica (TUCCI, 2005).

3.1.2 Quantidade dos Recursos Hídricos

As medidas hidrológicas de precipitação, vazão e evaporação são indispensáveis para a compreensão do regime hidrológico de uma bacia hidrográfica, seja para um dado período de tempo ou para um evento extremo. Tais informações dão suporte à calibração e à validade de modelos hidrológicos, e por conseguintes, de hipóteses científicas incorporadas nestes modelos (PAIVA; PAIVA, 2001).

A precipitação é a medida da altura de água ou lâmina que seria acumulada em superfície plana se nenhuma perda ocorresse. Para tal, utilize-se aparelhos coletores de chuva com área de captação patronizada pela Organização Meteorológica Mundial (OMM), são denominados pluviômetros (PAIVA; PAIVA, 2001).

Os postos pluviométricos produzem séries ininterruptas de dados de precipitações ao longo dos anos, assim permitem o estudo ao longo do tempo. No entanto, comumente os dados apresentam falhas de registros decorrentes de motivos aleatórios, o que pode gerar complicações e dificuldades para o desenvolvimento de estudos.

A medida de nível de água pode ser feita usando régua centimétrica ou aparelhos de registro contínuo, os linígrafos. Estes instrumentos registram continuamente as variações de nível de água ao longo do tempo na seção de controle, baseiam-se principalmente na variação da pressão da coluna d'água. Os equipamentos mais modernos possuem “*dataloggers*” e fontes de energia

solar fotovoltaicas acoplados, permitindo o armazenamento das variações de níveis em intervalos de minutos e por longos períodos (PAIVA; PAIVA, 2001).

Uma série de nível d'água pode ser convertida em série de vazão, por meio da curva-chave da seção de controle. A curva-chave ou curva de calibração, relaciona o nível e a vazão da seção de controle, portanto aplicável exclusivamente a seção de amostragem abordada. Obtém-se a curva-chave por meio de medições diretas de nível e de vazão na seção, efetuadas concomitantemente.

Simplificadamente, os métodos de medição de vazão podem ser classificados em estrutural e não estrutural. A medição estrutural se dá por estrutura de medição pré-calibradas, bastando-se determinar em geral uma medida de nível para obter-se a vazão, para tal o comum é o uso de vertedores e de medidores Parshall. Enquanto que os métodos não estruturais, realizam diretamente a integração da distribuição de velocidades aplicando o uso de molinetes, FlowTracker, flutuadores, traçadores químicos, acústicos, entre outros (PAIVA; PAIVA, 2001).

3.1.3 Bacia Hidrográfica

Segundo Tucci (1993) a bacia hidrográfica é a área definida topograficamente, drenada por um curso d'água ou um sistema conectado de cursos d'água, de modo que toda a vazão efluente seja descarregada através de uma saída. A bacia constitui-se como a área coletora da água precipitada, que a faz convergir para uma única seção de saída, denominada exutório, foz ou desembocadura.

No balanço hidrológico de uma bacia hidrográfica, o volume de água precipitada corresponde à quantidade de entrada. A quantidade de saída obtém-se pela soma do volume de água escoado no exutório. A diferença entre os volumes correspondentes às perdas intermediárias, decorrentes da evaporação e transpiração. Em certos ambientes, a quantidade infiltrada profundamente pode ser tratada como saída ou incorporadas no termo de armazenamento subterrâneo d'água (TUCCI, 1993).

Segundo (COLLISCHONN, 2008) a linha de cumeada (cota topográfica máxima entre duas bacias hidrográficas) é responsável pela disjunção das duas bacias e consequentemente pela separação das precipitações que caem em bacias vizinhas. A divisão topográfica segue uma fronteira rígida em torno da bacia, sendo cortado pelo curso d'água somente na seção de saída.

A bacia hidrográfica conforme a sua definição, está limita pela seção exutório o curso d'água principal, onde desagua em outro curso d'água ou reservatório, baia, lago, oceano, etc. As bacias maiores ou principais, podem ser segmentadas em sub-bacias para melhorar a qualidade das informações hidrológicas (COLLISCHONN, 2008).

3.1.4 Escoamento Superficial

Escoamento superficial é a parcela do ciclo hidrológico relacionada ao deslocamento das águas sobre a litosfera. É a fração mais importante do ciclo para os projetos de engenharia ligadas ao aproveitamento da água superficial, para os projetos de armazenamento de água e para os projetos de direcionamento de excesso (MELLO; SILVA, 2013).

Os fatores climáticos que intervém no escoamento superficial são o solo (cobertura e condições de uso do solo), a evapotranspiração e a precipitação (quantidade, intensidade e duração).

Os fatores fisiográficas que influenciam no escoamento superficial são a forma da bacia (área, forma e declividade), as condições de superfícies e as obras hidráulicas presentes na bacia. Todos os fatores climáticos e fisiográficos citados interferem na taxa de infiltração da água no solo e no escoamento superficial resultante (TUCCI, 1993).

A Figura-1 ilustra os componentes do escoamento superficial, sendo:

- **Escoamento superficial direto,**
- **Escoamento subsuperficial;**
- **Escoamento subterrâneo ou de base.**

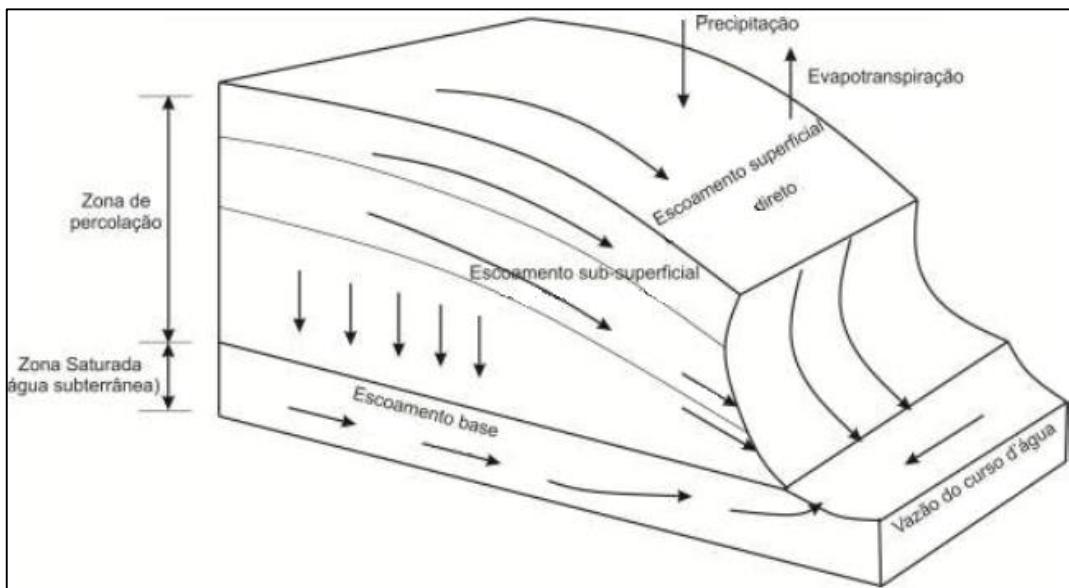


Figura 1 – Componentes do escoamento superficial: escoamento superficial direto, escoamento subsuperficial e escoamento de base.

Fonte: MELLO; CURI, 2011.

Mello; Silva (2013) enfatizam que o escoamento superficial direto, origina-se do excesso de precipitação que escoa diretamente sobre a superfície. O escoamento superficial direto ou deflúvio, é controlado principalmente pela saturação do solo (que reduz capacidade de infiltração) e pela intensidade elevada de precipitação (que pode ocasionar a superação da capacidade de infiltração do solo).

O escoamento subsuperficial ocorre na camada de solo mais próxima à superfície, abaixo da qual há algum tipo de impedimento de infiltração, tais como solos impermeáveis, adensamentos e rochas coesas. Esta parcela do escoamento possui maior relevância em áreas densamente ocupadas por florestas em regiões montanhosas. O escoamento subsuperficial apresenta uma taxa de drenagem mais lenta que o escoamento superficial direto (MELLO; SILVA, 2013).

O escoamento subterrâneo ou de base, advém da drenagem natural do aquífero (zona saturada), sendo importante do ponto de vista da capacidade de produção de água da bacia hidrográfica. A existência e manutenção do escoamento de base é procedente do saldo do balanço hídrico vertical (precipitação menos a evapotranspiração) e das características do processo de recarga na bacia, tais como uso do solo, topografia, propriedades hidrológicas

do solo, entre outras. O escoamento subterrâneo possui imensa importância em regiões de relevo consideravelmente plano e de regime pluviométrico caracterizado por chuvas de baixa intensidade com longa duração (MELLO; SILVA, 2013 *apud* MENEZES, 2011).

3.2 SEDIMENTOLOGIA

3.2.1 Erosão e Processos Erosivos

Os processos erosivos atuam nas rochas desde a origem do planeta, são decorrentes dos movimentos tectônicos da crosta terrestre e de processos naturais de modificação, que beneficamente originam o solo. Todos os processos de desgaste das rochas e/ou dos solos são caracterizados como erosão, podendo ser o deslocamento, a desagregação, ou o arrastamento das partículas por ação da água, do vento, do desmatamento ou outra origem (CARVALHO, 2008; CHEVIRON, 2014;).

A erosão consiste no processo de desprendimento e arraste de partículas de solo. Segundo (PRUSKI, 2006) a erosão causa problema relacionado à qualidade e disponibilidade da água, pode ocasionar a poluição e o assoreamento dos mananciais. O processo erosivo favorece a ocorrência de enchente no período chuvoso e aumenta a chance de escassez de água no período de estiagem.

A erosão do solo a longo prazo pode acarretar prejuízos ao meio ambiente, as atividades econômicas e principalmente ao setor agropecuário. A perda de solo por erosão é a principal causa da degradação das terras agrícolas no Brasil, podendo provocar a elevação do custo de produção, devido ao aumento o uso de corretivos e fertilizantes nas áreas afetadas (PRUSKI, 2006).

Fatores antropogênicos cada vez mais aceleram e aumentam a erosão do solo. Dentre as maiores fontes estão as atividades agrícolas, que se mal praticadas causam perda da camada superficial do solo. As atividades de extração mineral também contribuem significativamente com os processos erosivos, pois em minas a céu aberto é necessário executar a remoção parcial

ou total do solo, que não realocados para outras áreas do empreendimento. Em alguns casos as áreas permanecem totalmente improdutivas (LIMA, 2008; PHENRAT, 2016).

O rápido crescimento global da indústria e urbanização nas últimas décadas também causaram muito impactos ambientais, alguns ainda não mensuráveis. Os resíduos industriais e urbanos contaminados que são assimilados pelos cursos d'água podem possuir altas concentrações de metais pesados, que potencialmente pode contaminar a água, o sedimento e o solo (PANDEY, 2015).

Barroso e Silva (1992) afirmam que os principais problemas que ocorrem em cursos e reservatórios de água em decorrência dos processos erosivos são:

- Redução da capacidade de armazenamento dos reservatórios devido à sedimentação.
- Diminuição do potencial de geração de energia elétrica em consequência da redução da capacidade de acumulação de água nos reservatórios.
- Elevação os custos de tratamento de água.
- Desequilíbrio do balanço de oxigênio dissolvido na água e prejuízos para o crescimento de espécies aquáticas, em razão da turbidez da água e da consequente redução da capacidade de propagação da luz.
- Aumento dos custos de dragagem dos cursos e reservatórios de água.

3.2.2 Transporte de Hidrossedimento

Os sedimentos gerados por processos erosivos hídricos são transportados até os corpos d'água, por escoamento superficial direto denominado ou enxurradas. O sedimento quando incorporado ao curso d'água denomina-se hidrossedimento, sendo transportado em suspensão ou arraste de fundo. A qualidade da água está diretamente vinculada às propriedades do sedimento por ela transportada. (MELLO; SILVA, 2013)

Carvalho (2008) destaca que a intensificação do carreamento de hidrossedimentos pelos cursos d'água ocorrerá sempre na época chuvosa. O autor ressalta que de 70 % a 90 % de todo o sedimento transportado nas

calhas dos corpos d'água ocorreram no período das chuvas, principalmente durante as fortes precipitações.

Os hidrossedimentos são transportados pelos cursos d'água até as áreas onde a velocidade do escoamento da água diminui, locais que apresentam regime de escoamento lento, nestes ocorrem as formações de depósitos. Esse processo de sedimentação pode ocorrer em áreas mais profundas ao longo do rio, em áreas de várzea durante inundações, nos reservatórios e nos lagos. No caso da foz de rios, há ainda o depósito de material em regiões estuarinas e no leito oceânico (CARVALHO, 2008; GUIMARÃES; SÍGOLO, 2008; ZIEGLER, 2014).

A possibilidade de contaminação da água e do hidrossedimento é oriunda de vários fatores, como a formação geológica da bacia hidrográfica, a intensidade de erosão das rochas, dos solos, das condições climáticas da região e também da magnitude da influência antropogênica (HORTELLANI et al., 2008; SIMPONS, 2005; SOUZA, 2013).

O hidrossedimento carreado pelos corpos d'água pode servir como veículo transportador de metais pesados e de elementos radioativos. Estes elementos podem aparecer na fase dissolvida ou na particulada, através de processo de adsorção e coprecipitação (HOSSAIN, 2015). Posteriormente, as partículas e hidrossedimentos carreados se depositam juntamente, havendo a possibilidade de deteriorar a qualidade das águas (FAGNANI, 2011; SOMMERLOT et al., 2013).

3.2.3 Formas de Transporte de Hidrossedimento

A forma de transporte do hidrossedimento no curso d'água depende da granulometria (tamanho da partícula, peso e forma), do escoamento (laminar ou turbulento, velocidade da corrente e obstáculos no leito) e das condições locais (declividade do leito, forma do canal, temperatura e outros). Estes aspectos controlam as forças que atuarão sobre o hidrossedimento, definindo se o transporte ocorrerá em suspensão ou no fundo do rio, saltando de leito para o escoamento, deslizando ou rolando ao longo do leito (CAMPOS; FREITAS, 2007).

O transporte de hidrossedimento em suspensão é em função predominantemente da velocidade do fluxo d'água. Enquanto que o transporte de hidrossedimento de leito além da velocidade é muito influenciado pelo atrito que atua no seu descolamento. (CARVALHO, 2008; VANONI, 1977)

Segundo Subcommittee on Sedimentation (1963) a definição mais usada dos tipos de sedimentos é a seguinte:

- **Carga Sólida de Arrasto:** são as partículas que rolam ou escorregam longitudinalmente no curso d'água. As partículas estão em contato com o leito praticamente o tempo todo.
- **Carga Sólida Saltante:** são partículas que pulam ao longo do curso d'água por efeito da correnteza ou devido ao impacto de outras partículas.
- **Carga Sólida em Suspensão:** são as partículas que estão suportadas pelas componentes verticais das velocidades do fluxo turbulento, enquanto estão sendo transportadas pelas componentes horizontais dessas velocidades. Sendo as partículas pequenas o suficiente para permanecerem em suspensão, subindo e descendo na corrente acima do leito. O movimento da partícula em suspensão é mais complexo do que a partícula de leito.

3.2.4 Fatores Significativos na Erosão e no Transporte

De acordo com Carvalho (2008), o transporte de sedimentos se processa de uma forma complexa. Numa seção transversal de um curso d'água, a descarga sólida depende da profundidade, largura, velocidade, declividade, temperatura, turbulência e da descarga líquida; também da granulometria, densidade, forma e coesão das partículas das margens e do leito; e por fim da geologia, climatologia, topografia, solos, subsolos e cobertura vegetal da área de drenagem.

Segundo (COLBY, 1964) na erosão e no transporte de sedimentos, os cinco fatores mais importantes são:

- a) Natureza, quantidade e intensidade de precipitação.**
- b) Orientação, grau e comprimento dos declives.**
- c) Geologia e tipos de solos.**
- d) O uso da terra.**
- e) Condições e densidade da rede de drenagem.**

Assim, decorrente da vasta quantidade de fatores significativos, uma obtenção direta da descarga líquida e sólida total exigem estudos que conduzam a parâmetros representativos do fenômeno. Para a interpretação dos dados aferidos, adota-se o uso de expressões matemáticas e a representação gráfica. Para tal, é necessário que se tenha um bom entendimento do fenômeno, aliando os aspectos hidrológicos e sedimentológico, assim será possível extrair adequadamente as informações disponíveis (CARVALHO, 2008, *apud* GLYSSON, 1987).

3.3 SEDIMENTOMETRIA

3.3.1 Distribuição e Granulometria do Hidrossedimento

A natureza procura um equilíbrio próprio, considerado estável para o rio. Se houver mudança na quantidade de descarga sólida, o rio responde, reagindo conforme as alterações impostas. Caso a carga sólida seja grande, haverá uma tendência de depósitos, ocorrendo a “agradação” do leito do rio. Ao contrário, caso a carga sólida seja pequena, o rio responde com a “degradação” do leito (CARVALHO, 2008).

Quando tratamos da distribuição da descarga sólida ao longo da seção da calha do rio devemos avaliar a direção horizontal e a direção vertical. No sentido horizontal o hidrossedimento está sujeito principalmente a ação da velocidade da corrente e do seu peso. Assim sendo, a concentração do hidrossedimento apresenta o mínimo na superfície e um máximo perto do leito, para uma granulometria variada (PAIVA; PAIVA, 2001; PRESS, 2006).

A Figura-2, apresenta as tendências de comportamento do hidrossedimento. O comportamento do hidrossedimento mais fino e leve, como silte e argila, apresenta uma distribuição aproximadamente uniforme na vertical. As partículas mais grossas e pesadas do hidrossedimento, predominantemente a areia grossa, apresentam uma variação crescente da superfície para o leito, concentrando preferencialmente no fundo (CARVALHO 2008, *apud.* SUBCOMMITTEE ON SEDIMENTATION, 1963).

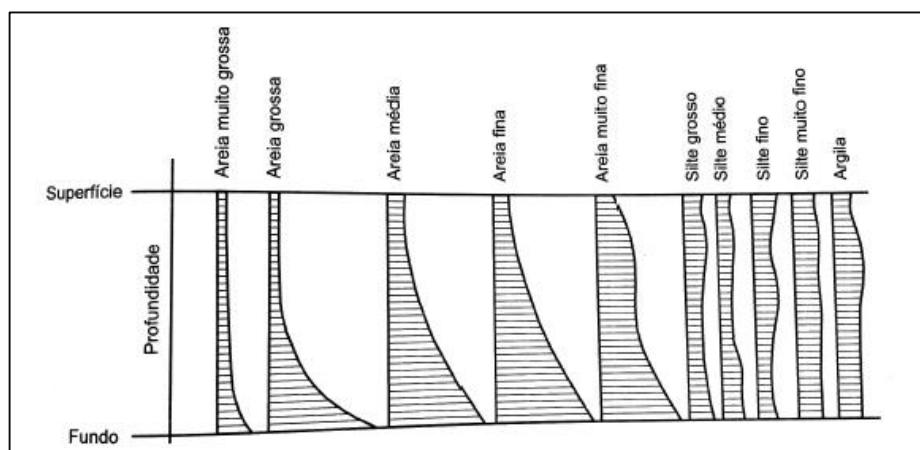


Figura 2 - Distribuição vertical dos sedimentos nos cursos d'água.

Fonte: CARVALHO 2008.

3.3.2 Quantificação do Hidrossedimento em Suspensão

A quantificação da descarga sólida suspensa fornece informações sobre a massa total transportada pelo curso d'água e também sobre as propriedades do hidrossedimento carreado. As quantificações mais precisas são obtidas por medições diretas na calha do curso d'água e abrangendo todo o ano hidrológico.

Estudos afirmam que o rio sempre transporta uma maior carga em suspensão, que na maior parte dos cursos d'água essa parcela representa mais de 90 % da descarga sólida total. Entretanto medições sucessivas demonstraram que pode haver rios com descarga sólida de leito maior valor, em alguns casos igualam ou até mesmo superam a descarga sólida suspensa, comum em rios com muito material rochoso no leito e de águas limpidas

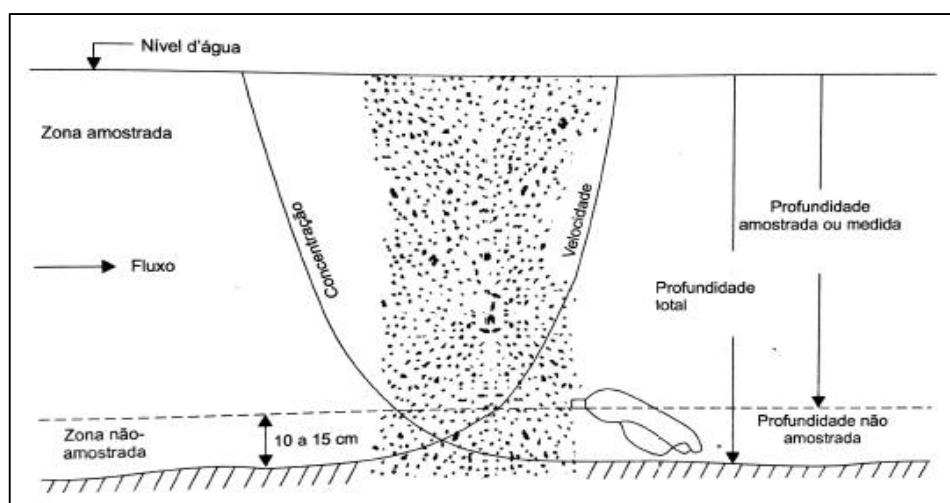
(CARVALHO, 2008; DURÃES; COELHO FILHO; OLIVEIRA, 2016; MERTEN et al., 2007).

Uma estimativa confiável da massa de sedimento transportado pelo fluxo d'água, deve abranger todas as sazonalidades. Pois existe uma alta variabilidade temporal na concentração de sedimento suspenso (SKARBØVIK et al., 2012).

A quantificação do hidrossedimento suspenso realizada por integração de profundidade ou pontual, fornece amostras com a variação do tamanho de partículas que representam toda a descarga de hidrossedimentos suspensos da vertical amostrada. (EDWARDS; GLYSSON, 1999).

A Figura-3, apresenta a divisão da vertical em zona amostrável e zona não amostrável. A divisão da vertical em zonas, é originária dos formatos hidrodinâmicos dos equipamentos, que limitam a efetiva amostragem em profundidades menores que 10 centímetros. A forma hidrodinâmica impede amostragem da profundidade inteira, pois a localização física do bico do amostrador é mais alta que o fundo do amostrador, impossibilitando que o bico entre na zona de transporte de leito localizada rente ao fundo da calha do rio (SILVA JUNIOR, 2010 *apud* CARVALHO, 2008).

Figura 3 - Zonas de amostragens, numa vertical de amostragem da corrente com relação à velocidade de fluxo e concentração de sedimento.



Fonte: CARVALHO, 2008.

Um dos métodos mais utilizados e recomendados de amostragem de sedimento em suspensão é o método de Igual Incremento de Largura (IIL), internacionalmente denominado Equal Width Incremente (EWI).

A Figura-4, apresenta a divisão da seção transversal em uma série de subseções de largura igual, prescrita na metodologia IIL. Cada subseção produzirá uma subamostra, exemplificado na Figura-5 (CARVALHO, 2008).

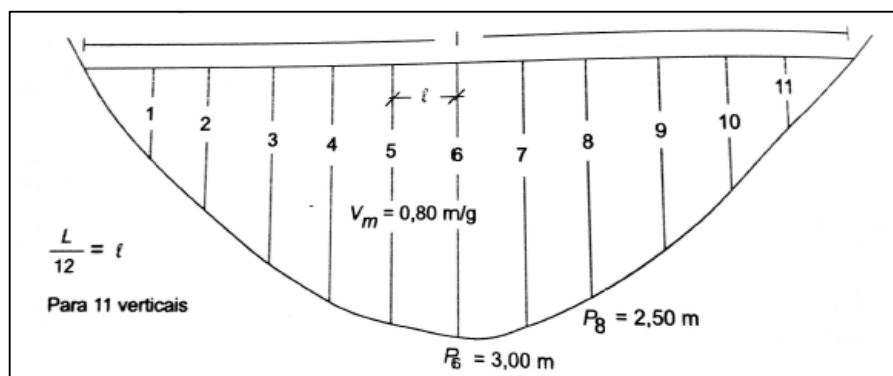


Figura 4 - Exemplo de série de subseções de largura igual.
Fonte: CARVALHO, 2008

A Figura-5, retrata o procedimento de IIL que fornece em cada vertical uma subamostra com volume proporcional à vazão na subseção amostrada. As diversas subamostras podem ser reunidas numa só, composta em laboratório, para uma só análise de concentração e de granulometria (CARVALHO, 2008; SILVA JUNIOR, 2010).

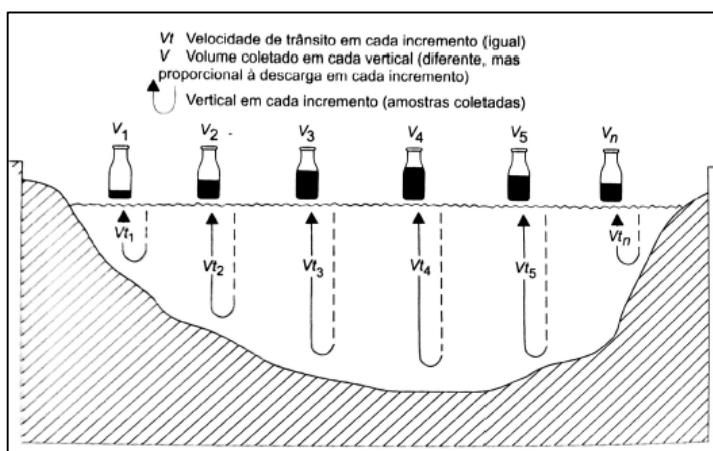


Figura 5 - Subamostras proporcionais as velocidades de transito, amostradas por metodologia Igual Incremento de Largura, IIL.
Fonte: CARVALHO, 2008.

3.3.3 Quantificação do Hidrossedimento de Leito

Do mesmo modo que são distintas as zonas de carreamento suspenso e carreamento de leito, também são distintos os métodos de quantificação de descarga sólida. O hidrossedimento de leito, diferentemente do hidrossedimento suspenso, não se move com a mesma velocidade do fluxo d'água. Desta forma, as diretrizes que regem o carreamento de hidrossedimento de leito são as granulometrias, as velocidades do fluxo d'água, as declividades do leito, as forças de atrito entre as partículas, as profundidades do curso d'água e outros fatores (HELLEY; SMITH, 1971; MERTEN et al., 2008; YANG, 1996).

Os métodos diretos de quantificação de hidrossedimento de leito, podem utilizar equipamentos portáteis ou removíveis. Estes instrumentos são alocados no fundo da calha do curso d'água ou utilizam estruturas fixas, como os poços ou fendas do tipo alçapão na seção transversal. As medições necessariamente devem abranger toda a seção, assim obtém-se uma amostra íntegra do hidrossedimento de leito transportado (CARVALHO, 2008).

A quantificação de hidrossedimento de leito por métodos indiretos é obtida aplicando metodologias diversas, como por exemplo, subtraindo-se da descarga sólida total a descarga em suspensão, por métodos que usam traçadores radioativos ou isotópicos, entre outras metodologias.

Sinnakaudan et al. (2010) ressalta que a quantificação de hidrossedimento de leito evolui muito nas ultimas décadas, com o desenvolvimento de modelos matemáticos. No entanto, a maioria dessas equações são baseadas em rios com gradientes de declividades médios. Os autores, destacam que nos rios montanhosos de declividade elevada o transporte do hidrossedimento de leito é muito maior, consequentemente os problemas decorrentes dos processos erosivos nestas regiões são severos.

3.4 TURBIDEZ E SENsoRES ÓPTICOS

A turbidez avalia o grau de atenuação e dispersão da luz incidente na água. A variação da turbidez no curso d'água decorre da oscilação da quantidade de partículas presentes na água. As partículas na água oriundas da superfície da bacia hidrográfica, possuem como fontes principais os desmatamentos, os processos erosivos e as atividades de extração mineral (OLIVEIRA, 2017; SOMMERLOT et al., 2013).

De acordo com (BRAGA et al., 2005) o material carreado pelo curso d'água é constituído de partículas orgânicas e inorgânicas (areia, silte, argila), de sólidos suspensos e de leito, de plânctons e de micro-organismos.

Para quantificar a turbidez pode ser usado o turbidímetro ou nefelômetro, que mede a turbidez em Unidades Nefelométricas de Turbidez (NTU). O equipamento compara o espalhamento de um feixe de luz ao passar pela amostra, com o de um feixe de igual intensidade, ao passar por uma solução padrão. Quanto maior o espalhamento, maior será a turbidez (BORGES, 2006).

O desenvolvimento tecnológico impulsionou uma evolução nos softwares de avaliação dos recursos hídricos análise e também na aquisição de dados. A telemetria por exemplo, permite o controle, acesso e aquisição dos dados em qualquer lugar. Atualmente, no mercado encontram-se instrumentos de medição cada vez mais precisos e comercialmente acessíveis, como os diversos tipos de sensores e as sondas multiparâmetros.

Os tipos de sensores, segundo EPA (2005) são sensores potenciométricos de estado sólido, sensores de condutividade hidráulica, sensores de fibra óptica, microssensores e espectroscopia de indução à laser. Dentro desta classificação, é importante ressaltar que existem subcategorias para usos e aplicação mais avançada.

O sensor hidrostático, também denominado sensor de nível, realiza a medição contínua do nível do fluido. Para executar o monitoramento contínuo dos rios, o sensor é colocado diretamente no curso d'água, utilizando a pressão da coluna d'água para produzir o sinal elétrico que será registrado como medida de altura de coluna d'água (BORGES, 2006).

O sensor de turbidez é um sensor de campo óptico, através do qual usualmente pretende-se medir o conteúdo de sólidos suspensos na água. Assim, possibilitando o monitoramento contínuo e automático do sedimento suspenso (BORGES, 2006).

O monitoramento contínuo de turbidez nos cursos d'água cresceu exponencialmente na última década, por meio dos sensores de turbidez. Os sensores ópticos de turbidez são os equipamentos mais aplicados a este tipo de monitoramento em bacia hidrográfica. Um dos propósitos do monitoramento da turbidez é estimar a concentração de sedimento suspenso no curso d'água (ZIEGLER, 2014).

Salienta-se, que a turbidez alta acarreta problemas de redução da fotossíntese, de encarecimento do tratamento da água e diminui da qualidade de parâmetros físicos da água (BRAGA et al., 2005).

3.5 INTERAÇÃO ENTRE ROCHA, ÁGUA E HIDROSEDIMENTO

O intemperismo reúne um conjunto de interações entre as fases sólidas minerais das rochas e solos, com água meteórica e água subsuperficial. Por meio de processos químicos de hidrólise, precipitação, dissolução, reações de oxirredução, ácido-base, entre outros (BORGES, 2006). Estes processos podem formar minerais secundários, polímeros orgânicos, minerais primários residuais e os íons solúveis, que podem ser transportados para a água.

A água carrega em sua composição traços litológicos do seu ambiente de formação. A magnitude das influências litológicas depende da natureza e da quantidade dos constituintes das rochas e solos. E totalmente subordinada as condições do ambiente hidrogeoquímico como o pH, o potencial oxirredução, a atividade biológica, drenagem, do meio oxidante-redutor, temperatura, entre outros (GASTMANS et al., 2005).

Os processos hidroquímicos existentes no ambiente determinam a composição da água que se formará, consequentemente se será constituída de determinados íons maiores, íons menores, metais pesados e elementos radioativos (BARISON, 2003).

A composição química da água subsuperficial e subterrânea depende principalmente do tipo de rocha por onde lixivia. No entanto, é importante ressaltar que a água associada a uma mesma formação geológica pode apresentar características diferentes, em função do clima e das zonas de recarga (BORGES, 2006).

Interações que alteram a composição a água também podem ocorrer durante o escoamento superficial da água. Os hidrossedimentos carreados pela água são formados por carbonatos, hidróxidos, silicatos, sulfetos, fosfatos, material orgânico e outros materiais, em diferentes estágios de cristalização, estequiometria ou hidratação. Esta grande variedade e possibilidade de interações podem ocasionar tanto a contaminação, quanto a descontaminação da água.

Os metais presentes nos hidrossedimentos aparecem geralmente na forma de óxidos, adsorvido ou imobilizados na matéria orgânica. O material transportado pode sofrer modificações na sua composição química, como adsorção e dessorção seletiva das substâncias dissolvidas (SOUZA, 2013).

O comportamento dos radionuclídeos quando transportados por escoamento superficial, dependem de inúmeros fatores, tais como, suas propriedades físico-químicas, suas características mineralógicas, da qualidade das águas, das características dos hidrossedimentos de fundo e de suspensão, bem como da atividade biológica do meio (AMARAL, 1979; MOYES, 2000).

Caso ocorra a identificação de hidrossedimentos contaminados, as medidas de remediação podem ser classificadas como ativas e passivas, sendo estas influenciadas pela dimensão da contaminação. A medida passiva mais comum é a atenuação natural, enquanto as medidas ativas envolvem a remoção de contaminantes do hidrossedimento *in situ* ou *ex situ*. Independente da medida escolhida na remediação de sedimentos contaminados, um ponto essencial é o controle sobre a fonte de contaminação (BASILIO, 2005; FAGNANI et al., 2011).

4 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA

Destacam-se na caracterização da área informações importantes para a compreensão desta pesquisa.

4.1 PLANALTO DE POÇOS DE CALDAS

O Planalto de Poços de Caldas, ou Planalto Alcalino de Poços de Caldas, ou ainda Maciço Alcalino de Poços de Caldas, possui coordenada geodésica central $21^{\circ}47'00''$ S e $46^{\circ}33'00''$ W. Está localizado na divisa entre os estados de Minas Gerais e São Paulo, abrangendo uma área de aproximadamente 750 km².

O Planalto possui geologia peculiar, sendo constituído por rochas efusivas e hipabissais, rochas plutônicas, brechas, tufos, aglomerados e anomalias radioativas (principalmente urâno e tório). Região distinta por possuir extensa elevação estrutural com forma externa circular, com diâmetro aproximado de 30 km e altitudes variando de 1.180 m à 1.640 m (ALBERTI, 2008; ELLERT, 1959; LEINZ, 1998).

O platô supostamente é do período Cretáceo inferior, a evolução do Planalto e adjacências inicia-se com a intrusão de rochas félsicas em aproximadamente 89 Ma, estendendo-se até cerca de 54 Ma. (FRANCO et al., 2005). As manifestações vulcânicas são visíveis em alguns diques menores e nas serras que bordejam o Planalto após a subsidência da caldeira principal. Um dos resultados dos processos geológicos ocorridos no Planalto foi a formação de estrutura em caldeira, uma das maiores do mundo.

Diversas pesquisas de cunho geológico e de prospecção mineral, foram desenvolvidos no Planalto (ELLERT, 1959; FRAYHA, 1971; SCHORSCHER; SHEA, 1991; ULRICH; ULRICH, 2000). Salienta-se que muitos dos estudos que avaliaram as condições geológicas do Planalto são provenientes de projetos de empresas de mineração implantadas na área, como a Alcoa Alumínio, a Companhia Brasileira de Alumínio (CBA) e a Indústrias Nucleares do Brasil (INB) (FRAYHA, 1971).

Os estudos geológicos afirmam que foiaítos, tinguaítos e fonolitos são os três tipos de rochas principais e são provenientes da mesma atividade vulcânica, apresentando composição química semelhante. Os minerais predominantes no Planalto são anortoclásio ($(\text{NaK})\text{AlSi}_3\text{O}_8$), sanidina (KAlSi_3O_8), nefelina (NaAlSiO_4) e aegirita ($\text{NaFeSi}_2\text{O}_6$). Os minerais acessórios encontrados com mais frequentes são analcita ($\text{NaAlSi}_2\text{O}_6 \cdot \text{H}_2\text{O}$), titanita (CaTiSiO_5), magnetita (Fe_3O_4), fluorita (CaF_2) e zircão (ZrSiO_4). No Planalto também é encontrada pirita (FeS_2) e argilominerais como a caulinita e montmorillonita. A caldeira passou por eventos hidrotermais responsáveis por formações de muitos minérios dentro do complexo da cratera (ALBERTI, 2008, *apud* LEINZ, 1998).

A Figura-6 apresenta as cristas do Planalto de Poços de Caldas, as áreas urbanas dos municípios, a hidrografia da Bacia do Ribeirão das Antas, o Ribeirão das Antas, os reservatórios e dois corpos de minérios com associação radioativa, o Morro do Ferro e a INB Caldas.

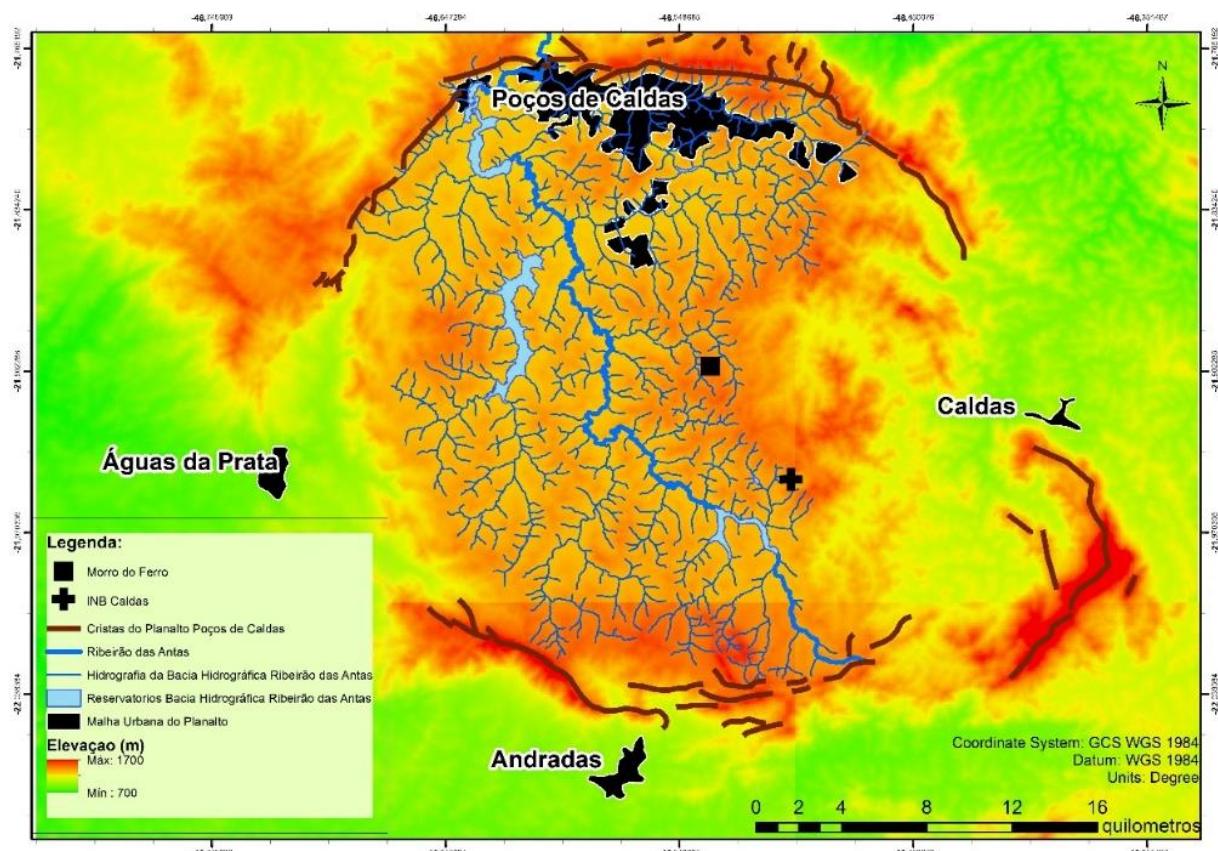


Figura 6 - Localização da INB Caldas e do Morro do Ferro.
Fonte: Do autor.

A rede hidrográfica do Planalto é constituída por duas bacias, a Bacia Hidrográfica do Ribeirão das Antas, cuja hidrografia está representada na Figura-6, e a Bacia Hidrográfica do Rio Verde. As duas bacias hidrográficas do Planalto são afluentes do Rio Pardo, inseridas na Bacia do Rio Grande, afluente do Rio Paraná (ALBERTI, 2008).

A Bacia Hidrográfica do Ribeirão das Antas (BHRA) abrange aproximadamente 455 km², equivalente a cerca de 60 % da área total do Planalto de Poços de Caldas. O Ribeirão das Antas é a calha principal da bacia hidrográfica, possuindo cerca de 62 km de extensão. Este curso d'água nasce na borda sul do Planalto, numa cota de 1640 m, em área relativamente próxima à Represa de Águas Claras. O Ribeirão das Antas corre sentido noroeste, onde, na cota 1150 metros, deixa o Planalto no salto conhecido como Cascata das Antas (ALBERTI, 2008).

4.2 BACIA HIDROGRAFICA DO ALTO RIBEIRÃO DAS ANTAS

A área desta pesquisa, denominada Bacia Hidrográfica do Alto Ribeirão das Antas (BHARA), abrange uma área de 152,4 km² localizada no sul do Planalto de Poços de Caldas, de coordenadas centrais latitude 21°53'32.54"S e longitude 46°34'39.82"O. A BHARA é uma sub-bacia da Bacia Hidrográfica do Ribeirão das Antas, abrangendo o equivale a 33,5 % da área total. A região apresenta uma rede de drenagem densa constituída por vários tributários, e com tendência de mediana a grande há ocorrência de enchentes. A BHARA apresenta altitude máxima de 1640 m, mínima de 1250 m e média de 1369 m.

Na Figura-7 estão apresentados detalhes sobre as estações meteorológicas e a fluviométrica, o Ribeirão das Antas, a hidrografia e o limite da BHRA, as sub-bacias da BHRA, os reservatórios de água, o limite da área da pesquisa a Bacia Hidrográfica do Alto Ribeirão das Antas, o limite da área da INB Caldas e a malha urbana do Planalto.

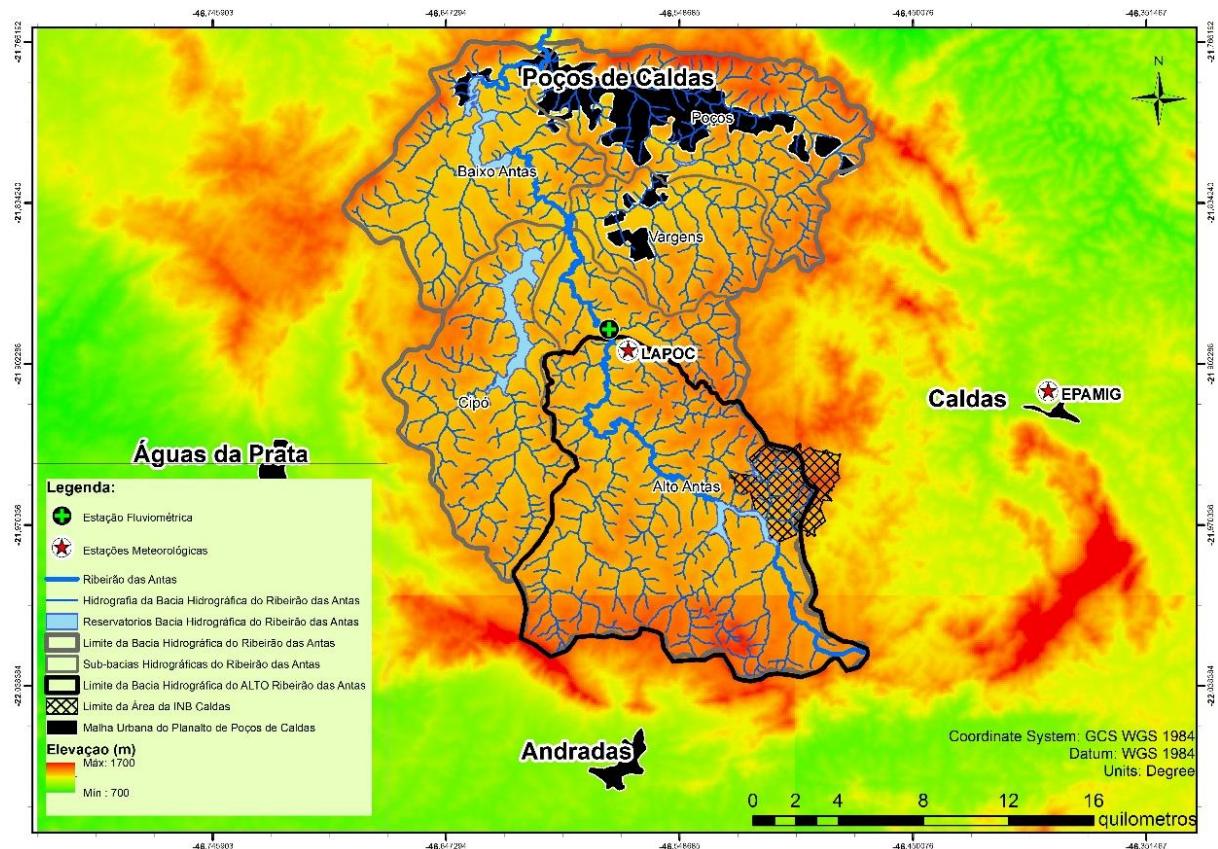


Figura 7 - Localização da Bacia Hidrográfica do Ribeirão das Antas, da Bacia Hidrográfica do Alto Ribeirão das Antas, dos reservatórios e das estações meteorológicas e fluviométrica.

Fonte: Do autor.

Na região ocorrem os climas dos subtipos Cwa e Cwb, segundo a classificação de Köppen. Em locais com altitude superior a 1100 m há a predominância do Cwb e em áreas baixas, o Cwa. O Cwb possui inverno seco e verão brando e chuvoso. No período chuvoso a temperatura média do mês mais quente não chega a 22°C, que em geral é janeiro, o mês apresenta as maiores precipitações, o índice pluviométrico anual entre 1300 a 1700 mm. O período seco compreende de maio a setembro e a temperatura média do mês mais frio apresenta-se em torno de 16,5°C, com baixa evapotranspiração, devido à queda da temperatura nesse período. Já o clima Cwa possui inverno seco e verão quente e chuvoso. No mês mais quente a temperatura média ultrapassa os 22°C e no mês mais frio a temperatura média é inferior a 18°C. A pluviometria anual varia entre 1100 e 1700 mm e o período seco está entre

abril e setembro, sendo julho o mês com maior estresse hídrico. O mês mais chuvoso varia entre janeiro e fevereiro (MCKNIGHT; DARREL, 2000).

O regime pluvial proporciona uma alta erosividade das chuvas, conforme (MELO NETO et al., 2017), que utilizando modelo geográfico e estatístico desenvolvido por (MELLO et al., 2013), estimaram para a sub-bacia do Gigante também pertencente à Bacia do Ribeirão das Antas, valores de erosividade acima de $8000 \text{ MJ.mm.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$.

Importante ressaltar que a BHARA detém um reservatório em sua área, denominado de Represa de Águas Claras, com área de $1,5 \text{ km}^2$ (150 hectares), sendo este o terceiro maior reservatório de água do Planalto de Poços de Caldas (ALBERTI, 2008; CIPRIANI, 2002).

4.3 CLIMATOLOGIA DO PLANALTO

A base de dados climatológicos levantada nesta pesquisa abrange uma série histórica de 1988 a 2016, de onde foram extraídas as informações sobre precipitação, umidade relativa do ar e temperatura.

4.3.1 Precipitação

Esta pesquisa teve ao dispor dois postos pluviométricos para interpretação dos dados de precipitação na região da BHARA. Um posto pluviométrico se encontra no LAPOC, no centro do Planalto, com dados de precipitação a partir do ano 2000. O outro posto pluviométrico está localizado na EPAMIG e conta com uma série histórica maior de precipitação, iniciada em 1988.

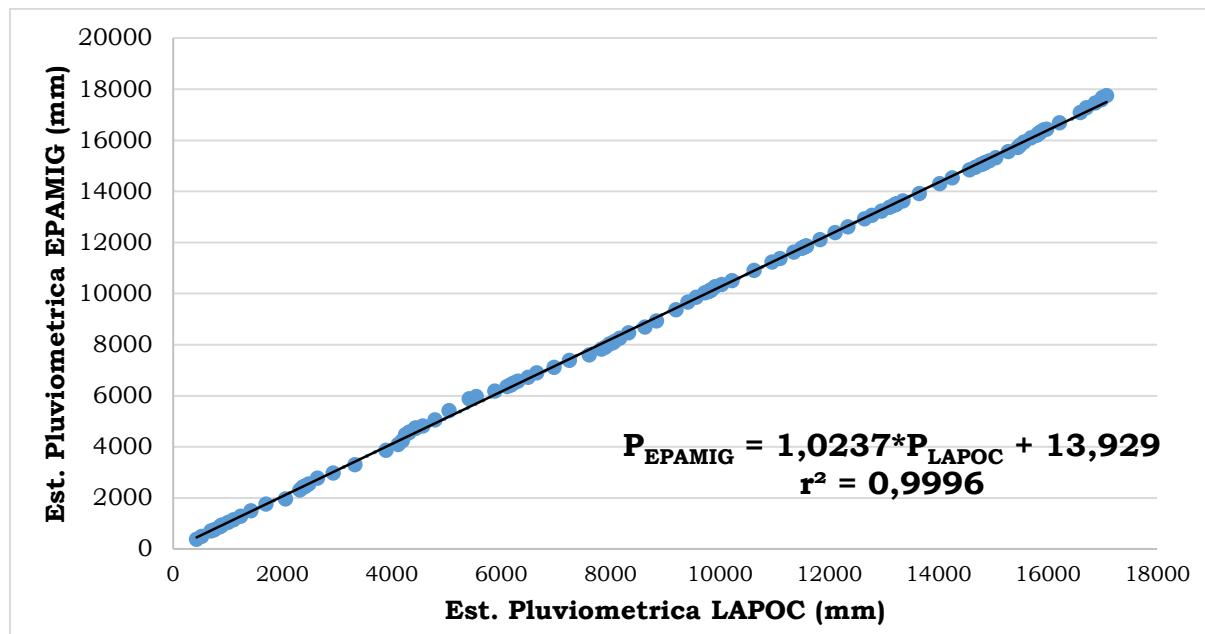
O posto pluviométrico da EPAMIG situa-se no município de Caldas/MG, na face Leste da estrutura externa circular do Planalto, com cota topográfica 1220 m. A distância de aproximada entre EPAMIG e LAPOC é de 20 km.

De modo a se obter informação pluviométrica representativa para a Bacia Hidrográfica do Alto Ribeirão das Antas avaliou-se o grau de homogeneidade dos dados das estações pluviométricas da EPAMIG e do

LAPOC. Para este fim, é prática comum utilizar-se do método de análise de Dupla Massa (desenvolvido pelo USGS), método este valido para séries mensais e anuais (USGS, 1966).

Como pode ser observado no Gráfico-1, há uma perfeita consistência entre os registros das duas estações pluviométricas, evidenciada pelo ajuste de uma única reta de tendência, e respaldada pelo valor do coeficiente de determinação ($r^2 = 0,9996$).

Gráfico 1 – Curva duplo acumulada entre as estações pluviométricas LAPOC (Poços de Caldas-MG) e EPAMIG (Caldas-MG).



Fonte: Do autor.

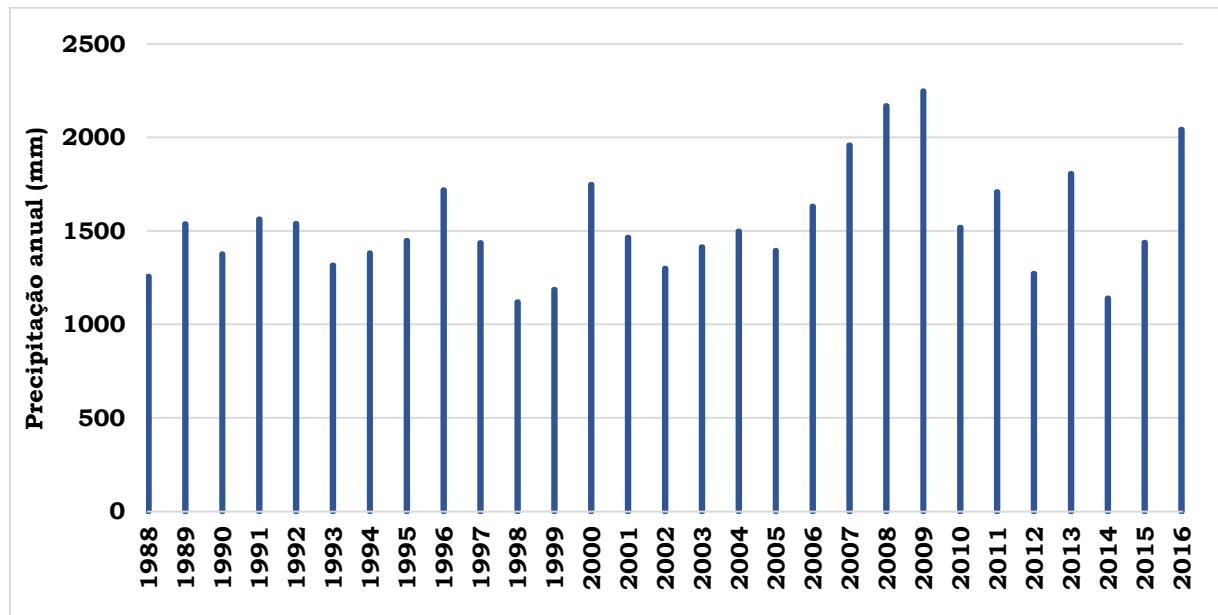
A série histórica da precipitação mensal e anual proveniente da EPAMIG inicia-se em janeiro de 1988 indo até dezembro de 2016, as falhas da série foram supridas por dados do posto pluviométrico no LAPOC.

Nos Gráficos 2, 3, 4, e 5, estão expostos os valores das precipitações anuais, mensais, mensais (máximas, mínimas e médias) e diárias, respectivamente.

O Gráfico-2 apresenta a série histórica de precipitações anual, a maior ocorrência registrada se deu no ano de 2009, na ocasião os eventos chuvosos ao longo do ano totalizaram aproximadamente 2247,9 mm. O ano de menor precipitação na série avaliada foi 1998, quando a precipitação total anual

registrada foi de 1119,7 mm aproximadamente. Salienta-se, a média aritmética do período, cujo o valor é igual a 1539,5 mm anuais e a mediana possuindo valor de 1456,5 mm.

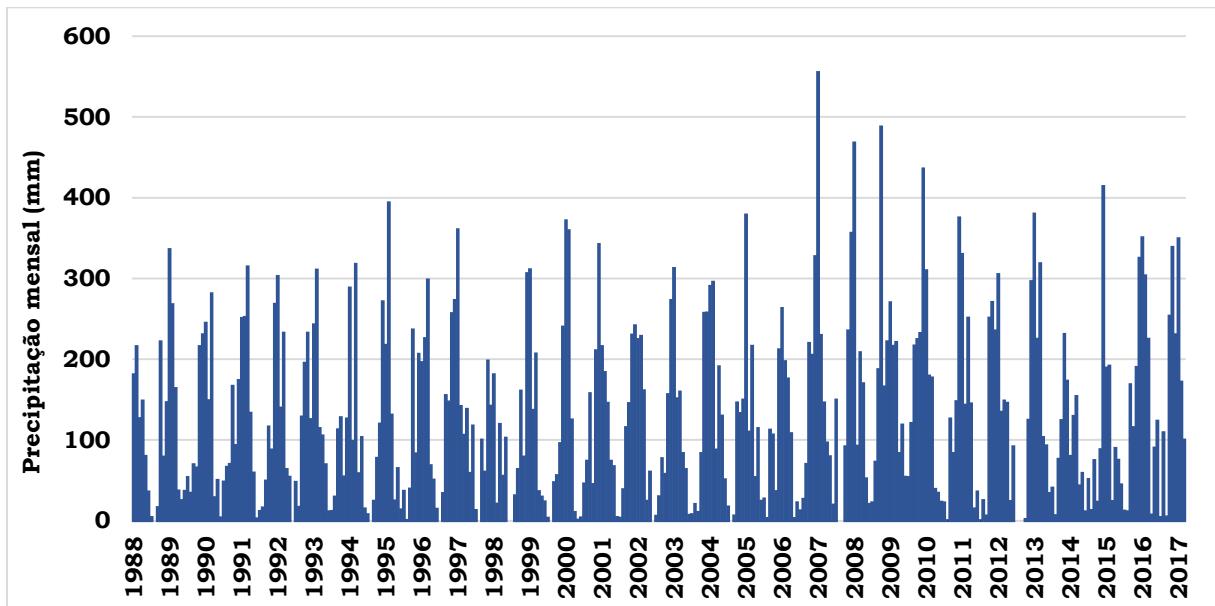
Gráfico 2 - Série Histórica de Precipitação Anual – Estação da EPAMIG-Caldas, Planalto de Poços de Caldas, de 1988 a 2016.



Fonte: Do autor.

O Gráfico-3 exibe a série histórica das precipitações mensais, ao analisá-la observa-se claramente um padrão hidrológico caracterizado por duas estações climáticas, uma chuvosa que se inicia em outubro e se estende até março, com os maiores índices pluviométricos registrados em dezembro a fevereiro. O mês de janeiro é o detentor da maior média de precipitação mensal, 298,9 mm. Os índices pluviométricos mais baixos, referentes à estação mais seca, compreendem os meses de junho a agosto, sendo que a menor média histórica corresponde ao mês de julho, com precipitações mensais de 25,5 mm no período estudado.

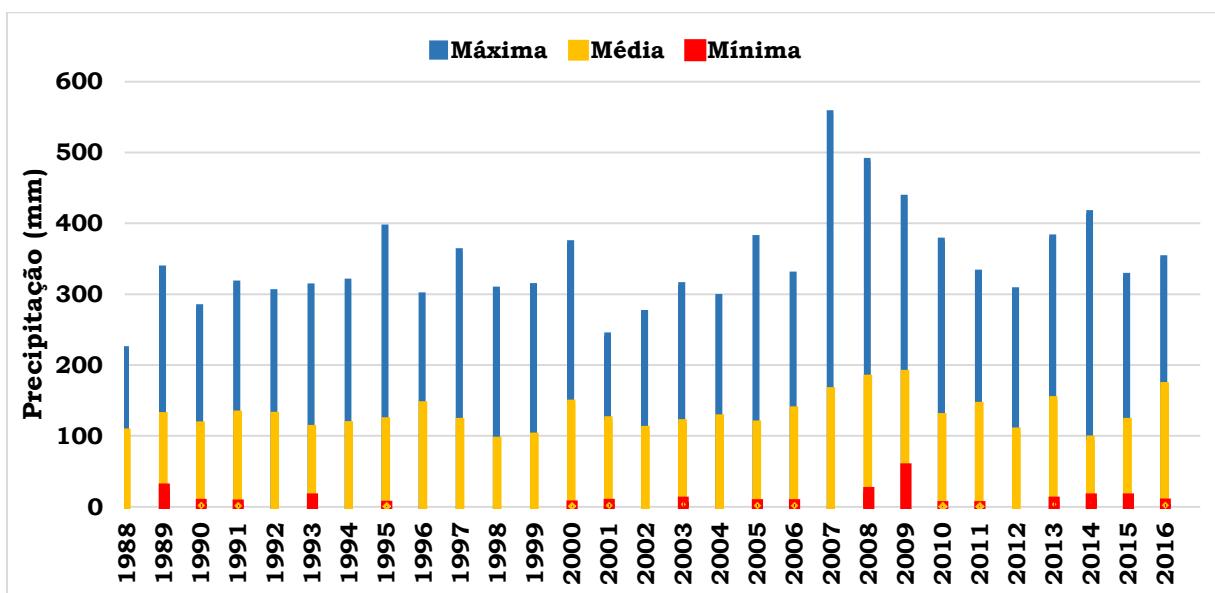
Gráfico 3 - Série Histórica de Precipitação Mensal Estação da EPAMIG-Caldas, Planalto de Poços de Caldas, de 1988 a 2016.



Fonte: Do autor.

No Gráfico-4 identificou-se o mês de maior precipitação, sendo este janeiro de 2007, na ocasião foram registrados 555,24 mm durante o mês. A média de precipitação mensal é igual a 128,96 mm e a mediana dos meses avaliados apresenta o valor de 106,10 mm.

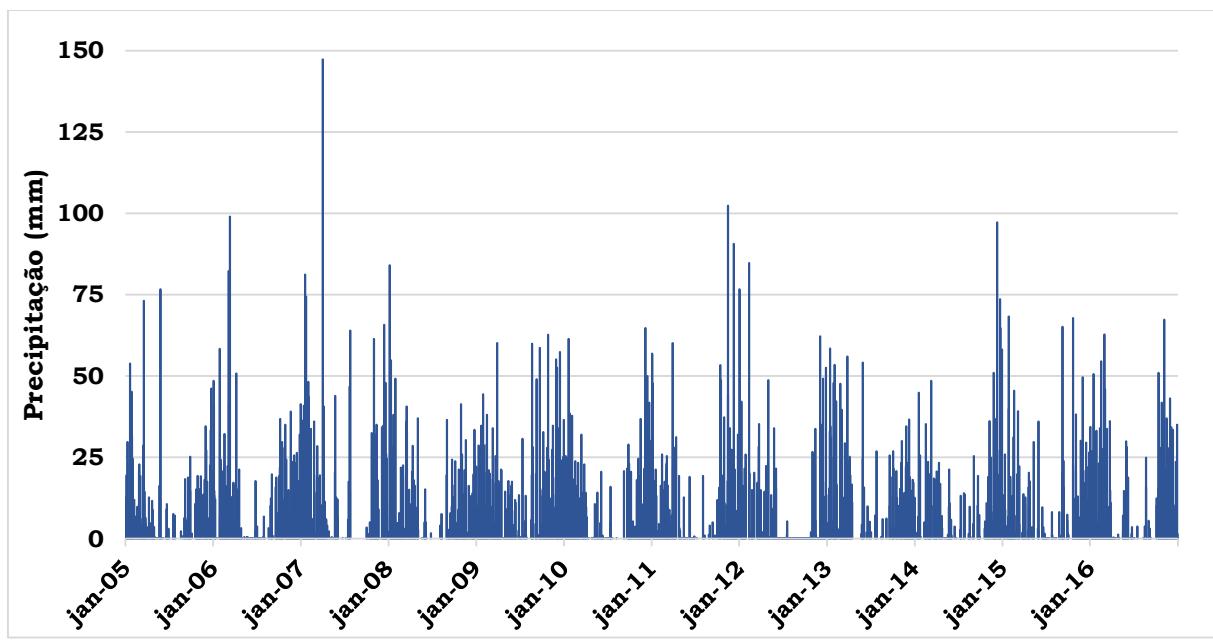
Gráfico 4 - Precipitação Mensal Máxima, Média e Mínima Estação da EPAMIG-Caldas, Planalto de Poços de Caldas, de 1988 a 2016.



Fonte: Do autor.

O Gráfico-5 traz a série histórica de precipitação diária disponível, que abrangeu de 01 de janeiro de 2005 a 31 de dezembro de 2016. Os dados exibidos na série são provenientes dos postos pluviométricos do LAPOC e da EPAMIG. A precipitação máxima diária registrada equivale a 147,32 mm, o evento ocorreu em 01 de abril de 2007. A média de precipitação diária equivale à 4,94 mm.

Gráfico 5 - Série Histórica da Precipitação Diária do Planalto, de 2005 a 2016.



Fonte: Do autor.

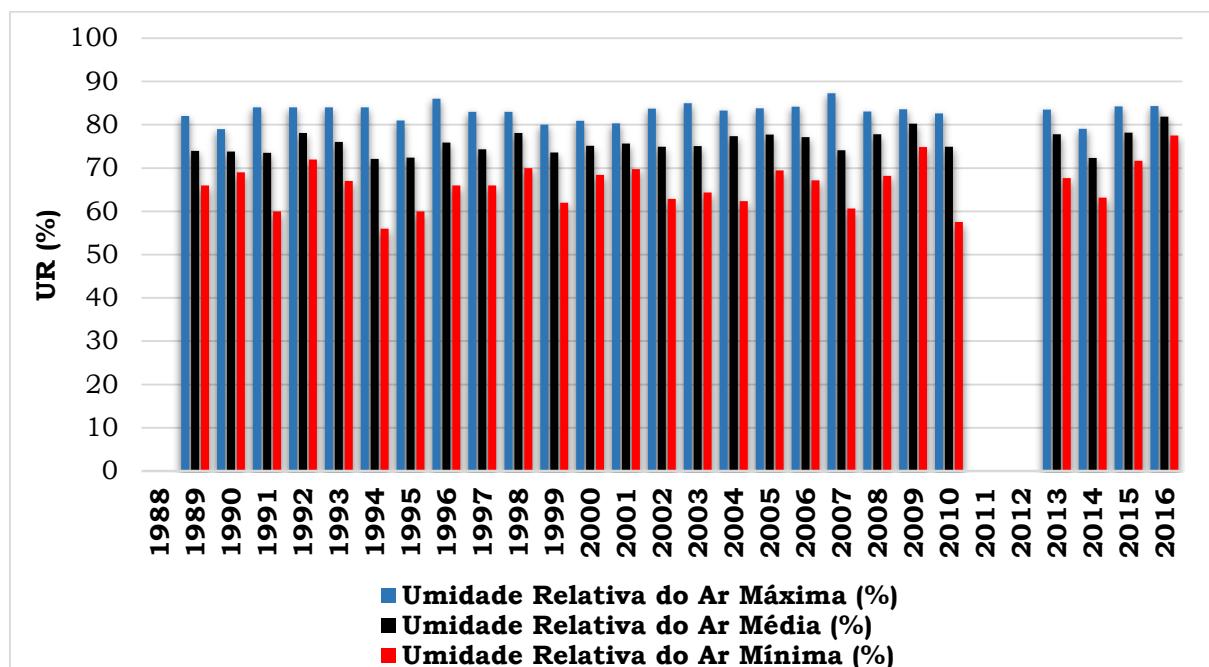
4.3.2 Umidade Relativa do Ar

A umidade relativa do ar é definida como a quantidade de vapor de água presente no ar atmosférico, em relação à quantidade máxima que poderia conter (saturação) a uma dada temperatura. A umidade relativa pode variar de 0 % (ausência de vapor de água no ar) a 100 % (quantidade máxima de vapor de água que o ar pode conter à uma dada temperatura, indicando que o ar está saturado), permitindo caracterizar o ar como seco ou úmido (PRESS et al., 2006).

O Gráfico-6 exibe a série histórica da umidade relativa do ar do Planalto de Poços de Caldas. Ao analisar a série histórica obtém-se um valor médio de

umidade relativa equivalente a 70 %. O resultado pode ser considerado elevado, no entanto, o resultado é comum em regiões de maior altitude em associação com altos índices pluviométricos, que são características do Planalto de Poços de Caldas.

Gráfico 6 - Série Histórica da Umidade Relativa do Ar no Planalto de Poços de Caldas, de 1989 a 2016. A estação foi atingida por um raio, portanto esteve em manutenção durante 2011 e 2012



Fonte: Do autor.

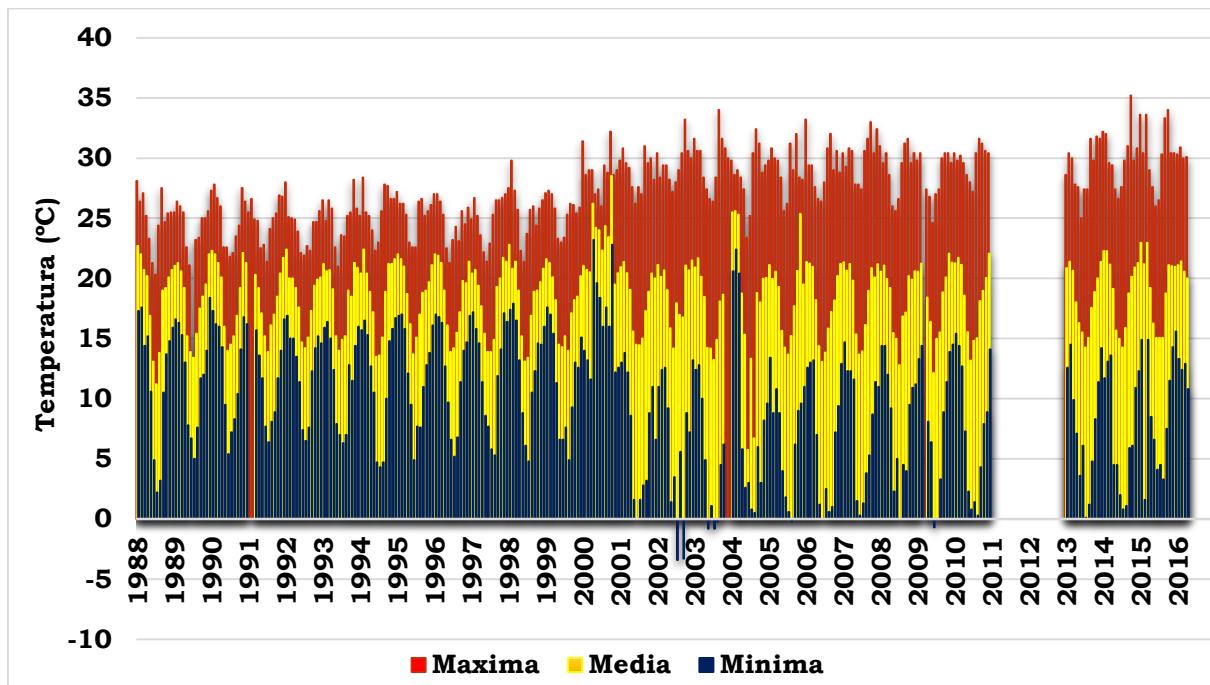
4.3.3 Temperatura

Na série histórica da temperatura mensal do Planalto é possível identificar um padrão de temperatura característico para duas estações climáticas. A estação com temperaturas elevadas e alto índice pluviométrico se inicia em outubro e se estende até março, quando a média das temperaturas máximas é igual a 27,3 °C. A maior temperatura mensal registrada foi de 35,2 °C, em outubro de 2014.

Durante os meses de maio a agosto quando prevalece o inverno, frio e seco, a média das temperaturas mínimas registradas é de 9,9 °C. A menor temperatura diária encontrada na série histórica do Planalto foi de -3,4 °C, em julho de 2002.

O Gráfico-7 apresenta a série histórica da temperatura média mensal, a série histórica de temperatura máxima mensal e a série histórica da temperatura mínima mensal de 1988 a 2016, no Planalto de Poços de Caldas. A estação meteorológica foi atingida por um raio, portanto esteve em manutenção durante 2011 e 2012.

Gráfico 7 - Série Histórica da Temperatura Mensal (Máxima, Média e Mínima) no Planalto de Poços de Caldas, de 1988 a 2016.



Fonte: Do autor.

4.5 INB CALDAS

O Brasil detém um território de extensão continental e de rica diversidade geológica, tais fatores que favorecem a existência de muitas jazidas minerais. Ademais, o país possui um dos maiores patrimônios minerais do mundo e está entre os principais exportadores de minérios (MONTEIRO, 2014).

No Brasil é conferida às Indústrias Nucleares do Brasil (INB) o monopólio estatal sobre a extração e beneficiamento do minério de urânio. A produção da INB é voltada a atender parte da demanda das usinas nucleares do país, Angra I e Angra II. Entre os anos de 1982 e 1995, parte da demanda

das usinas nucleares do país foi atendida extraíndo-se minério de urânio na INB Caldas.

A INB Caldas é uma unidade da INB situada no município de Caldas/MG, localizada no centro do Planalto de Poços de Caldas. Esta unidade foi o primeiro empreendimento de lavra e tratamento de minério de urânio do país (CIPRIANI, 2002).

A extração de urânio na INB Caldas ocorreu até o ano de 1995, produzindo 1030 ton de urânio em 11 anos de operação. Estima-se que $94,5 \times 10^6$ ton de rocha e solos foram removidas durante a operação da INB Caldas. De todo o material removido apenas 2 % foram enviados para o beneficiamento, sendo o restante (estimado em 89×10^6 ton) dispostos em pilhas de estéreis a céu aberto ou utilizados em construções auxiliares na instalação. As pilhas de estéreis INB Caldas, devido as suas localizações, podem influenciar nas duas bacias hidrográficas do Planalto de Poços de Caldas (CIPRIANI, 2002).

No início das atividades de instalação da INB Caldas em 1977, haviam poucos estudos sobre avaliação de impactos no Brasil, por conseguinte algumas medidas de proteção ambiental não foram abordadas corretamente. Posteriormente, surgiram na INB Caldas impactos ambientais negativos, como a lixiviação de radionuclídeos e de elementos pesados. Sendo as principais fontes dos problemas os materiais das pilhas de estéril, que em associação com a elevada precipitação e geologia da região do Planalto, ocasionam a Drenagem Ácida Mineira (DAM) (CIPRIANI, 2002).

4.5.1 Drenagem Ácida Mineira na INB Caldas

A DAM é um fenômeno que se inicia quando rochas contendo minerais sulfetados são extraídas da crosta terrestre pelas atividades de mineração, como por exemplo, no decapamento, no desmonte e na disposição de rochas. As rochas ao serem dispostas na superfície terrestre oxidam-se por reações com água e oxigênio, produzindo acidez com consequente dissolução de minerais e liberação de íons. As soluções ácidas geradas na DAM podem causar contaminação ambiental, uma vez que à medida que penetram nos

solos e rochas, solubilizam alguns elementos químicos presentes, podendo contaminar águas superficiais como rios, nascentes, córregos e/ou águas subterrâneas (MELLO et al., 2014).

Os minerais sulfetados responsáveis pela DAM, principalmente a pirita (FeS_2), estão relacionados principalmente à exploração de urânio, níquel, chumbo, zinco, cobre, ouro, prata, carvão-mineral, entre outros minerais. No entanto, a drenagem ácida não é um problema exclusivo das atividades de mineração e pode ocorrer em qualquer operação que resulte em grande movimentação de solos e rochas que contenham minerais sulfetados, como as construções de estradas, túneis, barragens e aeroportos.

Enquanto a erosão se refere à retirada e ao transporte de sedimentos sólidos, usualmente em suspensão no escoamento superficial durante as precipitações, Mello et al. (2014), a drenagem ácida de mina (DAM), é o movimento de solutos em águas ácidas, não necessariamente por escoamento superficial, tratando-se, portanto, de fenômenos bastante distintos.

A DAM na maioria das vezes caracteriza-se por baixos valores de pH (podem ser inferiores a 3,5), altas concentrações de sulfato (podem chegar a 2000 mg.L^{-1}) e cátions metálicos em concentrações superiores àquelas normalmente encontradas em ambientes naturais. Cátions metálicos liberados pelo intemperismo dos minerais em geral precipitam como hidróxidos, sulfetos, sulfatos ou carbonatos, dependendo do ambiente geoquímico, tornando-se relativamente imóveis sob condições normais de pH dos solos e das águas (entre 5 e 7). No entanto, sob condições de baixo pH esses cátions metálicos podem permanecer em solução e ser transportado por grandes distâncias, provocando efeitos danosos nos ecossistemas aquáticos (MELLO et al., 2014).

Na INB Caldas algumas pilhas de estéril apresentam problema de drenagem ácida das rochas. O tratamento da DAM na INB Caldas é realizado continuamente desde a identificação do problema, por processo de adição de cal para neutralização e subsequente precipitação dos contaminantes (elementos radioativos e metais pesados). O efluente tratado deixa a estação de tratamento da INB Caldas com o pH variando entre 10 e 12, e após passar por bacias de polimento chega a Represa de Águas Claras.

A Represa de Águas Claras possui área de 150 hectares e recebe este esfluente simultaneamente aos tributários córregos do Cercado, das Pitangueiras, das Antas, Cachoeirinha e Aterrado. A jusante da Represa de Águas Claras forma-se a calha principal do Ribeirão das Antas, que é o maior rio do Planalto de Poços de Caldas (CIPRIANI, 2002).

4.5.2 Limites Radioativos dos Pontos de Interface da INB Caldas

A INB Caldas possui rigoroso controle e monitoramento nos seus pontos de interface com o meio ambiente, o que restringe a liberação e a disseminação de elementos radioativos com concentrações acima dos limites estipulados.

Estes pontos de interface na INB Caldas são controlados pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), por meio de limites de liberação. No contexto desta pesquisa, o ponto de interface que interessa é denominado Ponto-14, onde se localiza o vertedouro da Represa de Águas Claras. Salienta-se que as amostragens da presente pesquisa não foram realizadas no Ponto-14 e sim a jusante do mesmo.

O Ofício nº 50 da CNEN, de 27 de janeiro de 1997, estabelece os limites de concentração de radionuclídeos admissíveis no Ponto-14, para a liberação de efluentes líquidos no vertedouro da Represa de Águas Claras. De acordo com o ofício é tolerável que a água tenha no máximo 0,1 Bq.L⁻¹ para chumbo-210 (²¹⁰Pb), rádio-226 (²²⁶Ra) e rádio-228 (²²⁸Ra), de 0,2 Bq.L⁻¹ para Urânio total (U) e de 0,3 Bq.L⁻¹ para Tório total (Th).

5 METODOLOGIA

5.1 AMOSTRAGEM

Por meio de um trabalho de campo iniciado em fevereiro de 2016 e finalizado em abril de 2017, realizou-se a quantificação direta e indireta do escoamento superficial e também dos hidrossedimentos suspensos e de leito carreados a jusante da Represa de Águas Claras, em dois pontos de monitoramento ao longo da calha do Ribeirão das Antas, denominados PONTO-1 (P-1) e PONTO-2 (P-2).

A Figura-8 apresenta os pontos de amostragem (P-1 e P-2), a estação fluviométrica no P-2, as estações meteorológicas no LAPOC e na EPAMIG, o Ribeirão das Antas, a hidrografia, os reservatórios de água e o limite da BHRA, o limite da área da pesquisa a BHARA, o limite da área da INB Caldas e a malha urbana do Planalto de Poços de Caldas.

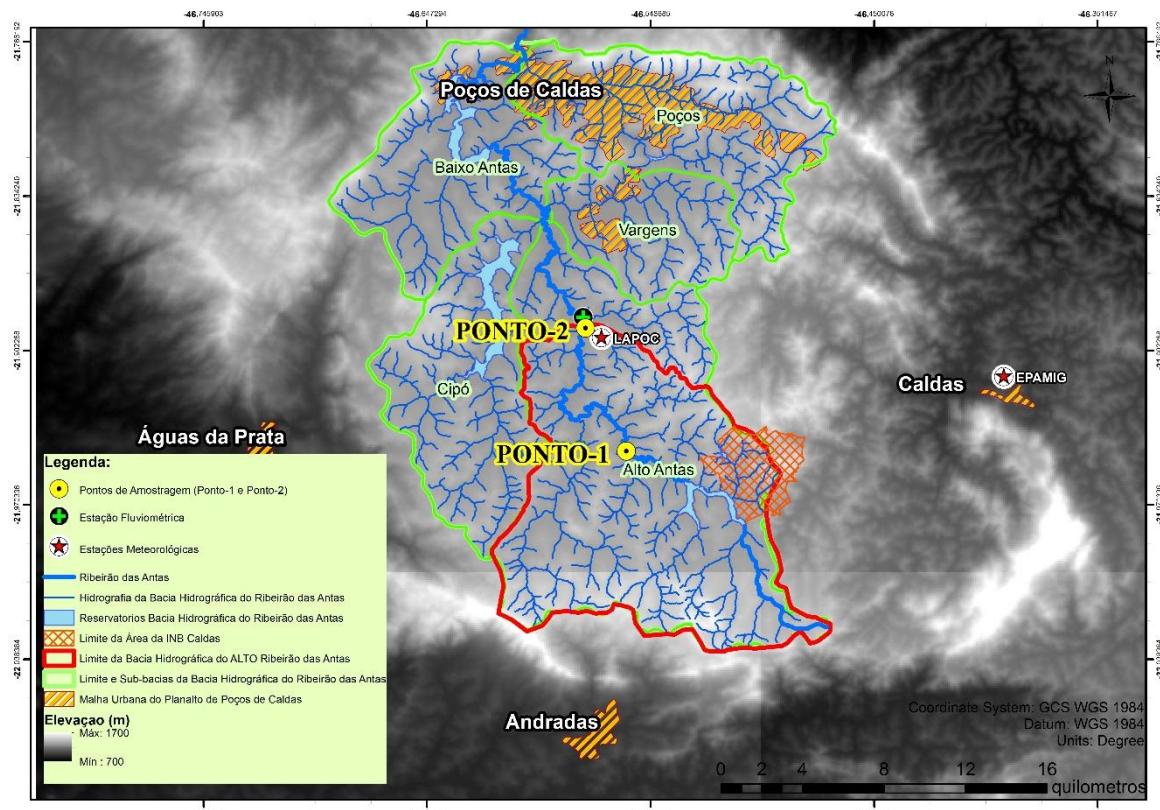


Figura 8 - Localização dos pontos de amostragem (Ponto-1 e Ponto-2).
Fonte: Do autor.

Devido à grande variação do deflúvio do Ribeirão das Antas, para aplicar corretamente a metodologia exigiu-se o uso dos equipamentos tradicionais do método ao longo de todo o período, e artefatos de auxiliares no período de deflúvio máximo.

Os equipamentos indispensáveis aplicados em todas as amostragens foram: um medidor de vazão FlowTracker®, marca SonTek, uma sonda multiparamétrica, marca Horiba, modelo U-59, um coletor de hidrossedimento suspenso, marca JCTM Comércio e Tecnologia LTDA, modelo DH-48, um coletor de hidrossedimento de fundo, da marca Euro Analytical LTDA, modelo BLH-84 do tipo Helleys-Smith (1971), uma régua linígrafa, um cronômetro, uma escada, cordas e outros utensílios de suporte.

O período de deflúvio elevado demandou o uso de estacas de madeira que serviram de estruturas de apoio, fixadas nas margens dos pontos de amostragens. Demandou também a utilização de um bote inflável, empregado quando era impraticável a amostragem a vau.

Simplificadamente, o desenvolvimento da amostragem hidrológica e de hidrossedimento em suspensão ocorria na seguinte ordem:

- 1.** Coletar 5 (cinco) litros de água no centro da calha do ribeirão, para as análises radiológicas.
- 2.** Medir o comprimento de lamina d'água superficial da seção de amostragem.
- 3.** Partir da margem direita do fluxo da água e dividir a seção em subseções de 1 (um) metro, até atingir a margem esquerda.
- 4.** Medir as profundidades em cada uma das subseções.
- 5.** Medir a velocidade do fluxo d'água, em cada uma das subseções.
- 6.** Calcular a velocidade de transito do DH-48, em cada subseção.
- 7.** Efetuar amostragem isocinética do hidrossedimento suspenso, auxiliada obrigatoriamente por um cronômetro para marcar a igualdade no tempo de descida e de subida do equipamento.
- 8.** Identificar e armazenar a amostra composta, obtida pelo DH-48, em garrafa ou garrafas de vidro.

As amostragens de hidrossedimento de leito ocorreram concomitantemente a de hidrossedimento suspenso. A quantificação consiste em ancorar o BLH-84 no fundo da calha Ribeirão das Antas, por tempo igual em todas as verticais onde foram coletados os hidrossedimentos suspensos. No entanto, em função de fatores que serão explicados no item 6.5, em algumas amostragens não se obteve material suficiente para quantificação e análise.

A amostragem abrangeu um ano e dois meses de quantificação direta na calha do Ribeirão das Antas, nos pontos de amostragem P-1 e P-2. É importante destacar o número de atividades desenvolvidas nos pontos de monitoramento.

No Ponto-1 foram realizadas 22 (vinte e duas) visitas à campo, distribuídas entre determinação do local, limpeza, instalação de suporte para vazão extremas e amostragens. O P-1 situa-se à 4,2 km a jusante da Represa de Águas Claras.

No Ponto-2 foram realizadas 37 (trinta e sete) visitas à campo, para a determinação do local, instalação da estação fluviométrica, instalação de suporte dos sensores da estação, instalação de suporte para vazão extremas, limpeza e amostragens. O ponto de amostragem P-2 no ribeirão situa-se à 18,1 km a jusante da Represa de Águas Claras.

É imprescindível ressaltar que no P-2 está instalada uma estação de monitoramento fluviométrico, da marca SOLAR, modelo ML2000. A estação foi implantada em junho de 2015, desde então realiza o aferimento do nível de coluna d'água (cm) e da turbidez (NTU) do Ribeirão das Antas a cada 30 (trinta) minutos.

A pesquisa inclui uma estação meteorológica, da marca CAMPBELL, que afere em intervalos de 30 minutos a precipitação, a pressão atmosférica, a umidade relativa do ar, a evaporação, a temperatura, a direção e a velocidade dos ventos. A estação encontra-se à 0,67 km de distância do P-2 e na área interna do LAPOC (Figura-8).

A quantificação hidrométrica e hidrossedimentométrica na BHARA promovido nas seções P-1 e P-2, totalizaram 24 (vinte e quatro) medições diretas de vazão e amostragens de sólidos suspensos e de leito da calha do

Ribeirão das Antas. A Tabela-1 apresenta detalhadamente as datas, os horários, os locais de amostragem, os números de profundidade verticais medidas na seção e o número de medidas das velocidades na calha do Ribeirão das Antas para cálculo da vazão.

Tabela 1 – Síntese do monitoramento direto das vazões e da concentração de sólidos nas seções P-1 e P-2 no Ribeirão das Antas.

Nº	Data	Hora	Local	Nº Profundidades Medidas	Nº Velocidades Medidas
1	23-fev-16	8:50	P-2	1	1
2	1-mar-16	9:15	P-2	1	1
3	8-mar-16	9:25	P-2	11	7
4	15-mar-16	9:42	P-1	9	9
5	29-abr-16	13:45	P-1	9	9
6	29-abr-16	9:14	P-2	10	10
7	19-mai-16	9:34	P-2	10	10
8	19-mai-16	14:40	P-1	9	9
9	28-jun-16	9:06	P-2	10	10
10	28-jun-16	13:37	P-1	9	9
11	12-jul-16	9:21	P-2	10	10
12	12-jul-16	14:52	P-1	8	8
13	9-ago-16	13:40	P-1	9	9
14	9-ago-16	9:32	P-2	10	10
15	9-set-16	9:05	P-2	10	10
16	9-set-16	13:30	P-1	9	9
17	14-out-16	14:12	P-1	9	9
18	14-out-16	9:45	P-2	10	10
19	27-dez-16	9:40	P-2	11	11
20	28-dez-16	9:35	P-1	9	9
21	19-jan-17	9:20	P-2	11	11
22	24-fev-17	9:31	P-2	11	11
23	26-abr-17	9:45	P-2	10	10
24	27-abr-17	9:15	P-1	9	9

Fonte: Do autor.

Nas amostras de água de cinco litros primeiro realizava-se a acidificação com ácido nítrico e posteriormente executava-se a filtração à vácuo, pelo método de filtração da Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 1998). Toda filtração foi executada no Setor Geoambiental

do LAPOC, utilizando filtros de 47 mm de diâmetro e 0,45 µm de porosidade. Para a quantificação dos elementos urânio (U) e tório (Th), as amostras de água filtrada foram identificadas e enviadas ao Setor de Química Analítica do LAPOC. Enquanto que para a quantificação dos elementos radioativos chumbo-210 (^{210}Pb), rádio-226 (^{226}Ra) e rádio-228 (^{228}Ra) as amostras foram identificadas e enviadas ao Setor de Radiometria do LAPOC.

As amostras provenientes do equipamento DH-48, foram acidificação com ácido nítrico e posteriormente filtradas à vácuo, no laboratório do Setor Geoambiental. A concentração de hidrossedimentos em suspensão ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) foi determinada pelo método de filtração à vácuo da Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 1998). Foram utilizados filtros de 47 mm de diâmetro e 0,45 µm de porosidade. Após a filtragens os hidrossedimentos suspensos retidos nos filtros foram colocados na estufa com sílica para remoção total da umidade. O aferimento da massa se dava por meio de balança analítica com precisão de décimos de miligrama ($\pm 0,0005$), no Setor de Química Analítica do LAPOC.

Os hidrossedimentos suspensos após o processo de remoção de umidade e de aferimento de massa, foram enviados para os Setores de Química Analítica do LAPOC, onde realizou-se a quantificação dos elementos urânio (U) e tório (Th). Enquanto que para a quantificação dos elementos chumbo-210 (^{210}Pb), rádio-226 (^{226}Ra) e rádio-228 (^{228}Ra) nos hidrossedimentos suspensos foram executadas no Setor de Radiometria.

Os hidrossedimentos de leito coletados com equipamento BLH-84, passaram por processos de remoção de umidade e de aferimento de massa no Setor Geoambiental do LAPOC. As amostras foram identificadas e enviadas para o Setor de Química Analítica do LAPOC, onde realizou-se a quantificação dos elementos urânio (U) e tório (Th). A quantificação dos elementos radioativos chumbo-210 (^{210}Pb), rádio-226 (^{226}Ra) e rádio (^{228}Ra) nos hidrossedimentos de leito foram executadas no Setor de Radiometria do LAPOC.

Desta forma, foram encaminhas para análise nos Setores de Química Analítica, de Radiometria e de Radônio do LAPOC ao longo de toda a pesquisa as seguintes quantidades:

- 20 amostras de água filtrada para análise dos elementos ^{210}Pb , ^{226}Ra , ^{228}Ra , Th e U.
- 20 amostras de hidrossedimento suspenso para análise dos elementos ^{210}Pb , ^{226}Ra , ^{228}Ra , Th e U.
- 13 amostras de hidrossedimento de leito para análise dos elementos ^{210}Pb , ^{226}Ra , ^{228}Ra , Th e U.

5.2 HIDROMETRIA

A Figura-9 exemplifica a metodologia de medição de descarga líquida aplicada na pesquisa, denominada “Equação de Seção-Meio”, é a mais comumente usada atualmente e está descrita em padrões ISO 748 (1997). Nesta metodologia divide-se a seção transversal do curso d’água em iguais subseções, espaçadas em intervalo de 1 (um) metro, sendo comum nesta pesquisa a divisão em 9, 10 ou mais subseções. Em cada uma destas subseções são medidas as profundidades e as velocidades do fluxo de água na subseção. (SONTEK, 2007).

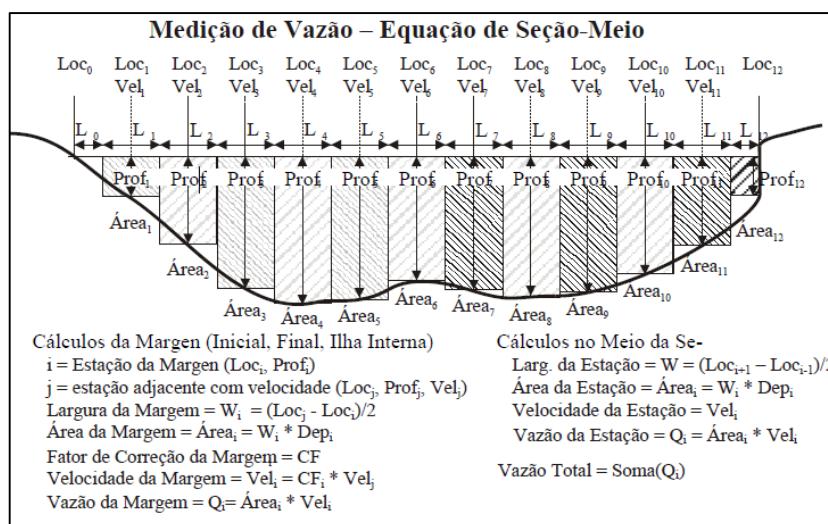


Figura 9 - Método determinação de vazão, “Equação Seção-Meio”.
Fonte: SONTEK, 2007

Para determinação da seção transversal utiliza-se uma fita métrica inicialmente para medir a seção total (distância margem a margem) no ponto de amostragem. Após a divisão da seção em subseções espaçadas a cada

1 (um) metro, realiza-se a medição da profundidade em cada uma das subseções, utilizando uma régua linígrafa com 4 (quatro) metros de extensão, sendo seu formato retangular e constituída totalmente por alumínio.

Assim, tendo conhecimento do valor referente a parcela de lamina d'água da subseção e a profundidade da subseção, é possível definir a área da subseção em metros quadrados (m^2), Equação-1.

$$A_{\text{subseção N}} = A_s * P \quad (1)$$

Onde:

$A_{\text{subseção N}}$ = área da subseção N (m^2);

A_s = parcela de lamina d'água da subseção (m);

P = profundidade da subseção (m).

A obtenção da área transversal total do ponto amostrado decorre do somatório das áreas das subseções que o compõe, Equação-2.

$$A_{\text{TOTAL}} = (A_{\text{subseção 1}} + A_{\text{subseção 2}} + \dots + A_{\text{subseção N}}) \quad (2)$$

Em que:

A_{TOTAL} = área transversal total do ponto (m^2);

$A_{\text{subseção N}}$ = área da subseção N (m^2).

5.2.1 Determinação da Descarga Líquida

Para obter a descarga líquida total na seção de monitoramento é necessário antes saber a velocidade do fluxo em cada uma das subseções que compõem o ponto. As velocidades aferidas em cada uma das subseções foram determinadas utilizando o equipamento manual “FlowTracker”, instrumento com elevado grau de sensibilidade, para o seu uso seguro, deve-se seguir todas as instruções contidas no manual sobre as metodologias, os usos e calibrações disponibilizadas pela SonTek (2007).

A Figura-10, apresenta o FlowTracker, o equipamento utiliza tecnologia de velocímetro acústico para medir automaticamente a vazão.

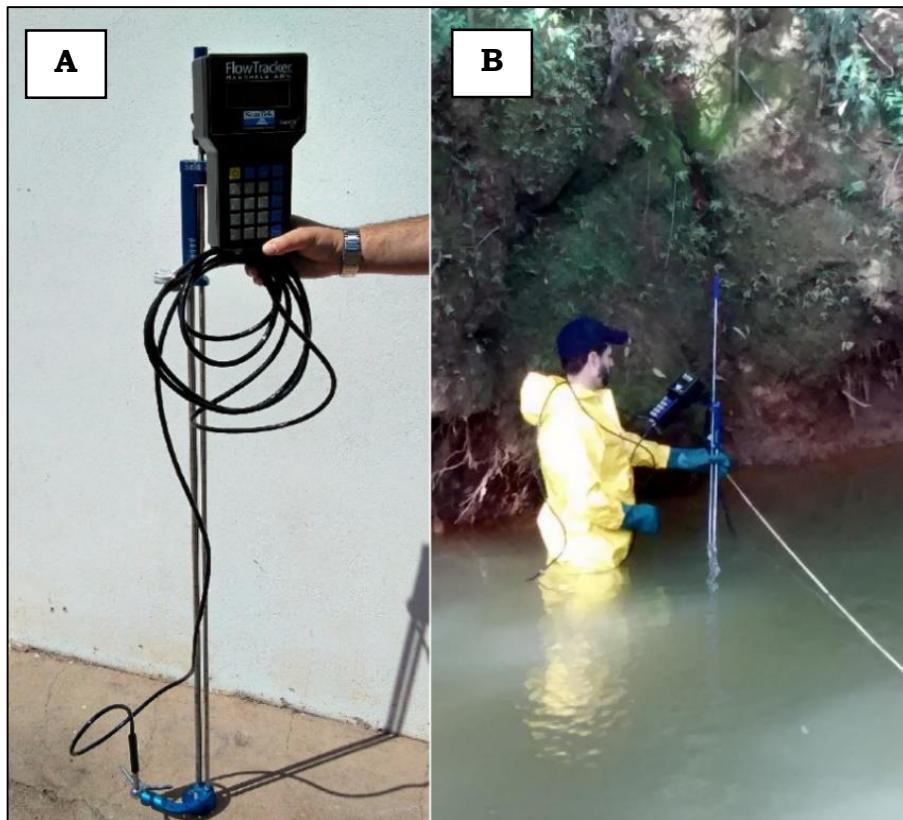


Figura 10 – Equipamento “FlowTracker”.

A) Apresentação do medidor vazão FlowTracker.

B) Amostragem utilizando o equipamento FlowTracker.

Fonte: Do autor.

O uso do FlowTracker principia com a inserção dos dados iniciais sobre o local da medição e de configurações do equipamento, como o tempo de coleta, o modo de coleta, o erro de velocidade permitido, o erro de distância permitida, entre outros. O hidrometrista define o tempo de amostragem que será aplicado em todas as subseções, o FlowTracker realiza uma medida de velocidade por segundo, e após o tempo estipulado na subseção o valor médio da velocidade será exposto no display, cabendo ao hidrometrista salvar os dados ou pedir nova leitura de velocidade. Em todas as subseções repete-se o aferimento da velocidade, ao final do processo de medição (todas as subseções, margem a margem) o hidrometrista deve salvar os dados registrados.

Assim sendo, após determinar as velocidades com o equipamento aplica-se a Equação-3 para obtenção da vazão da subseção:

$$Q_{\text{subseção N}} = A_{\text{subseção N}} * V_{\text{subseção N}} \quad (3)$$

Em que:

$Q_{\text{subseção N}}$ = vazão da subseção curso d'água ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$);

$A_{\text{subseção N}}$ = área das subseções do curso d'água (m^2);

$V_{\text{subseção N}}$ = Velocidade do fluxo d'água na subseção (m.s^{-1}).

Por fim, obtém-se o valor da vazão total do ponto amostrado no curso d'água, por meio da somatória das vazões em cada uma das subseções, determinado por meio da Equação-4.

$$Q_{\text{TOTAL}} = (Q_{\text{subseção 1}} + Q_{\text{subseção 2}} + \dots + Q_{\text{subseção N}}) \quad (4)$$

Onde:

Q_{TOTAL} = vazão total do ponto amostrado ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$);

$Q_{\text{subseção N}}$ = vazão da subseção N ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$).

5.2.2 Caracterização do Regime de Escoamento Superficial

Uma base de dados meteorológicos, sobretudo precipitação, e de escoamento superficial, registrados em um mesmo intervalo de tempo, fornecerá informações relevantes para a caracterização do regime de escoamento superficial da bacia.

As vazões (Q) medidas ao longo do período de monitoramento, associadas ao nível de água (NA) no momento de medição permitirá gerar uma curva ($Q = f(NA)$), denominada curva chave para a seção de monitoramento do tipo $Q = c * NA^b$.

Com os dados de monitoramento de nível d'água tem-se o linograma, o qual, associado à equação da curva chave, permitiu obter os dados de vazão

com o mesmo intervalo dos registros de nível e, portanto, o fluviograma para o período de estudo.

Com os dados de estimados para a vazão calcularam-se os valores característicos, como máximo, médio e mínimo, para as várias escalas de tempo (diária, mensal, anual e no período de estudo). Com os dados médios estimaram-se os deflúvios em volume (D_{volume}) por meio da Equação-5.

$$D_{volume} = Q_{médio (\Delta T)} * \Delta T \quad (5)$$

Sendo:

D_{volume} = deflúvio ou volume escoado no intervalo de tempo ΔT (m^3);

$Q_{médio (\Delta T)}$ = vazão média no intervalo de tempo ΔT ($m^3.s^{-1}$);

ΔT = intervalo de tempo de referência (s).

Obtém-se o deflúvio em lâmina aplicando a Equação-6:

$$D_{Tlâmina} = \left(\frac{\frac{D_{Tvolume} (\Delta T)}{A_{drenagem}}}{1000} \right) \quad (6)$$

Em que:

$D_{Tlâmina}$ = deflúvio em lâmina (mm);

$D_{Tvolume} (\Delta T)$ = deflúvio ou volume escoado no intervalo de tempo ΔT (m^3);

$A_{drenagem}$ = área de drenagem na seção de monitoramento (km^2).

Com os dados de vazão para a escala diária de tempo, foram calculadas as frequências de excedência o que permitiu traçar a curva de permanência das vazões.

O rendimento específico (RE) foi obtido através da relação entre a vazão característica (máxima, média ou mínima) de um dado intervalo de tempo, e a área de drenagem até a seção de monitoramento, exemplificado na Equação - 7.

$$RE = \frac{Q}{A_{drenagem}} \quad (7)$$

Na Equação-7:

RE = rendimento específico ($L.(s.Km^2)^{-1}$);

Q = vazão (máxima, média ou mínima) no intervalo de tempo ($L.s^{-1}$);

$A_{drenagem}$ = área de drenagem na seção de monitoramento (km^2).

A análise do escoamento superficial foi oportunizada por meio do coeficiente de escoamento superficial, que avalia a capacidade da bacia em transformar precipitação em escoamento superficial, utilizando a Equação-8.

$$C = \frac{D_{Tlâmina}}{P_{Lâmina}} \quad (8)$$

Onde:

C = coeficiente de escoamento superficial;

$D_{Tlâmina}$ = deflúvio em lâmina (mm), que também pode ser considerado como precipitação efetiva (P_{efet});

$P_{Lâmina}$ = lâmina total precipitada (mm).

A análise do fluviograma relativo a um ano hidrológico, permite, identificar de forma clara os dois períodos climáticos, o úmido que na região ocorre entre outubro e março, e o seco que ocorre entre abril e setembro. A análise do fluviograma também facilita estimar a participação do escoamento superficial direto e o escoamento de base, neste caso trabalhou-se na escala mensal de tempo.

No período seco, a separação da vazão em suas duas componentes, seguiu metodologia proposta em Mello & Silva (2013) representada pela Equação-9.

$$Q_{base} = a * e^{-b*T} \quad (9)$$

Na Equação-9:

Q_{base} = vazão de base, ou vazão decorrente da drenagem do lençol superficial ($m^3.s^{-1}$);

a = representa a vazão de base no $T=0$;

b = coeficiente de decaimento da vazão com o tempo;

T = o tempo acumulado (mês).

Após a separação dos componentes do escoamento superficial, promoveu-se a estimativa dos deflúvios correspondente ao escoamento superficial direto ($D_{sup.direto}$) e ao escoamento base (D_{base}) com base na Equação-5.

Um indicador de grau de regularização do regime de escoamento é a participação do escoamento base no escoamento total. O grau de regularização é obtido pela razão do escoamento de base pelo escoamento total, quanto maior for a relação, maior é a participação do deflúvio base e melhor o grau de regularização.

Em termos de sustentabilidade do regime de escoamento, o ideal é que haja no mínimo, a restituição ao aquífero da lâmina drenada do mesmo pela rede de drenagem da bacia. Estima-se a taxa de restituição de água ao aquífero (TRAP) dividindo a lâmina drenada, representada por D_{base} em (mm), pela precipitação, representada por $P_{lâmina}$ em (mm). Assim determinou-se a TRAP aplicando a Equação-10.

$$TRAP = \frac{D_{base}}{P_{lâmina}} \quad (10)$$

Promoveu-se o balanço hidrológico simplificado, considerando apenas as componentes Precipitação (P) em (mm), Deflúvio (D) em (mm) e Evapotranspiração (Et) em (mm). Supôs-se como nula a variação de armazenamento no período analisado e o balanço foi realizado por meio da Equação-11.

$$P = D + Et \quad (11)$$

5.3 SEDIMENTOMETRIA

5.3.1 Determinação da Descarga Sólida Suspensa

As amostragens de hidrossedimento em suspensão foram realizadas utilizando o amostrador “DH-48”, desenvolvido pelo United States Geological Survey (USGS). Equipamento projetado para que a amostragem seja isocinética, o que significa que a água e o sedimento suspenso entram no bico amostrador na mesma velocidade que o fluxo, obtendo uma amostra representativa do transporte de partículas (WILDE, 2002).

A Figura-11 apresenta o DH-48, que possui forma hidrodinâmica com haste para operação a vau, bote ou barco. Em profundidades menores que 3 m utiliza-se bocal de admissão de 1/4. No entanto, o equipamento pode ser adaptado para uso em amostragem em maiores profundidades, há recomendação de troca dos bocais, substituindo-os por de menores diâmetros como de 3/16" e de 1/8". Este procedimento foi observado neste trabalho para adequação às características do escoamento do Ribeirão das Antas na área da BHARA (CARVALHO, 2008; USGS, 1966).

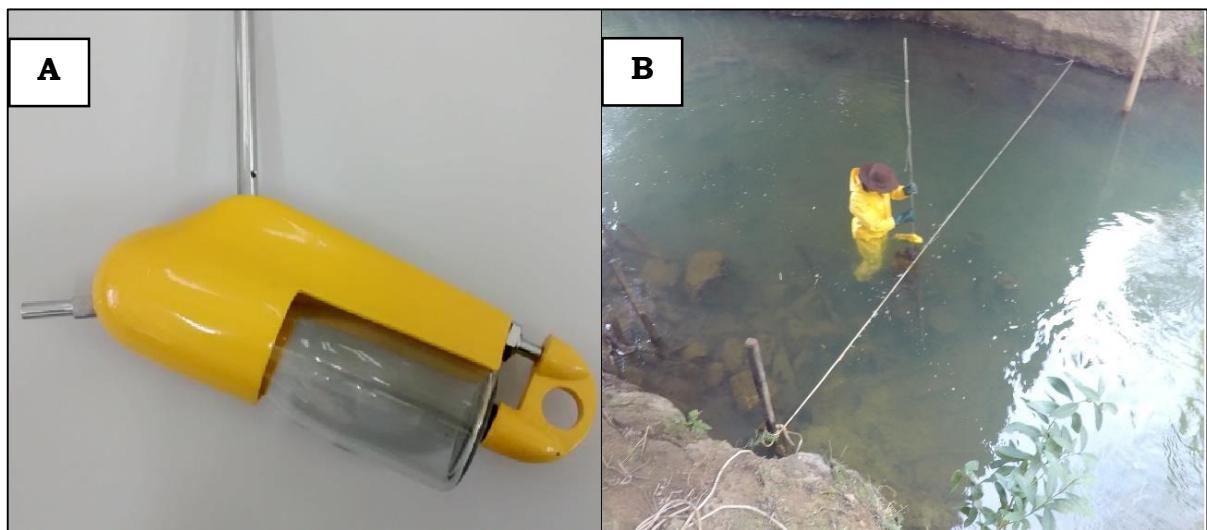


Figura 11 – Amostrador de Sedimento Suspenso “DH-48”.

A) Equipamento DH-48.

B) Amostragem utilizando DH-48.

Fonte: Do autor.

A metodologia utilizada na determinação do hidrossedimentos suspensos na calha do ribeirão, denomina-se Igual Incremento de Largura (IIL). A execução da metodologia produz em cada subseção do ponto amostrado uma subamostra isocinética, o tempo de amostragem é cronometrado e divide-se entre a subida e a descida do equipamento, sendo o tempo em função da velocidade do fluxo na subseção.

Em cada subseção, são aferidos a profundidade e a velocidade de fluxo d'água. Em seguida procura-se, entre as subseções, a vertical de maior produto velocidade por profundidade. Então realiza-se o cálculo do tempo mínimo de amostragem (CARVALHO, 2008).

A velocidade de trânsito do DH-48 é a velocidade à qual o equipamento é submerso no centro da subseção vertical. O posicionamento da haste sempre é perpendicular a lâmina do escoamento, a amostragem ocorre com velocidade constante de descida e subida por toda a vertical. A Equação-12, apresenta a velocidade de trânsito segundo o ajuste proposto por (EDWARDS; GLYSSON, 1999).

$$V_t = V_i * K \quad (12)$$

Onde:

V_t = velocidade de transito ($m.s^{-1}$);

V_i = velocidade média da corrente na vertical amostrada ($m.s^{-1}$);

K = constante de proporcionalidade variável em função do bico do amostrador utilizado.

O tempo de amostragem em cada subseção é proporcional a velocidade de trânsito, desta forma foi possível determinar o tempo dos percursos de descida e subida do DH-48, pela Equação-13 exemplificada a seguir (CARVALHO et al., 2000).

$$t = \frac{2*P}{V_t} \quad (13)$$

Na Equação-13, tem-se:

t = tempo mínimo para realização da amostragem (s);

P = profundidade da vertical de amostragem (m);

V_t = velocidade de trânsito ($m.s^{-1}$).

Os volumes amostrados representativos das subseções formam uma amostra composta da seção transversal completa, que foi armazenada em garrafa de vidro e identificada no momento de cada amostragem. Em laboratório, os volumes das amostras compostas foram medidos utilizando provetas, em seguida acidificados com ácido nítrico para a conservação os elementos metálicos e radioativos em solução, sendo adicionada um mililitro para cada litro amostrado. As amostras compostas apresentaram volumes que variaram entre 500 mL a 1900 mL ao longo da pesquisa.

A partição entre a água e o hidrossedimento suspenso foi realizada por filtração a vácuo, empregando filtros de acetocelulose (porosidade de 0,45 μm). Para as determinações das massas iniciais e finais dos filtros utilizou-se sempre a mesma balança analítica, com precisão de $\pm 0,0005$ g.

A Equação-14 exemplifica a determinação da concentração de hidrossedimento suspenso.

$$C = \frac{P}{Vol} \quad (14)$$

Onde:

C = concentração de hidrossedimento suspenso (mg.L^{-1});

P = massa de hidrossedimento suspenso (mg);

Vol = volume da amostra (L).

Porém, o mais relevante é a estimativa da taxa de transporte de sedimentos em suspensão, ou seja, a massa de sedimentos transportados num intervalo de tempo. A massa de sedimentos transportados em suspensão (MSST) em cada intervalo de 30 minutos foi obtida pela equação seguinte, Equação-15.

$$MSST_i = VE_i * CSS_i = \frac{Q_i * 1800 * CSS_i}{1000} \quad (15)$$

Sendo:

$MSST_i$ = massa de sólidos suspensos transportados (kg);

VE_i = volume de água escoado (m^3);

CSS_i = concentração de sólidos em suspensão, associados a um intervalo de tempo i de 30 minutos, ($mg.L^{-1}$);

Q_i = vazão ($m^3.s^{-1}$).

A massa de sólidos suspensos transportada (MSST) num determinado período de tempo monitorado, pode ser estimada através do somatório, exemplificada na Equação-16.

$$MSST = \sum_{i=1}^n (VE_i * CSS_i) \quad (16)$$

Em que:

$MSST$ = massa de sólidos suspensos transportados (kg);

VE = o volume escoado no intervalo de tempo i (m^3);

CSS = concentração média de sólidos em suspensão no intervalo de tempo i ($mg.L^{-1}$);

n = número de intervalos de tempo de 30 minutos no determinado período de monitoramento.

A MSST diz respeito ao sedimento em suspensão transportado na bacia hidrográfica e contabilizado na seção de controle da bacia, e PSEH corresponde à perda média de solo na bacia hidrográfica. Este último valor pode ser obtido com base no mapa de perda de solo anual.

Assim sendo, a taxa de transporte de sedimento suspenso (TTSS) em porcentagem, por ser estimada por meio de Equação-17.

$$TTSS = 100 * \frac{MSST}{PSEH} \quad (17)$$

Na Equação-17:

TTSS = taxa de transporte de sedimento suspenso (%);

MSST = massa de sólido suspenso transportado (ton.(ha.ano)⁻¹);

PSEH = perda média de solo na bacia hidrográfica (ton.(ha.ano)⁻¹).

5.3.2 Determinação da Descarga Sólida de Leito

As amostras de hidrossedimento de leito foram realizadas aplicando o amostrador “BLH-84” (Figura-12), do tipo Helleys-Smith da Euro Analytical LTDA, desenvolvido pelo USGS. O BLH-84 utilizado na pesquisa é fabricado em alumínio e possui fundo plano, o bocal (entrada) apresenta as dimensões 7,5 cm de largura, 7,5 cm de altura e 9 cm de comprimento. Acoplado ao bocal do equipamento, existe uma ‘caixa coletora’ (saída) em formato de losango expandida lateralmente e verticalmente. A caixa coletora possui malha 250 µm, tendo aproximadamente 60 cm de comprimento. O amostrador BLH-84 possui hastas acopladas para atingir o fundo e possibilitar o uso a vau em diversas direções e situações (CARVALHO, 2008; HELLEY; SMITH, 1971; USGS, 1966).

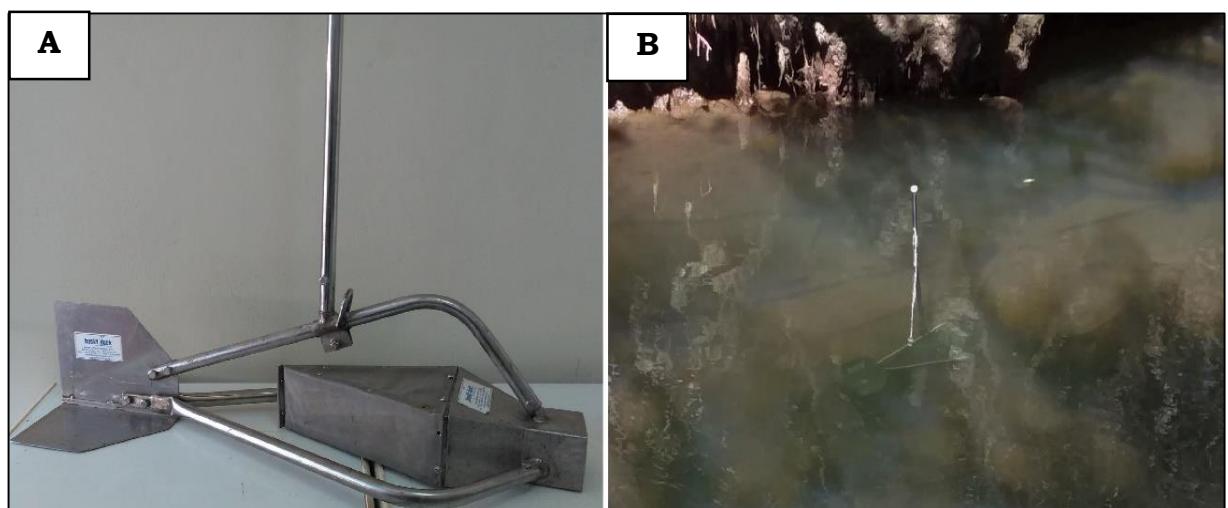


Figura 12 – Amostrador de Sedimento de Leito “BLH-84”.

A) Equipamento BLH-84.

B) Amostragem utilizando o BLH-84, na imagem o equipamento encontra-se alocado no leito do Ribeirão das Antas.

Fonte: Do autor.

O método de aferimento da descarga sólida de leito aplicado consiste na colocação do amostrador no leito em várias subseções pelo mesmo período de tempo, o hidrossedimento de fundo ficará acumulando na malha do equipamento. O BLH-84 foi alocado nas mesmas subseções em que foram realizadas as amostras de sedimento suspenso, com tempo igual em cada subseção.

O hidrossedimento de leito amostrado que ficou acumulado na da malha do equipamento foi transferido para um balde, através de sucessivas lavagens da malha do BLH-84 com água do próprio ribeirão. Só então, o material é embalado em saco plástico originando uma única amostra. Após período da eliminação da umidade, utilizando estufas, realiza-se a determinação da massa total da amostra.

As amostragens de hidrossedimento de fundo, foram realizadas em todas idas à campo, coletando as amostras nos mesmos pontos de coleta de hidrossedimento em suspensão.

Carvalho (2008), apresenta os cálculos para amostragens diretas de sedimentos de leito obtida por integração no método IIL, fornecendo o valor da descarga sólida por dia. O resultado obtido é proveniente da Equação-18, que necessita dos valores do peso seco, da eficiência do amostrador, da largura da boca do amostrador, do número de subseções amostradas e do tempo de amostragem.

$$Q_{SL} = \frac{1440 * p * L}{E_{am} * n * l * t} \quad (18)$$

Na Equação-18:

Q_{SL} = descarga sólida total de leito ($\text{kg} \cdot \text{dia}^{-1}$);

E_{am} = eficiência, sendo igual a 1,0 com saca até 30 % de material;

p = peso seco da amostra (kg);

L = largura do rio (m);

n = número de subseções amostradas;

t = tempo de amostragem na vertical (min);

l = largura da boca do amostrador (m).

5.3.3 Determinação Granulométrica Sedimento de Leito

A determinação granulométrica dos hidrossedimentos de leito transcorreu através do procedimento de peneiramento, sendo realizada no Setor Geoambiental do LAPOC. De acordo com classificação granulométrica elaborada pela ABNT obtida na norma NBR 6.502, as classes são: pedregulho grosso, pedregulho médio, pedregulho fino, areia grossa, areia média, areia fina e silte (ABNT, 1995).

Utilizou-se durante os ensaios as seguintes peneiras de *mesh* e tamanho correspondentes: #6 (3,86 mm), #9 (2 mm), #10 (1,651 mm), #28 (0,589 mm), #35 (0,417 mm), #48 (0,295 mm), #60 (0,25 mm), #100 (0,148 mm) e #250 (0,063mm). Posteriormente à separação das frações, o material foi seco a 100°C e a massa acumulada em cada peneira determinada. Para as análises granulométricas das frações silte e argila, normalmente com fração abaixo de 0,05 mm, foram determinadas aferindo a massa passante à peneira de #250. Após o processo de peneiramento as amostras foram encaminhadas para análises radiológicas.

5.4 ANÁLISES RADIOLÓGICAS

A quantificação da concentração de atividade dos principais radionuclídeos naturais ^{210}Pb , ^{226}Ra , ^{228}Ra , Th e U nas amostras de hidrossedimento suspenso, de hidrossedimento de fundo e de água, são realizadas nos Setores de Radiometria e de Química Analítica do LAPOC. Alguns métodos analíticos realizados pelo LAPOC possuem acreditação junto ao INMETRO na determinação destes elementos radioativos, segundo a norma ISO 17025.

As determinações das concentrações dos elementos tório (Th) e urânio (U) na água no hidrossedimento suspenso e de fundo, foram realizadas por Espectrometria de Massa por Plasma de Acoplamento Induzido, em inglês, Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry, ICP-MS, no Setor de Química Analítica do Laboratório de Poços de Caldas uma unidade da Comissão Nacional de Energia Nuclear.

As concentrações dos elementos ^{210}Pb , ^{226}Ra e ^{228}Ra na água no hidrossedimento suspenso e de fundo, foram determinadas por Radioquímica no Setor de Radiometria do LAPOC.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir serão abordados os resultados obtidos e uma discussão dos mesmos, divididos entre os subitens 6.1 e 6.6.

6.1 RESULTADOS FÍSIOGRÁFICOS DA BHARA

Determinou-se as características fisiográficas da Bacia Hidrográfica do Alto Ribeirão das Antas (BHARA), a partir do software de geoprocessamento ArcGIS® versão 10.3, da empresa Environmental Systems Research Institute, Inc. (ESRI). A Tabela-2 expõe os resultados fisiográficos da BHARA. Sendo importante ressaltar que a BHARA apresenta uma área equivalente a 33,5 % da área total da Bacia Hidrográfica do Ribeirão das Antas.

Tabela 2 – Características Fisiográficas da BHARA.

Característica	Valor
Área	152,40 km ²
Perímetro	60,41 km
Comprimento do curso d'água principal	21,95 km
Coeficiente de Compacidade (Kc)	1,36
Índice de conformação (Kf)	0,44
Cota máxima	1640 m
Cota Mínima	1250 m
Cota Média	1369 m
Declividade Média do Rio Principal	17,72 m.km ⁻¹
Densidade de Drenagem	1,28 km.(km ²) ⁻¹
Ordem dos Cursos D'água	5º ordem

Fonte: Do autor.

A análise das informações obtidas possibilita estimar as tendências comportamentais da BHARA. O coeficiente de compacidade (Kc) pode ser definido como a relação entre o perímetro da bacia e o de um círculo de área igual à da bacia, quanto mais a forma se aproxima de um círculo maior será a tendência a enchentes. O Kc da BHARA é igual a 1,36 e o índice de

conformação (Kf) exibir um valor baixo (0,44), tais valores são comuns as bacias hidrográficas com baixa tendência à ocorrência de enchente, ou seja, apresenta baixa susceptibilidade a enchentes em condições normais de precipitação, excluindo-se eventos extremos de precipitações. Isso indica que a bacia não possui uma forma circular, mais sim aproximadamente alongada.

Densidade drenagem é a relação entre o somatório comprimento rios dividido pela área, a BHARA apresenta valor de $1,28 \text{ km} \cdot (\text{km}^2)^{-1}$, que segundo a classificação é uma baixa capacidade de drenagem. A classificação hierárquica dos cursos d'água da bacia, de acordo com os critérios de Horton (1945), classifica o Ribeirão das Antas na área da BHARA como de 5º ordem.

6.1.1 Geologia

As estruturas geológicas identificadas na BHARA, apresenta consonância com os estudos bibliográficos salientados no item 4.1. De acordo com os autores citados, os três tipos de rochas principais do Planalto são foiaítos, tinguaítos e fonolitos, todas são provenientes da mesma atividade vulcânica e de composição química semelhante.

Determinou-se as estruturas geológicas da Bacia Hidrográfica do Alto Ribeirão das Antas, a partir do software ArcGIS® versão 10.3. Sendo usado como base, o mapa geológico do Planalto do Poços de Caldas desenvolvido por (MORAES, 2007).

A Figura-13, destaca os constituintes geológicos da BHARA sendo:

- **Tinguaítos (28,91 %);**
- **Fonolitos (27,75 %);**
- **Rochas Potássicas (27,04 %);**
- **Foiaítos (14,73 %);**
- **Tufo-Rocha Piroclástica (1,54 %);**
- **Fenito e Gnaisse (0,03 %).**

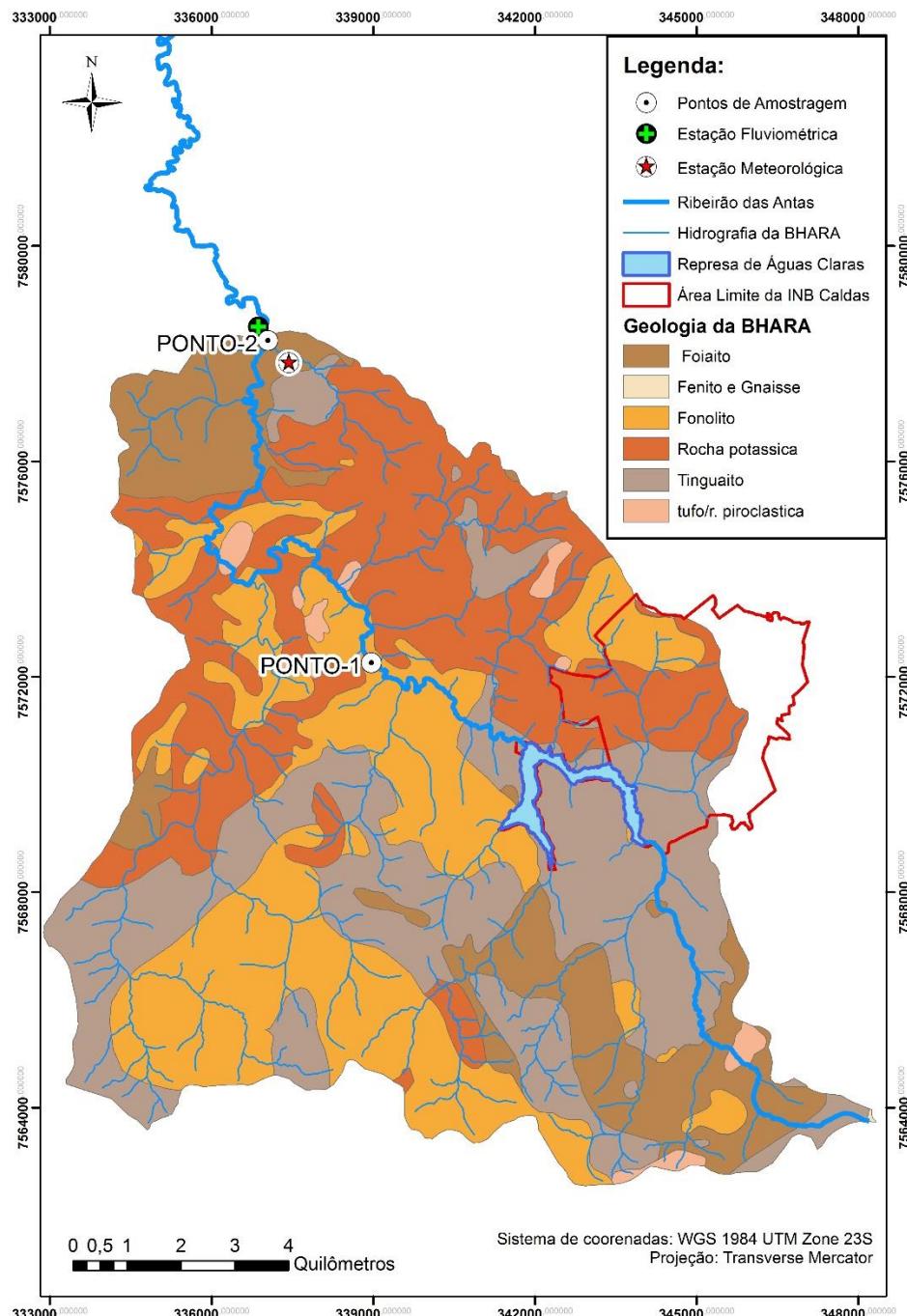


Figura 13 - Mapa Geológico da Bacia Hidrográfica do Alto Ribeirão das Antas.
Fonte: Do autor.

6.1.2 Solos e Declividade

A identificação dos solos da BHARA baseou-se no Mapa de Solos de Minas Gerais (FEAM, 2010), sendo a elaboração do mapa de solos realizada por contribuição pessoal de CURI; SILVA (2017), utilizando o software ArcGIS®.

A Figura-14 apresenta as classes de solo identificadas na BHARA: Latossolo Vermelho-Amarelo-LVA distrófico típico a moderada textura argilosa (64,82 %), Cambissolo Háplico-CX distrófico típico e léptico a moderada textura siltosa/argilosa (21,04 %), Neossolo Litólico-RL distrófico típico a fraco (1,57 %) e Solos Indiscriminados de Várzea-SIV (12,57 %).

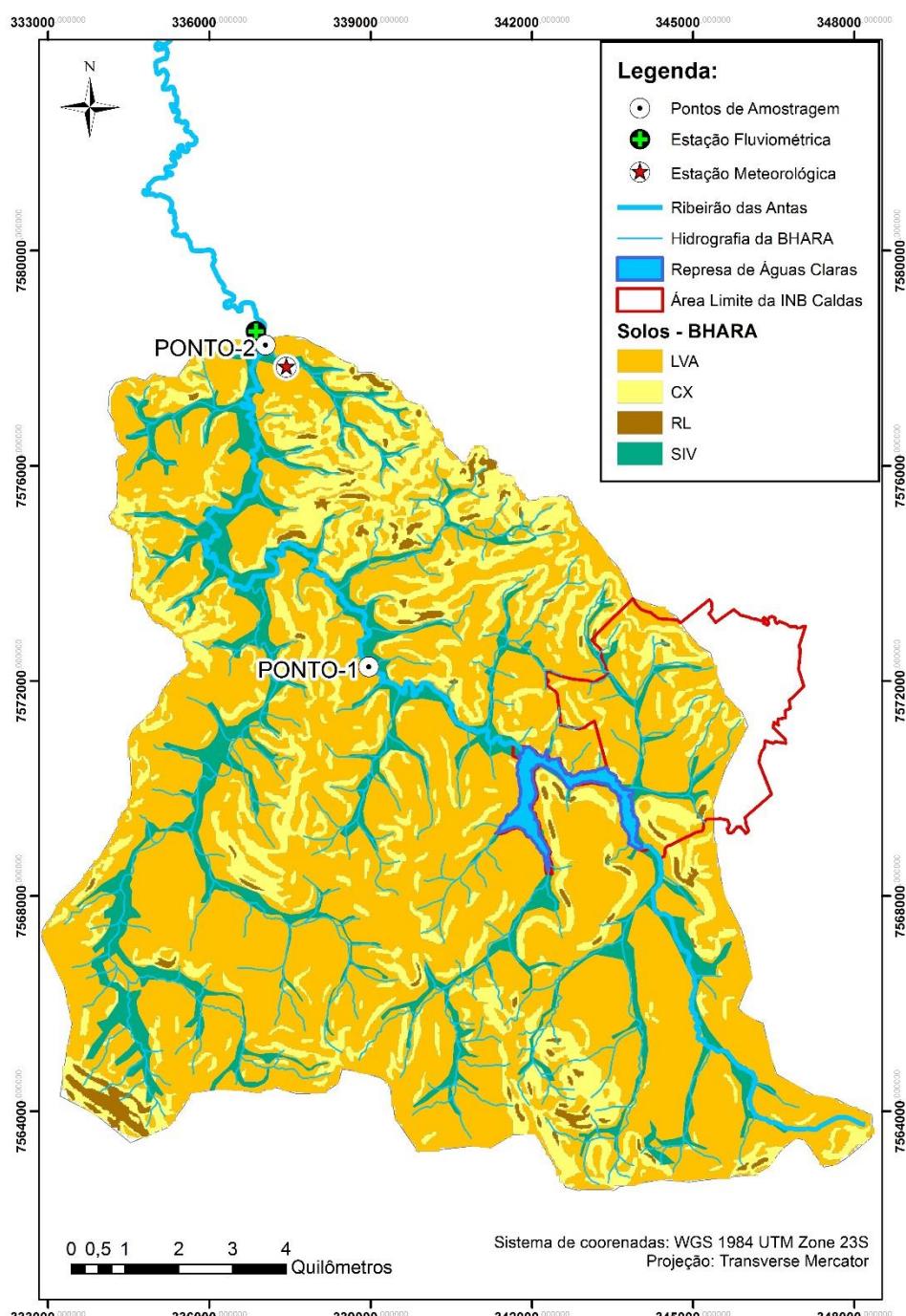


Figura 14 - Mapa de Solos da Bacia Hidrográfica do Alto Ribeirão das Antas.
Fonte: CURI; SILVA, 2017.

A Figura-15 exibe o relevo da Bacia Hidrográfica do Alto Ribeirão das Antas, que é bem movimentado. A declividade média da BHARA é da ordem de 13 %, estes resultados foram obtidos através do software ArcGIS®.

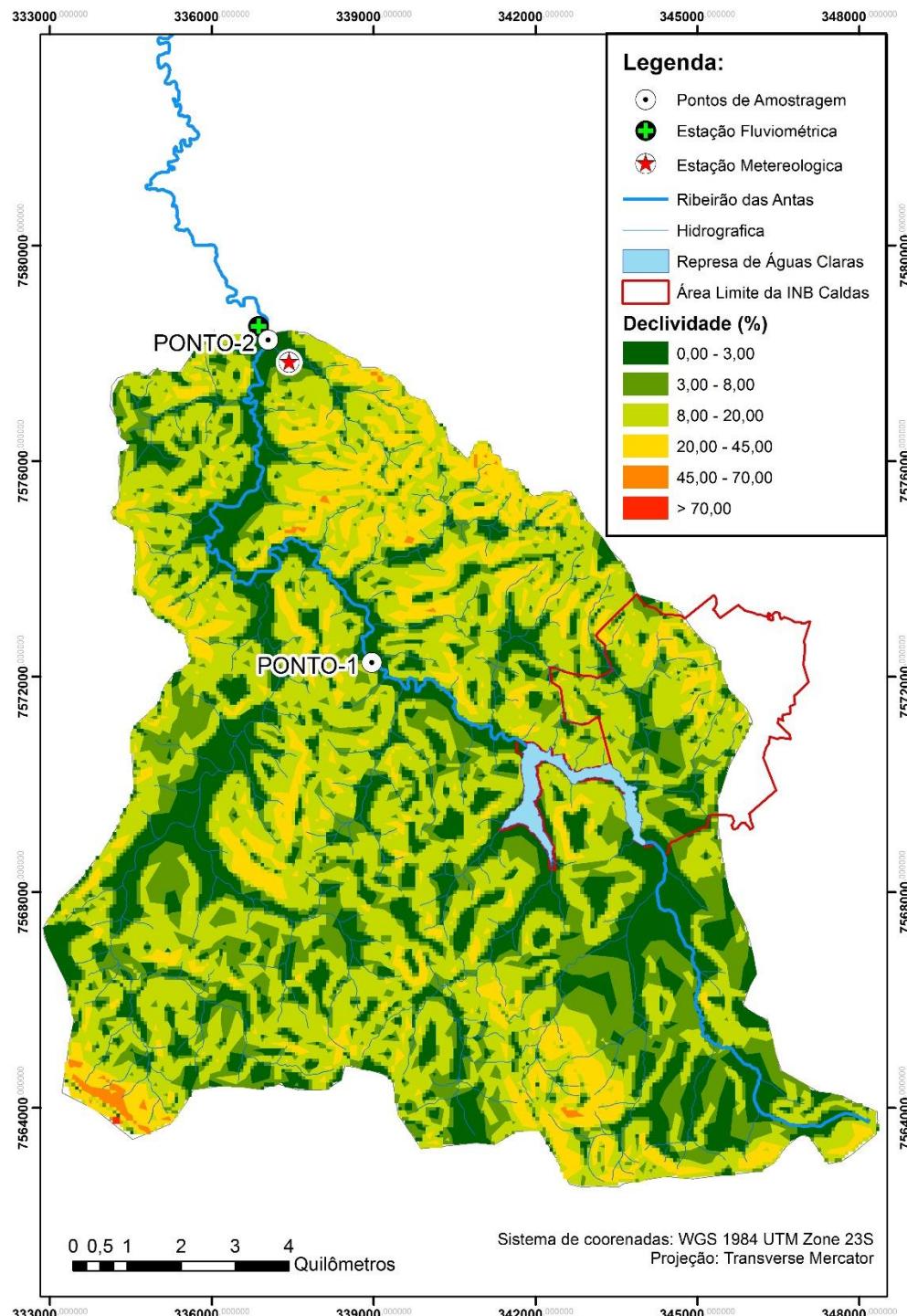


Figura 15 - Mapa de Declividade da Bacia Hidrográfica do Alto Ribeirão das Antas.

Fonte: Do autor.

6.1.3 Uso e Ocupação

A Figura-16 mostra o uso e ocupação da área da BHARA, nas seguintes classes: Campo Pastagem (40,35 %), Mata (22,90 %), Eucalipto (15,04 %), Agricultura (11,40 %), Solo Exposto (5,42 %), Área Urbana (2,64 %) e Água (2,25 %). O mapa baseia-se em imagens de satélites obtidas no software Google Earth PRO® e processadas pelo software ArcGIS®.

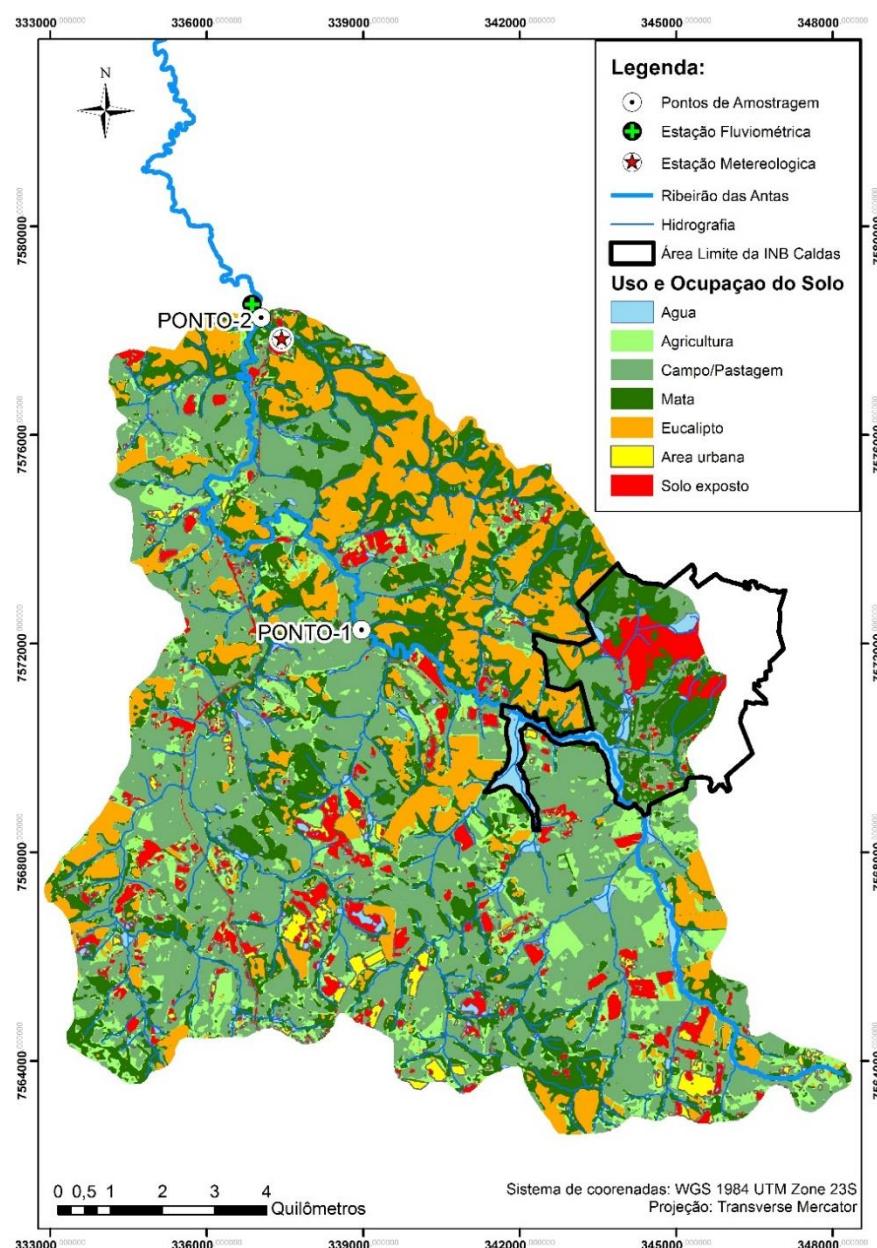


Figura 16 - Mapa de uso e ocupação dos solos da BHARA.
Fonte: Do autor.

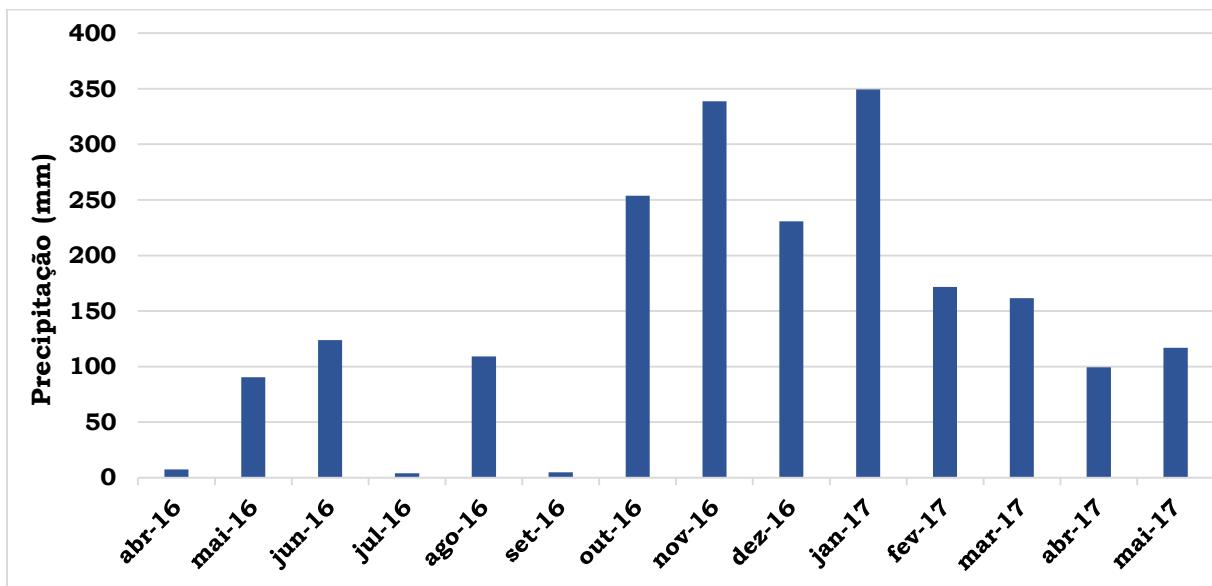
6.2 RESULTADOS CLIMATOLÓGICOS NA BHARA 2016-2017

Os dados de precipitação, umidade relativa do ar e temperatura apresentados a seguir foram obtidos por meio da estação meteorológica do LAPOC, que registrou os dados em intervalos de 30 (trinta) minutos.

6.2.1 Precipitação

O Gráfico-8 denota a precipitação mensal ao longo do período da pesquisa. Verificou-se um total acumulado no ano de 1795,6 mm e uma média de precipitação igual a 149,6 mm mensais. A maior precipitação mensal no período foi de 349,5 mm em janeiro de 2017, enquanto que a menor foi de 4,06 mm em julho de 2016.

Gráfico 8 – Precipitação Mensal Estação LAPOC – Abril/2016 a Maio/2017- Poços de Caldas- MG.

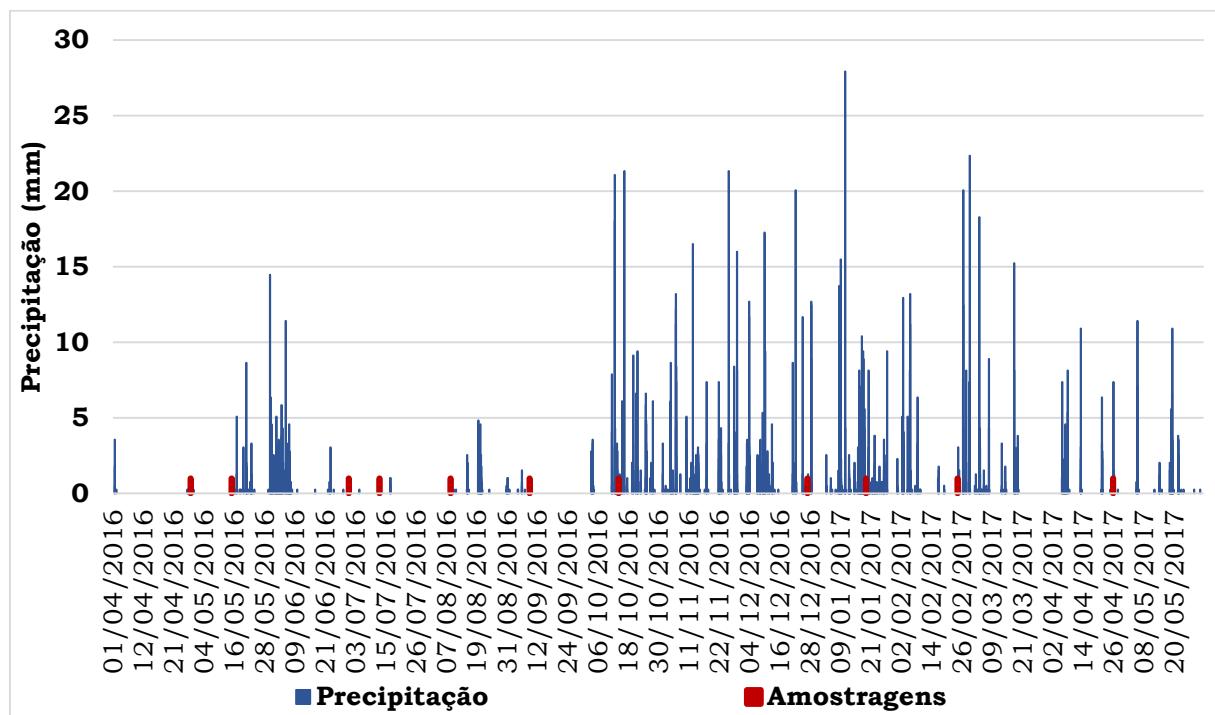


Fonte: Do autor.

O Gráfico-9 apresenta as precipitações registradas em intervalos de 30 minutos em todo o período da pesquisa e também as amostragens na calha do Ribeirão das Antas, executadas no P-1 e P-2 respectivamente. A maior

precipitação se deu às 5:30 h, no dia 11 de janeiro de 2017, quando foram registrados 27,9 mm, equivalendo a uma intensidade média de 55,8 mm.h⁻¹.

Gráfico 9 - Precipitação Estação LAPOC registrada em intervalos de 30 minutos, de 01/Abril/2016 a 31/Maio/2017 em Poços de Caldas-MG.



Fonte: Do autor.

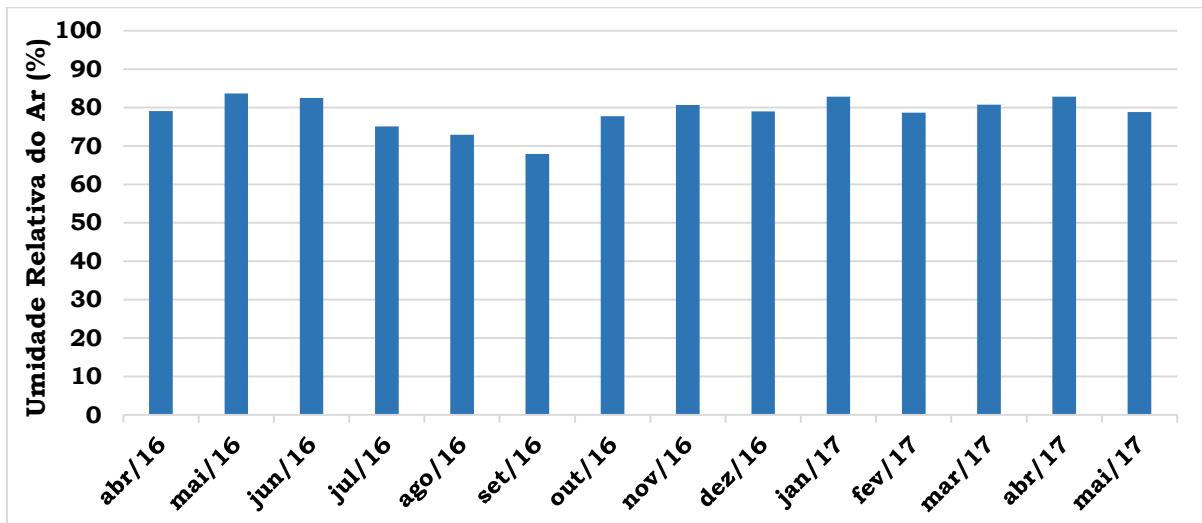
6.2.2 Umidade Relativa do Ar

A umidade reativa do ar (UR) registrada na estação meteorológica do LAPOC em intervalos de 30 minutos. Durante todo o período da pesquisa a UR apresentou média de 79,3 % e mediana de 87,0 %, enquanto que a mínima UR registrada foi de 10,1 % às 13:30 (h:min) em 18 de julho de 2016 e a máxima UR registrada pela estação foi de 100 % às 06:00 horas, em 25 de maio de 2016.

Na escala mensal, a maior média de umidade do ar obtida foi de 83,5 % em maio, já a menor média foi de 68,8 % e ocorreu em setembro. Tais valores estão dentro do esperado para uma região com elevados índices pluviométricos.

O Gráfico-10 apresenta as médias mensais da umidade relativa do ar registrada pela estação meteorológica do LAPOC.

Gráfico 10 - Umidade Relativa do Ar Média Mensal estação meteorológica do LAPOC, entre Abril/2016 e Maio/2017.



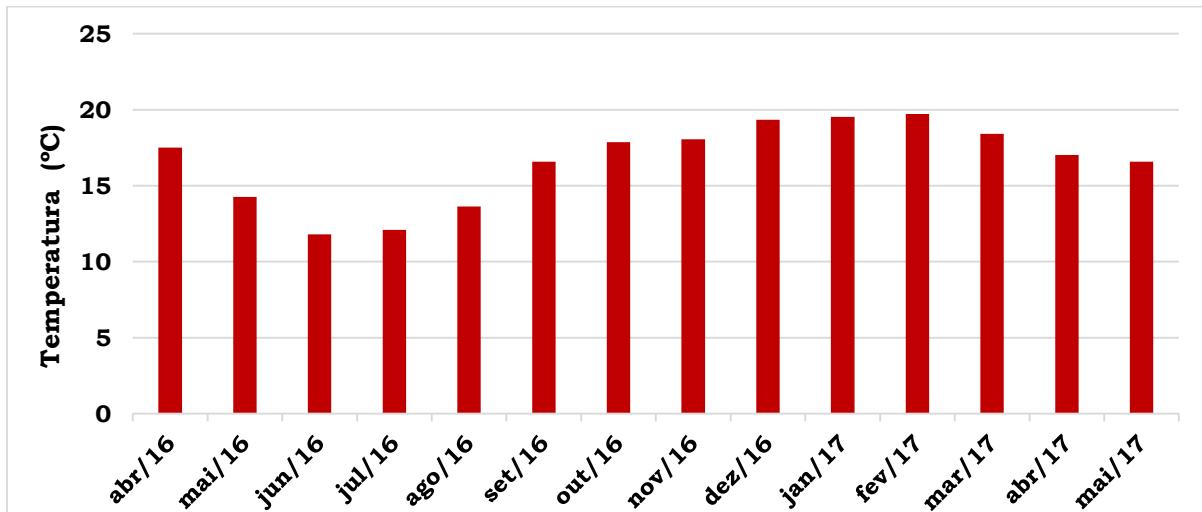
Fonte: Do autor.

6.2.3 Temperatura

A temperatura registrada na BHARA em todo o período apresentou uma média anual de 16,54 °C. A menor média mensal de temperatura se deu no mês de junho, valor médio de 11,8 °C, enquanto que a maior média mensal registrada ocorreu no mês de fevereiro com média de 19,7 °C.

No Gráfico-11 encontra-se a representação gráfica da temperatura.

Gráfico 11 - Temperatura Mensal Média estação meteorológica do LAPOC, de abril/2016 a maio/2017.

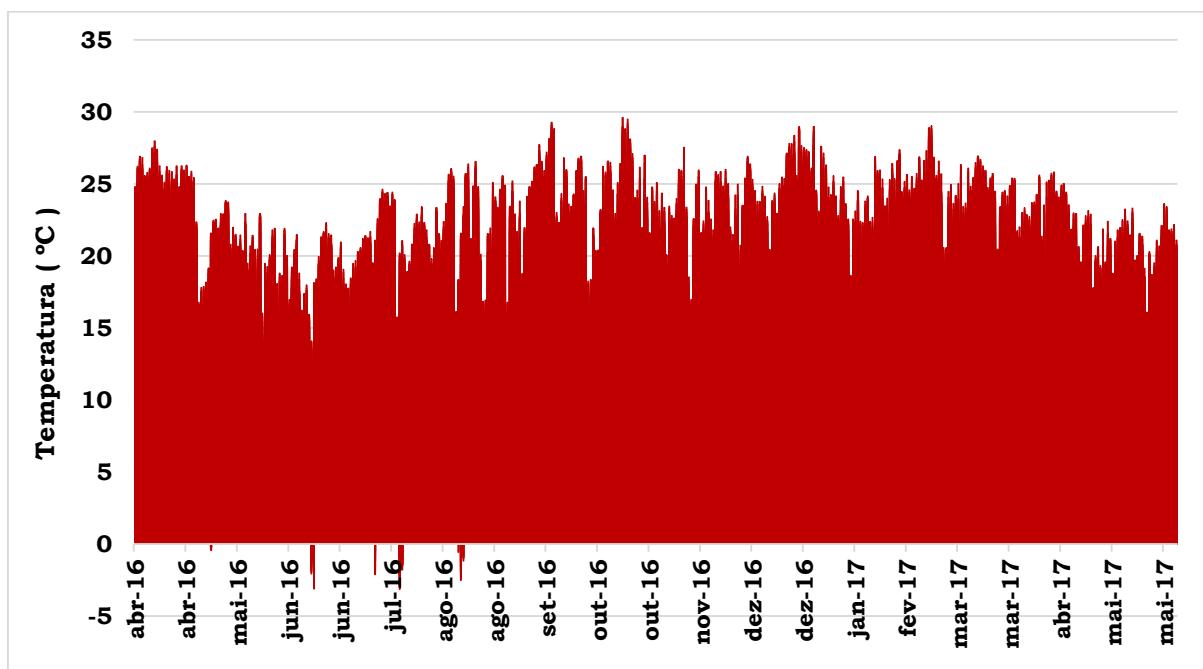


Fonte: Do autor.

Abordando os registros em intervalos de 30 minutos, a maior temperatura registrada foi de 29,6 °C as 14:30 horas, do dia 17 em outubro de 2016. Enquanto que a menor temperatura marcada no período foi -3,11 °C as 07:00 horas, do dia 18 em junho de 2016. A média da temperatura nesta escala temporal foi igual a 16,4 °C.

O Gráfico-12 apresenta a temperatura registrada pela estação meteorológica do LAPOC a cada 30 minutos, em todo o período da pesquisa.

Gráfico 12 - Temperatura estação meteorológica do LAPOC em intervalos de 30 minutos, de abril/2016 a maio/ 2017.



Fonte: Do autor.

6.3 RESULTADOS HIDROMÉTRICOS DA BHARA

6.3.1 Análise do regime de escoamento no Ponto-2

Na Tabela-3 encontra-se a síntese das medições diretas efetivas, realizadas durante o processo de monitoramento da vazão e da concentração de sólidos em suspensão, no Ponto 2 (P-2) situado 18,1 km a jusante da Represa de Águas Claras.

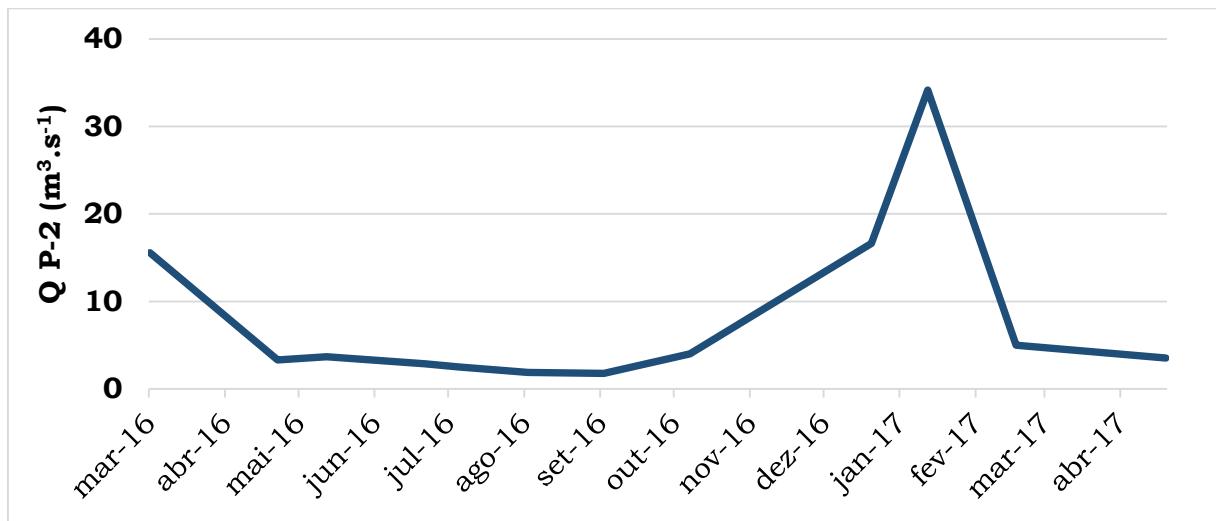
Tabela 3 - Síntese das campanhas de monitoramento de vazão e da concentração de sedimentos suspensos no Ribeirão das Antas (P-2).

Data	Hora	Área (m ²)	Vazão (m ^{3.s⁻¹)}	CSS (mg.L ⁻¹)
8-mar-16	9:25	22,45	15,56	54,48
29-abr-16	9:14	8,97	3,32	21,05
19-mai-16	9:34	9,27	3,66	5,32
28-jun-16	9:06	9,21	2,89	8,77
12-jul-16	9:21	8,37	2,5	4,62
9-ago-16	9:32	7,67	1,87	1,86
9-set-16	9:05	7,99	1,79	5,56
14-out-16	9:45	9,14	4,01	11,88
27-dez-16	9:40	16,81	16,64	16,36
19-jan-17	9:20	35,97	34,15	63,2
24-fev-17	9:31	14,77	5,34	96,46
26-abr-17	9:45	9,42	3,55	9,44

Fonte: Do autor.

O Gráfico-13 apresenta as vazões medidas ao longo do período de monitoramento, onde se visualiza uma ampla variação da vazão, o que permitiu gerar uma curva chave ($Q_{P-2}=f(NA)$) com boa representatividade.

Gráfico 13 - Vazões medidas diretamente no período de monitoramento no P-2 do Alto Ribeirão das Antas, Poços de Caldas-MG.



Fonte: Do autor.

Com base nos dados de vazão (Q_{P-2}) medidos diretamente e os respectivos níveis de água (NA), obteve-se a curva chave ou de calibração, $Q_{P-2} = f(NA)$, apresentada no Gráfico-14, cuja expressão analítica é a Equação-19, desenvolvida e otimizada pela ferramenta Solver® do software Excel® em sua versão 2013.

$$Q_{P-2} = 2,184 * NA^{2,087} \quad (19)$$

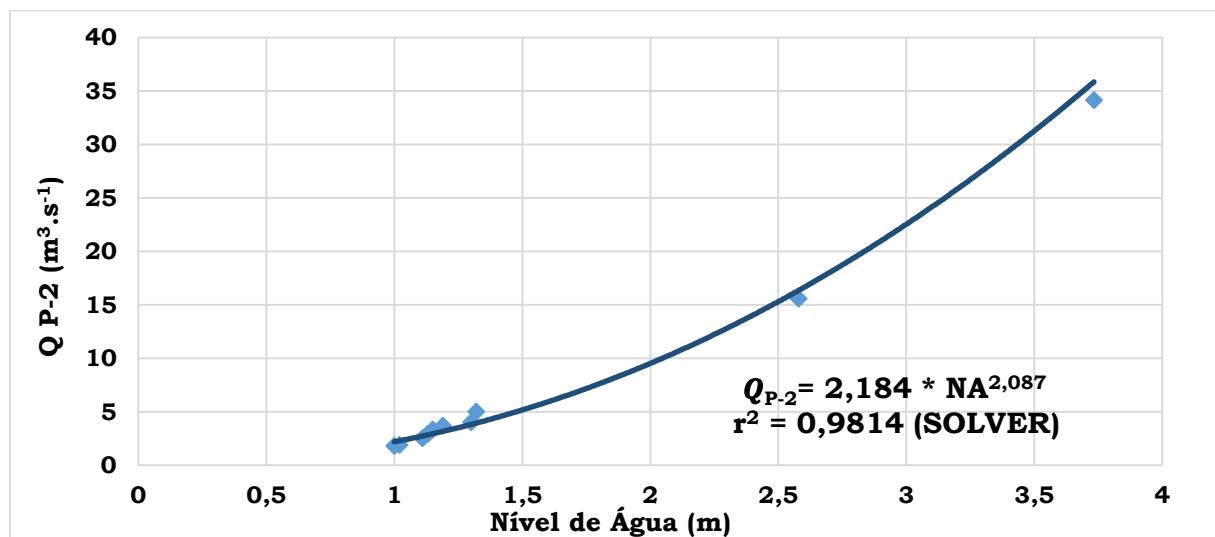
$(r^2 = 0,9814)$

Onde:

Q_{P-2} = vazão no Ponto-2 ($m^3.s^{-1}$);

NA = nível de água registrado pela estação fluviométrica (m).

Gráfico 14 – Curva de calibração $Q_{P-2} = f(NA)$ para seção P-2, no Alto Ribeirão das Antas em Poços de Caldas/MG.



Fonte: Do autor.

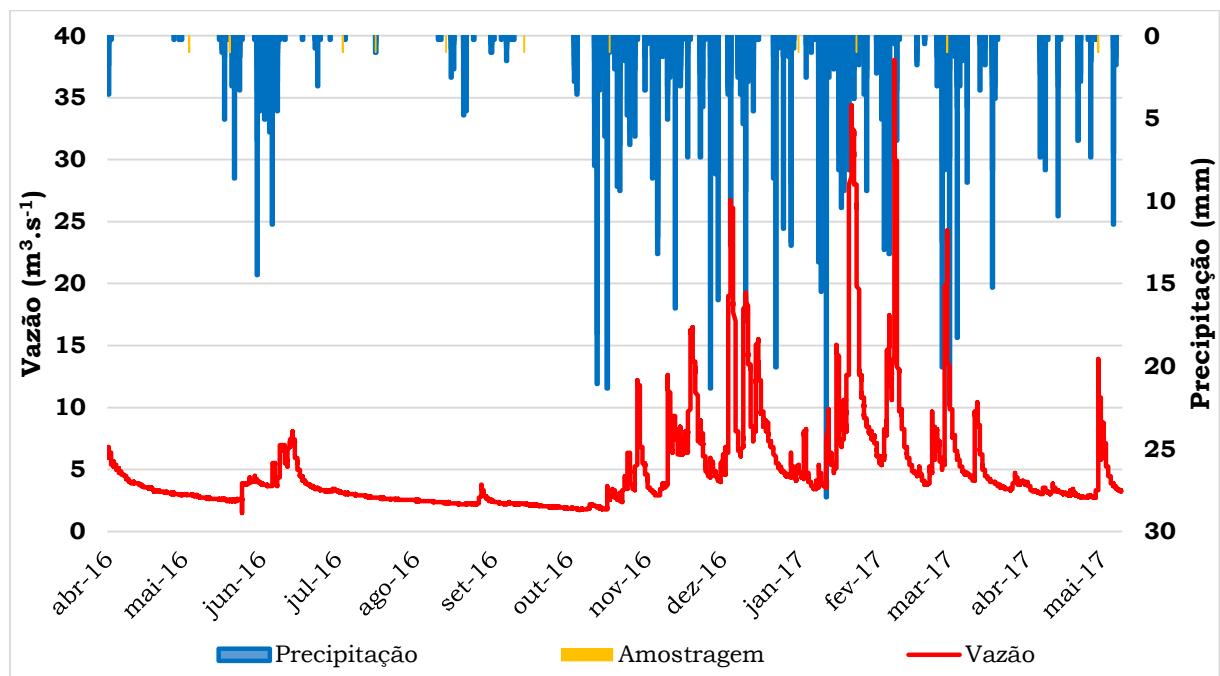
Foram registradas as precipitações a cada 30 minutos, por uma estação meteorológica, cuja distribuição temporal pode ser analisada no Gráfico-9, sendo o total precipitado no período estudado igual a 2011,7 mm. A maior lámina de precipitação registrada foi de 27,9 mm, a qual corresponde à uma intensidade de precipitação de $55,8 \text{ mm.h}^{-1}$ ocorrida no dia 11/01/2017.

O monitoramento do nível de água na seção P-2, por meio da estação fluviométrica, com registros a cada 30 minutos no período de 01 de abril de 2016 à 31 de maio de 2017, resultaria em (426 dias * 48 registros/dia) 20448 registros, dois quais, foram efetivamente utilizados 19481, o que representa 95,3 % dos registros, que pode ser considerado um elevado índice de aproveitamento, portanto, apenas 4,7 % de registros perdidos, sobretudo por falta de energia para alimentar os equipamentos.

A partir destes registros, obteve-se o linograma, que, em associação com a Equação-19 (curva-chave), possibilitou gerar o fluviograma para a seção P-2 no referido período, representado no Gráfico-15 juntamente com o hietograma.

O Gráfico-15 apresenta o hietograma, as amostragens e o fluviograma para todo o período, registrados no ponto de monitoramento P-2.

Gráfico 15 – Hietograma e Fluviograma para a seção P-2 no Alto Ribeirão das Antas, Poços de Caldas-MG.



Fonte: Do autor.

A análise deste fluviograma que abrangeu um período contínuo de 426 dias, permitiu obter informações relevantes em termos do regime de escoamento no referido período.

Considerando os intervalos de 30 minutos de registros, a vazão máxima foi de $38,05 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, a média de $4,90 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ e mínima de $1,50 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$. Estes valores associados à área de drenagem para a seção do P-2, que é da ordem de $152,4 \text{ km}^2$, correspondem à rendimentos específicos de $249,7 \text{ L.(s.km}^2\text{)}^{-1}$, $32,15 \text{ L.(s.km}^2\text{)}^{-1}$ e $9,83 \text{ L.(s.km}^2\text{)}^{-1}$ respectivamente $\text{RE}_{\text{máximo}}$, $\text{RE}_{\text{médio}}$ e $\text{RE}_{\text{mínimo}}$, obtidos por meio da Equação-7.

O $\text{RE}_{\text{máximo}}$ apresentou valor relativamente baixo, o que pode ser resultante do efeito de amortecimento de cheias, por parte da Represa de Águas Claras, situada 18km à montante.

O valor para o $\text{RE}_{\text{médio}}$ é elevado, pode ser resultado não só do elevado índice pluvial incidente sobre a área da bacia, como também do elevado grau de regularização do regime de escoamento apresentado pela bacia, incluindo-se também a contribuição do reservatório da Represa de Águas Claras, seu valor está consistente com o estimado por (SILVA, 2014) RE_{MLT} para a região Sul de Minas, onde há estimativa de valores maiores que $30 \text{ L.(s.km}^2\text{)}^{-1}$.

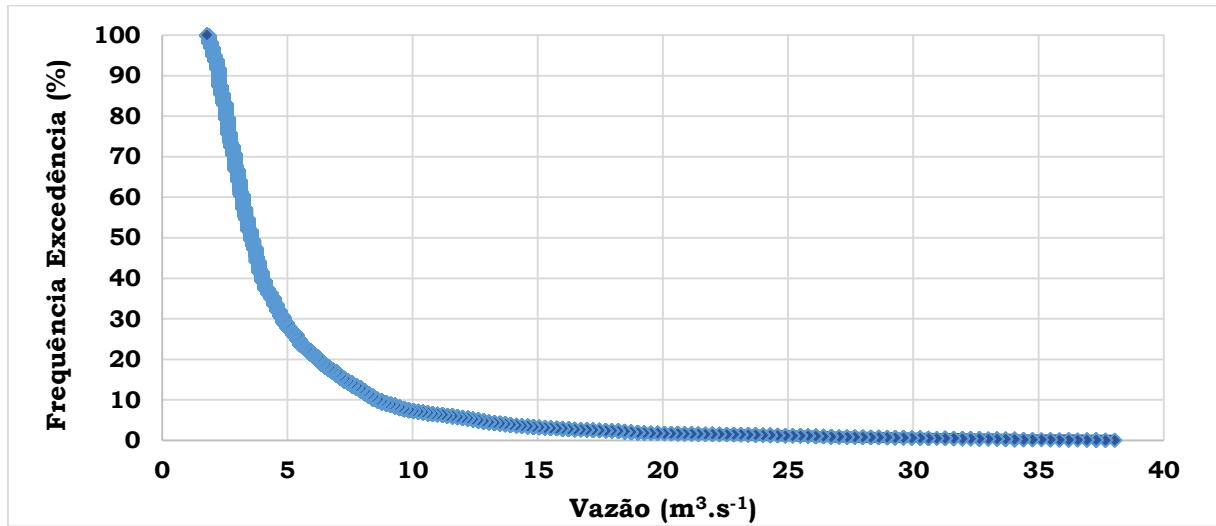
O valor de $\text{RE}_{\text{mínimo}}$ também é elevado, tomando-se como base o valor indicado por (SILVA, 2014) para um indicador menos restritivo como o $\text{RE}_{90\%}$, para o qual são sinalizados valores maiores que $5,5 \text{ L.(s.km}^2\text{)}^{-1}$ para o Sul de Minas Gerais.

O Gráfico-16 apresenta a curva de permanência das vazões, que é base para análise do regime de escoamento. O Gráfico-16 permite estimar, entre outros, os valores de $Q_{50\%}$ ($3,54 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$), $Q_{90\%}$ ($2,27 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$) e $Q_{95\%}$ ($2,1 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$), os quais correspondem respectivamente à $\text{RE}_{50\%}$ ($23,23 \text{ L.(s.km}^2\text{)}^{-1}$), $\text{RE}_{90\%}$ ($14,9 \text{ L.(s.km}^2\text{)}^{-1}$) e $\text{RE}_{95\%}$ ($13,8 \text{ L.(s.km}^2\text{)}^{-1}$).

Estes valores além de serem superiores aos obtidos por (SILVA, 2014) permitem também ressaltar a persistência das vazões, pelas relações entre $Q_{90\%} / Q_{50\%} = 0,641$ e $Q_{95\%} / Q_{50\%} = 0,593$, que ratificam a avaliação de um regime de escoamento mais regularizado.

No período total de monitoramento o deflúvio aferido foi de $1,736 * 10^8 \text{ m}^3$, o qual associado à área de drenagem para a seção do P-2, corresponde a uma lâmina drenada de $1139,13 \text{ mm}$, este valor muito elevado já foi analisado por meio do $\text{RE}_{\text{médio}}$ do qual pode ser derivado.

Gráfico 16 – Curva de permanência das vazões na seção P-2 da BHARA, Poços de Caldas/MG.



Fonte: Do autor.

A Tabela -4 apresenta os dados de precipitação e vazões no P-2.

Tabela 4 – Valores das precipitações mensais, da vazão diária média mensal e do deflúvio mensal, para a seção de monitoramento P-2 no Alto Ribeirão das Antas, período de 01/04/2016 a 31/05/2017.

Mês	Dias Acumulados	Precip. Mensal (mm)	Vazão Diária Média Mensal ($m^3.s^{-1}$)			Deflúvio Mensal (mm)		
			Q_{Total}	Q_{Base}	$Q_{sup. Direto}$	Total	Base	Superf. Direto
Abr	30	7,9	3,7	3,5	0,2	62,3	59,8	2,6
Mai	61	90,4	3,1	3,1	0,0	53,9	53,9	0,0
Jun	91	123,7	4,1	2,8	1,3	69,7	46,8	22,8
Jul	122	4,1	2,6	2,4	0,2	44,8	42,8	2,1
Ago	153	54,6	2,3	2,2	0,1	40,4	37,8	2,6
Set	183	4,8	1,9	1,9	0,0	33,5	32,4	1,1
Out	214	254,2	3,1	2,2	0,9	54,9	38,1	16,8
Nov	244	339,1	7,4	2,4	5,0	125,2	40,2	85,0
Dez	275	230,6	7,4	2,6	4,8	129,7	45,0	84,6
Jan	306	349,5	9,3	2,8	6,5	162,6	48,6	114,1
Fev	334	171,5	8,3	3,0	5,3	131,4	46,8	84,7
Mar	365	165,1	6,2	3,1	3,1	109,6	55,3	54,3
Abr	395	99,3	3,4	3,4	0,0	56,9	56,8	0,1
Mai	426	116,8	3,7	3,0	0,7	64,3	52,7	11,6
Total	-	2011,7	-	-	-	1139,1	656,9	482,2

Fonte: Do autor.

Em relação as precipitações, o mês de janeiro de 2017 foi o mais chuvoso, com um total de 349,5 mm e o mês de julho de 2016 o mais seco com apenas 4,1 mm de chuva.

Considerando o período de abril de 2016 a março de 2017, o total precipitado foi 1795,5 mm e constata-se que o período seco (abril a setembro) participa com 285,5 mm, que corresponde à 15,9 % da precipitação. O período seco apresentou precipitação média mensal de 47,6 mm, sendo importante ressaltar que em 3 meses deste período a precipitação foi inferior a 8 mm.

O período úmido participa com 1510,1 mm que corresponde à 84,1 % da precipitação do período analisado, o que evidencia um elevado grau de concentração do regime pluvial. A precipitação média mensal do período úmido foi de 251,7 mm, o mês de março de 2017 apresentou a menor precipitação da ordem de 165,1 mm que ainda é um elevado valor. Permitindo considerar que o índice pluvial foi elevado em todo o período úmido, o que de certo modo é desejável sob a ótica da potencialidade de promover a recarga do lençol superficial de água.

Em relação às vazões o mês de janeiro apresentou a maior vazão diária média mensal, de $9,25 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ e consequentemente o maior deflúvio mensal, de $24,785 \text{ Hm}^3$, ou a uma lâmina drenada de 162,6 mm. Já o mês de setembro apresentou a menor vazão diária média mensal, de $1,97 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ e consequentemente o menor deflúvio mensal, de $5,103 \text{ Hm}^3$, ou a uma lâmina drenada de 33,5 mm.

A análise das vazões diárias média mensal permitiu identificar de forma clara o período de depleção do escoamento superficial, que se estendeu do mês de abril ao mês de setembro, e também o período de recarga do lençol superficial, que se estendeu de outubro a abril. Portanto, seguindo metodologia proposta em (MELLO; SILVA, 2013), realizou-se a separação da vazão em suas duas componentes, o escoamento de base e o escoamento superficial direto.

Assim para o período de depleção de abril a setembro ajustou-se o modelo de decaimento exponencial, gerando a Equação-20, possibilitando determinar o valor do escoamento de base.

$$Q_{Base} = 3,9629 * e^{-0,004 * T} \quad (20)$$

$(r^2 = 0,9776)$

Onde:

Q_{Base} = vazão de base, ou vazão decorrente da drenagem do lençol superficial ($m^3.s^{-1}$);

a (3,9629) = representa a vazão de base no $T=0$;

b (0,004) = coeficiente de decaimento da vazão com o tempo;

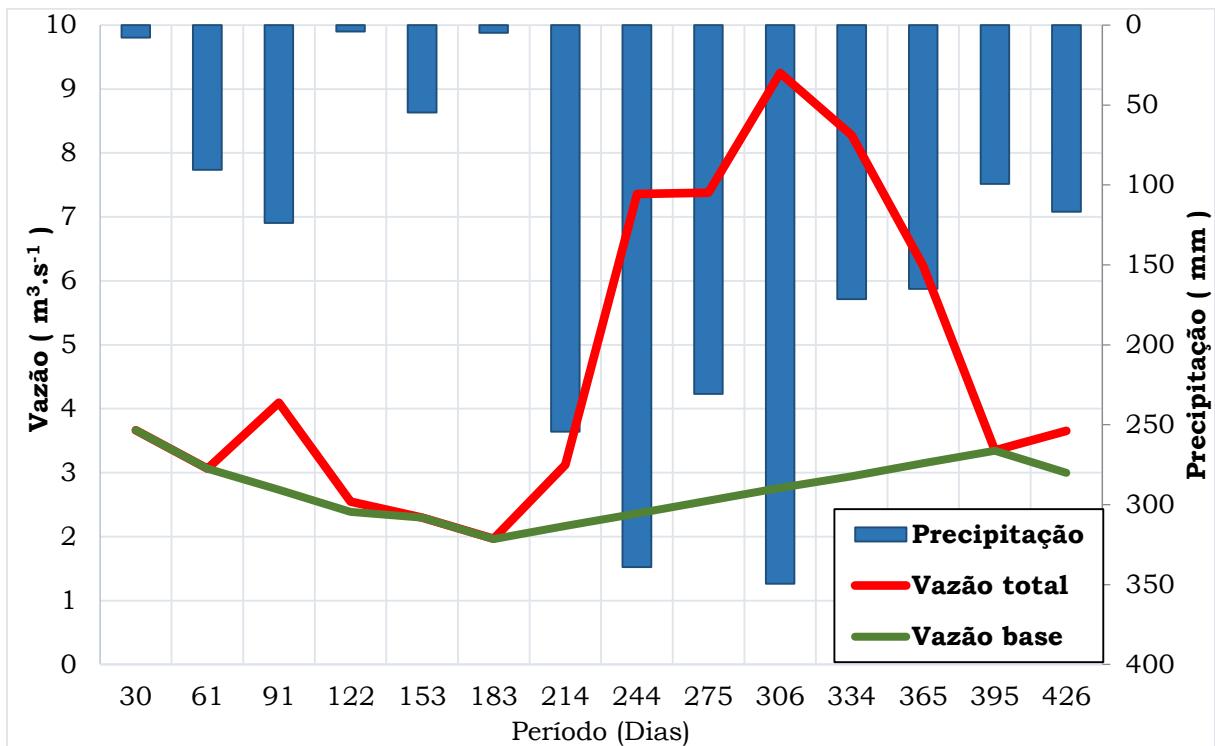
T = tempo acumulado a partir de primeiro de abril (dia).

No período de abril a setembro o escoamento superficial, é quase que na sua totalidade (91,4 %), devido à participação escoamento de base. Por se tratar de um período com baixo índice pluvial, este escoamento, resulta do processo de drenagem do reservatório subterrâneo, pelas calhas dos drenos, que compõem a rede de drenagem da bacia, causando o deplecionamento do lençol de água superficial. Observa-se que ao final do período seco, a vazão de base era 54,2 % da vazão inicial, ou seja, uma redução de 45,8 %, que pode ser considerado pequena. O resultado espelha o elevado grau de inércia apresentado pelo escoamento subterrâneo que é o provedor do escoamento de base, fato que impacta positivamente no grau de regularização do regime de escoamento da bacia.

Para o período de recarga de outubro a abril, produzido pela parcela da precipitação que infiltra no solo e tem como um de seus destinos finais o aquífero superficial, onde permanece armazenada por algum tempo, considerou-se uma variação linear para o processo de recarga na razão de 0,0065 ($m^3.s^{-1}.dia^{-1}$), que foi o valor estimado para a aclividade da reta (MELLO; SILVA, 2013).

O Gráfico-17 representa as precipitações e os valores resultantes para Q_{base} e $Q_{Sup.\text{direto}}$, que foram apresentados na Tabela-4. No gráfico a diferença entre a vazão total e a vazão de base corresponde à parcela do escoamento superficial direto. A representação gráfica permite analisar as respostas do escoamento superficial direto em relação as precipitações mensais.

Gráfico 17 - Fluviograma para a estação P-2, no Alto Ribeirão das Antas.



Fonte: Do autor.

Neste período há a predominância do escoamento superficial direto (57,1 %), enquanto que a participação do escoamento de base é da ordem de 42,9 %. O escoamento de base apesar de ser menor, sinaliza a capacidade da área da bacia em possibilitar a infiltração de boa parte da precipitação e promover a recarga do lençol superficial que sustenta o escoamento de base.

Levando-se em conta o tempo que cada valor de vazão diária média mensal representa (número de segundos do mês) e a área de drenagem para o P-2, estimaram-se os deflúvios em volume que foram convertidos nas lâminas drenadas pelo escoamento de base e superficial direto, para cada mês, valores foram apresentados na Tabela-4. Todo o período de monitoramento corresponde a 1139,1 mm de deflúvio total, a 655,89 mm deflúvio base e a 482,24 mm de deflúvio superficial direto.

Já na escala de tempo anual (Abr/2016 a Mar/2017), o deflúvio total foi de 1018,2 mm. O deflúvio base estimado é 547,5 mm e o deflúvio superficial direto igual a 470,7 mm, ou seja 53,8 % e 46,2 % do deflúvio total respectivamente. O que sinaliza uma predominância do escoamento de base sobre o escoamento superficial direto.

O coeficiente de escoamento superficial obtido pela aplicação da Equação-8, para o período de abri/2016 a Março/2017 foi $C = 0,566$, valor que representa uma elevada capacidade da BHARA em transformar precipitação em escoamento superficial.

Considerando-se ainda que a maioria (53,8 %) do escoamento superficial é originada do escoamento base, de dinâmica menos intensa, devido à grande inércia do escoamento subterrâneo, que é o seu provedor, o que, fundamenta a afirmação que o regime de escoamento apresenta um bom grau de regularização. Nesta linha de raciocínio observa-se que o deflúvio de base no período de seca foi de 273,5 mm, e no período chuvoso 274 mm, valores estes ratificam a afirmação de um regime de escoamento bem equilibrado.

Todos os indicadores estimados convergem para a sustentação de que a bacia apresentou um regime de escoamento superficial bem regular, com valores de vazão de pico atenuados, e valores de vazão mínima elevado, fruto de um regime pluvial, que embora concentrado no período chuvoso, apresentou-se bem distribuição ao longo do mesmo, bem como, da boa capacidade da bacia de infiltrar a maior parte das precipitações, fato que certamente contou com a contribuição positiva da cobertura de mata (nativa ou plantada) conforme também constataram (OLIVEIRA et al., 2014) para a Região da Serra da Mantiqueira, sul de Minas Gerais.

Em termos de sustentabilidade do regime de escoamento, o ideal, é que haja no mínimo a restituição ao aquífero, a lâmina drenada, que pode ser expressa pela taxa de restituição do aquífero (TRAP) estimada a partir da Equação-10, obtendo um $TRAP = 0,326$. O que significa que pelo menos 32,6 % da precipitação deverá ser efetiva, na recarga do lençol superficial, para que se possa ter uma sustentabilidade do regime de escoamento, a superação desta taxa é a ideal.

6.3.2 Análise do regime de escoamento no Ponto-1

O Ponto-1 (P-1), localiza-se à 4,2 km a jusante do vertedouro da Represa de Águas Claras, na calha do Ribeirão da Antas. A área de drenagem é de 76,6 km², situada na região de cabeceira do ribeirão.

Na Tabela-5 encontra-se a síntese das dez campanhas de campo, realizadas durante o processo de monitoramento da vazão e da concentração de sólidos em suspensão, no P-1 do Ribeirão das Antas.

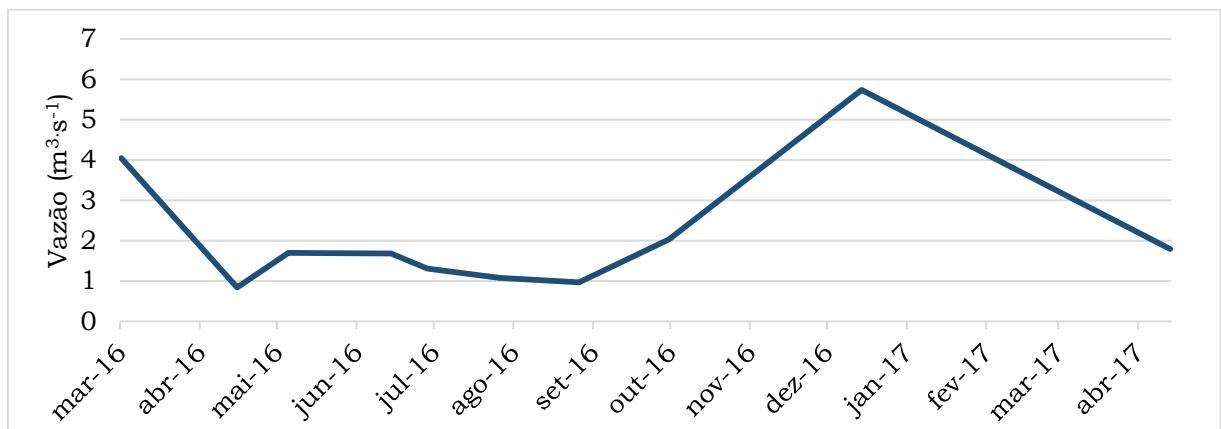
Tabela 5 – Síntese das informações geradas nas campanhas de monitoramento direto no Ribeirão das Antas no P-1.

Data	Hora	Área (m²)	Vazão (m^{3.s⁻¹)}	CSS (mg.L⁻¹)
15-mar-16	9:42	8,72	4,05	20,93
29-abr-16	13:45	6,22	0,84	21,1
19-mai-16	14:40	6,36	1,7	23,3
28-jun-16	13:37	5,83	1,68	9,02
12-jul-16	14:52	5,59	1,31	8,55
9-agosto-16	13:40	4,88	1,08	4,27
9-set-16	13:30	4,83	0,97	48,32
14-out-16	14:12	6,12	2,03	16,5
28-dez-16	9:35	7,68	5,74	53,4
27-abr-17	9:15	7,89	1,79	10,61

Fonte: Do autor.

No Gráfico-18 estão apresentadas as vazões medidas no Ponto P-1 do Alto Ribeirão das Antas, Poços de Caldas-MG.

Gráfico 18 - Vazões medidas diretamente no período de monitoramento no P-1 do Alto Ribeirão das Antas, Poços de Caldas-MG.



Fonte: Do autor.

O Gráfico-19 baseia-se nas vazões Q_{P-1} e Q_{P-2} medidas diretamente, nas mesmas datas nos pontos P-1 e P-2 e então estabeleceu-se uma correlação entre as mesmas, que gerou a Equação-21, desenvolvida e otimizada pela ferramenta Solver® do software Excel® em sua versão 2013.

$$Q_{P-1} = 0,6316 * Q_{P-2}^{0,8346} \quad (21)$$

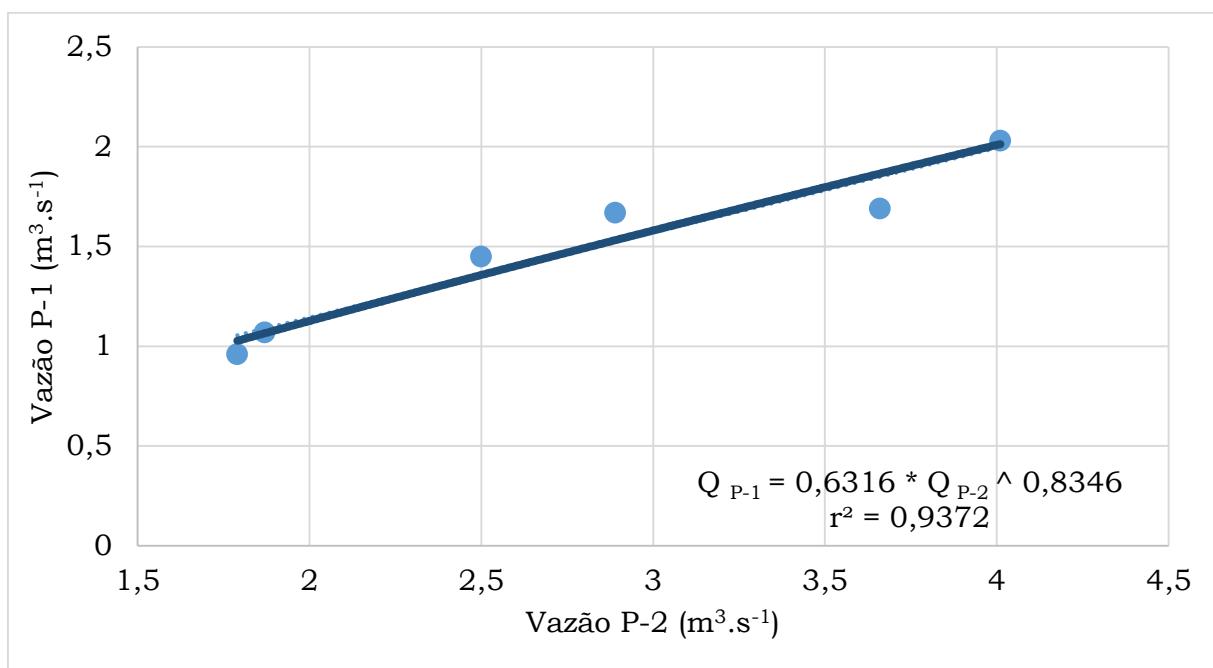
$(r^2 = 0,9372)$

Onde:

Q_{P-1} = vazão no Ponto-1 ($m^3.s^{-1}$);

Q_{P-2} = vazão no Ponto-2 ($m^3.s^{-1}$).

Gráfico 19 – Curva de associação $Q_{P-1}=f(Q_{P-2})$, para o Ribeirão das Antas, Poços de Caldas-MG.

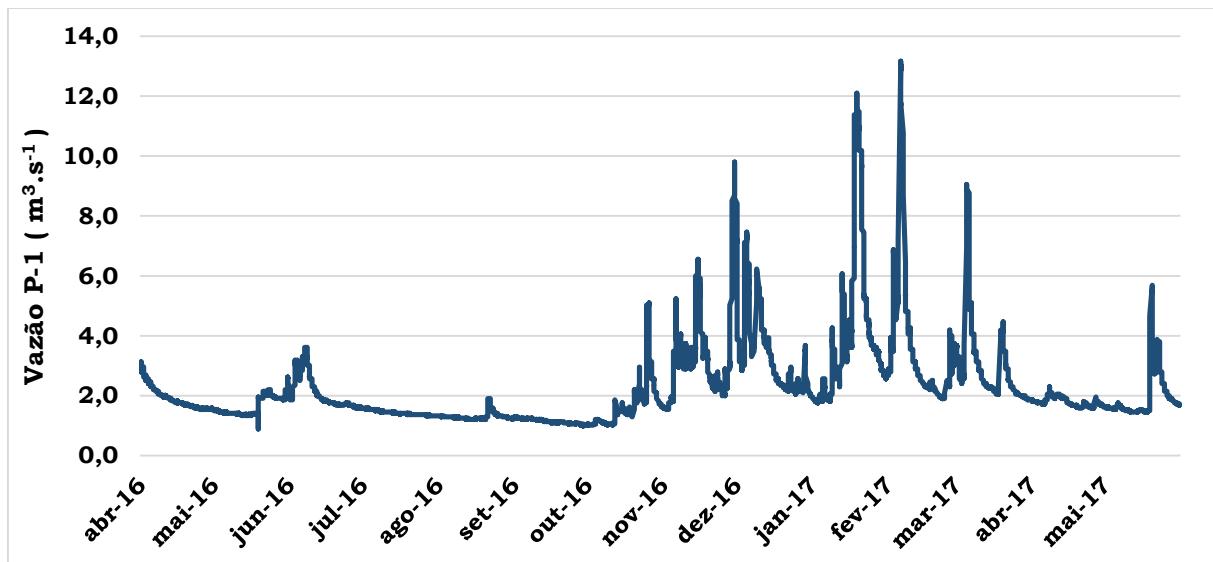


Fonte: Do autor.

O Gráfico-20 origina-se da aplicação da Equação-21, que relaciona as vazões nos dois pontos de monitoramento, permitindo a geração de uma série sintética de vazão para P-1. Esta série sintética de vazão permite estimar algumas propriedades do regime de escoamento e do transporte de hidrossedimentos suspensos no Ponto-1, e consequentemente comparar os

valores da concentração de sólidos em suspensão obtidos nos dois pontos de amostragens.

Gráfico 20 – Fluviograma sintético para a seção P-1 no Alto Ribeirão das Antas.



Fonte: Do autor.

Considerando os intervalos de 30 minutos de registros, a vazão máxima no P-1 foi de $13,17 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, a média de $2,30 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ e a mínima de $0,89 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$. Estes valores associados à área de drenagem para a seção do Ponto-1, que é da ordem de $76,6 \text{ km}^2$, correspondem à rendimentos específicos de $171,87 \text{ L.(s.km}^2\text{)}^{-1}$, $30,09 \text{ L.(s.km}^2\text{)}^{-1}$ e $11,56 \text{ L.(s.km}^2\text{)}^{-1}$ respectivamente $\text{RE}_{\text{máximo}}$, $\text{RE}_{\text{médio}}$ e $\text{RE}_{\text{mínimo}}$, tais resultados foram obtidos por meio da Equação-7.

Ao se comparar estes valores com os estimados para P-1, constata-se uma pequena redução para o $\text{RE}_{\text{máximo}}$, já o $\text{RE}_{\text{médio}}$ é bem próximo do estimado para P-2. O $\text{RE}_{\text{mínimo}}$ do P-1 apresenta-se ligeiramente maior, o que pode ser resultante do efeito de regularização promovido pela Represa de Águas Claras, situada 4,2 km à montante do ponto de amostragem.

No período de monitoramento o deflúvio total foi de $8,2 * 10^7 \text{ m}^3$, o qual associado à área de drenagem para a seção do P-1, corresponde a uma lâmina drenada de 1066,06 mm. O resultado obtido para o deflúvio no P-1 é bastante elevado e muito próximo do estimado para P-2, cujo comportamento já foi analisado por meio do $\text{RE}_{\text{médio}}$ do qual pode ser derivado.

6.3.3 Balanço Hidrológico Simplificado

A Figura 17 ilustra o balanço hídrico e as suas principais componentes de entrada e saída de água. O balanço hídrico é o tópico em hidrologia que visa quantificar todas as componentes envolvidas de entrada e saída de água de um sistema (bacia hidrográfica). A principal entrada de água em uma bacia hidrográfica é a precipitação (P), enquanto que as principais saídas são o escoamento superficial (Q) e as voltas para atmosfera em evaporação e transpiração, também denominada de evapotranspiração (Et). O escoamento superficial representa a “produção” de água pela bacia, medida no exutório.

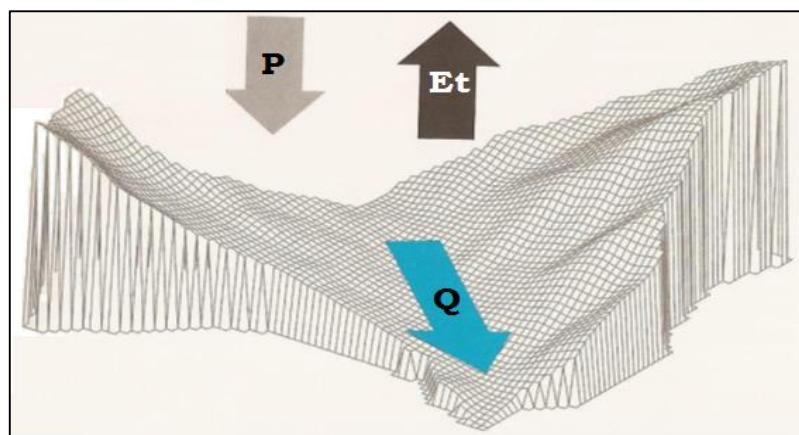


Figura 17 - Relevo de uma bacia hidrográfica e principais entradas e saídas de água, P= precipitação, Et= evapotranspiração e Q= escoamento superficial.

Fonte: COLLISCHONN; TASSI, 2008.

O balanço hidrológico simplificado, considerou apenas as componentes Precipitação (P), Escoamento Superficial (Q) e Evapotranspiração (Et) e supôs nula a variação de armazenamento no período analisado. Assim sendo, aplicando-se a Equação-11 obteve-se a Evapotranspiração da BHARA, $Et = 872,6 \text{ mm}$.

Este é um valor relativamente baixo e representa um coeficiente de evapotranspiração $C_{ET} = 0,434$, o que demonstra uma maior participação do deflúvio, valor obtido da razão da evapotranspiração pela precipitação. Este resultado pode ser analisado, com base nas condições climáticas que prevalecem na região. A altitude média bacia é da ordem de 1370 m, o que

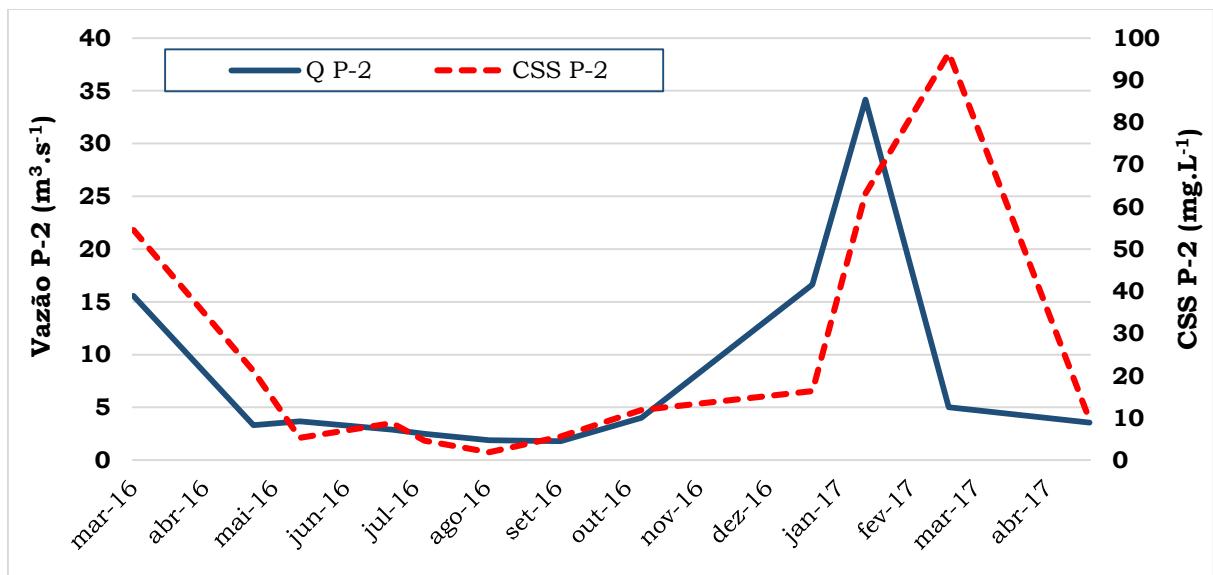
reduz a temperatura média e, portanto, o fluxo de água no processo de evapotranspiração.

6.4 RESULTADOS SEDIMENTOS SUSPENSO DA BHARA

6.4.1 Concentração de Sedimento Suspenso, Ponto-2

No Gráfico-21 estão representadas as campanhas medição direta realizadas no ponto de monitoramento P-2, e os respectivos valores das concentrações de hidrossedimento suspenso (CSS_{P-2}) e das vazões (Q_{P-2}), que já foram apresentados na Tabela-4. No P-2 as CSS_{P-2} variaram entre os valores de $1,86 \text{ mg.L}^{-1}$ a $96,46 \text{ mg.L}^{-1}$.

Gráfico 21 - Resultados da CSS_{P-2} e Q_{P-2} aferido diretamente no Ponto P-2 do Alto Ribeirão das Antas, Poços de Caldas – MG.



Fonte: Do autor.

O Gráfico-22, curva de chave $CSS_{P-2}=f(Q_{P-2})$ foi produzido utilizando os resultados obtidos para CSS_{P-2} e de Q_{P-2} , o qual gerou a Equação-22 desenvolvida e otimizada pela ferramenta Solver® do software Excel® em sua versão 2013. O coeficiente de determinação ($r^2 = 0,9214$) sinaliza a potencialidade do modelo para estimar valores com bom grau de confiabilidade.

$$\text{CSS}_{P-2} = 20,719 * \ln Q_{P-2} - 12,181 \quad (22)$$

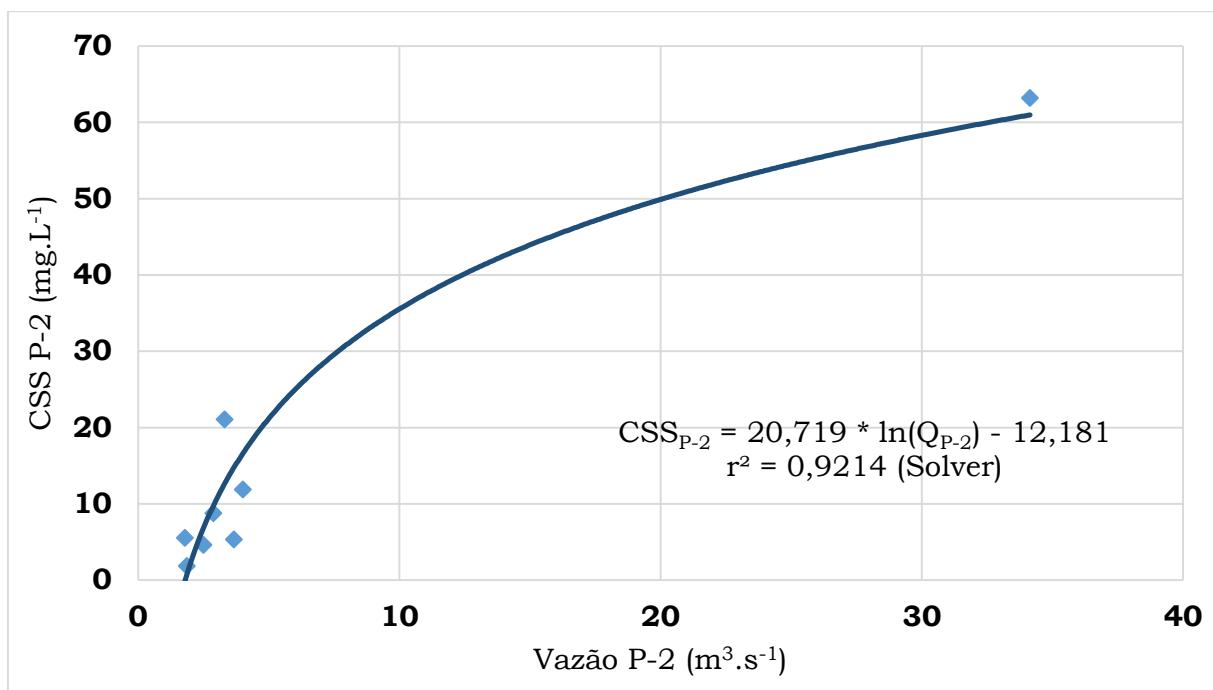
($r^2 = 0,9214$)

Onde:

CSS_{P-2} = concentração de sedimento suspenso, Ponto-2 (mg.L^{-1});

Q_{P-2} = vazões no Ponto-2 ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$).

Gráfico 22 – Curva de calibração $\text{CSS}_{P-2}=f(Q_{P-2})$, para seção P-2, no Alto Ribeirão das Antas - Poços de Caldas-MG.



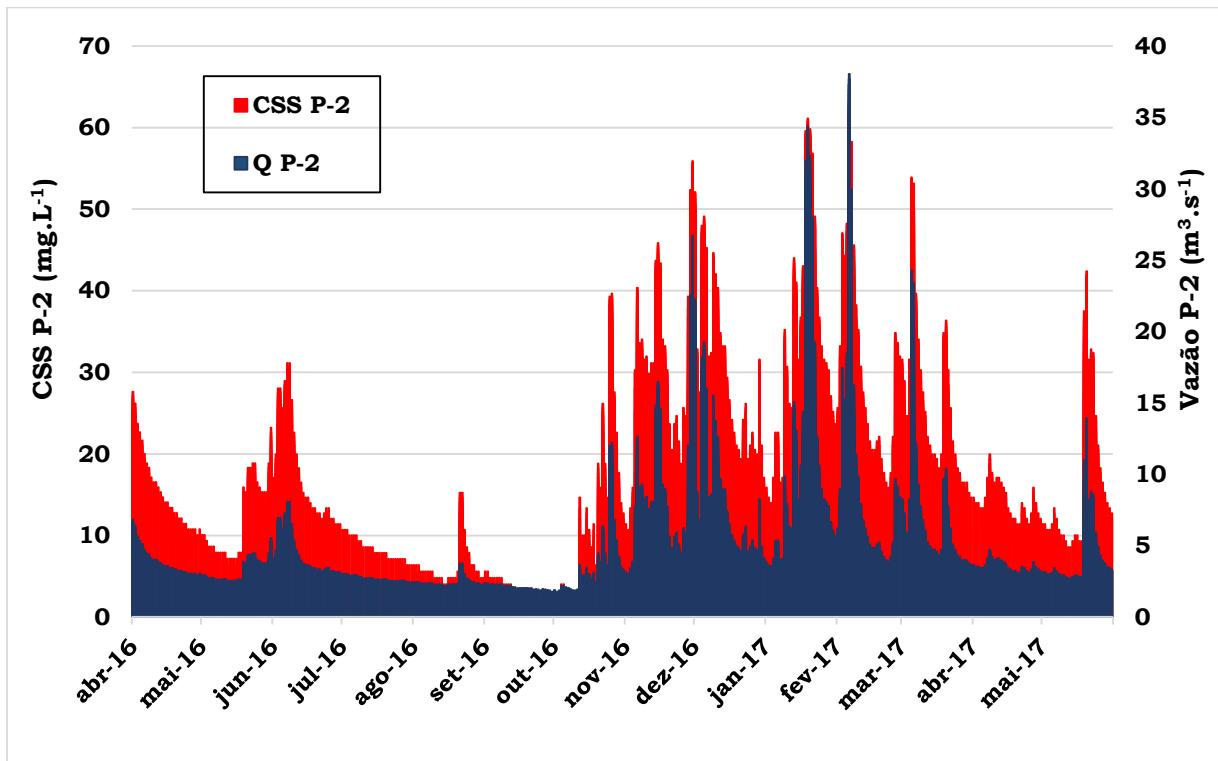
Fonte: Do autor

Segundo (MERTEN et al., 2007) é importante ressaltar que a eficiência do método aplicado depende fundamentalmente, da qualidade dos dados utilizados par compor a curva-chave tornando-se ideal que os mesmos representem uma vasta faixa de deflúvios, incluindo os eventos extremos.

Carvalho (2008) afirma que a representatividade da curva-chave será tanto maior, quanto maior for o número de pontos utilizados e maior a amplitude de variação entre os mesmos.

O Gráfico-23 apresenta os resultados das estimativas das CSS_{P-2} para todo o período da pesquisa e o fluviograma da seção de monitoramento P-2. A CSS_{P-2} representada é oriunda da Equação-22.

Gráfico 23 - Resultados da CSS_{P-2} e Vazão_{P-2} contínuos em intervalos de 30 minutos, para a seção P-2 do Alto Ribeirão das Antas, Poços de Caldas - MG.



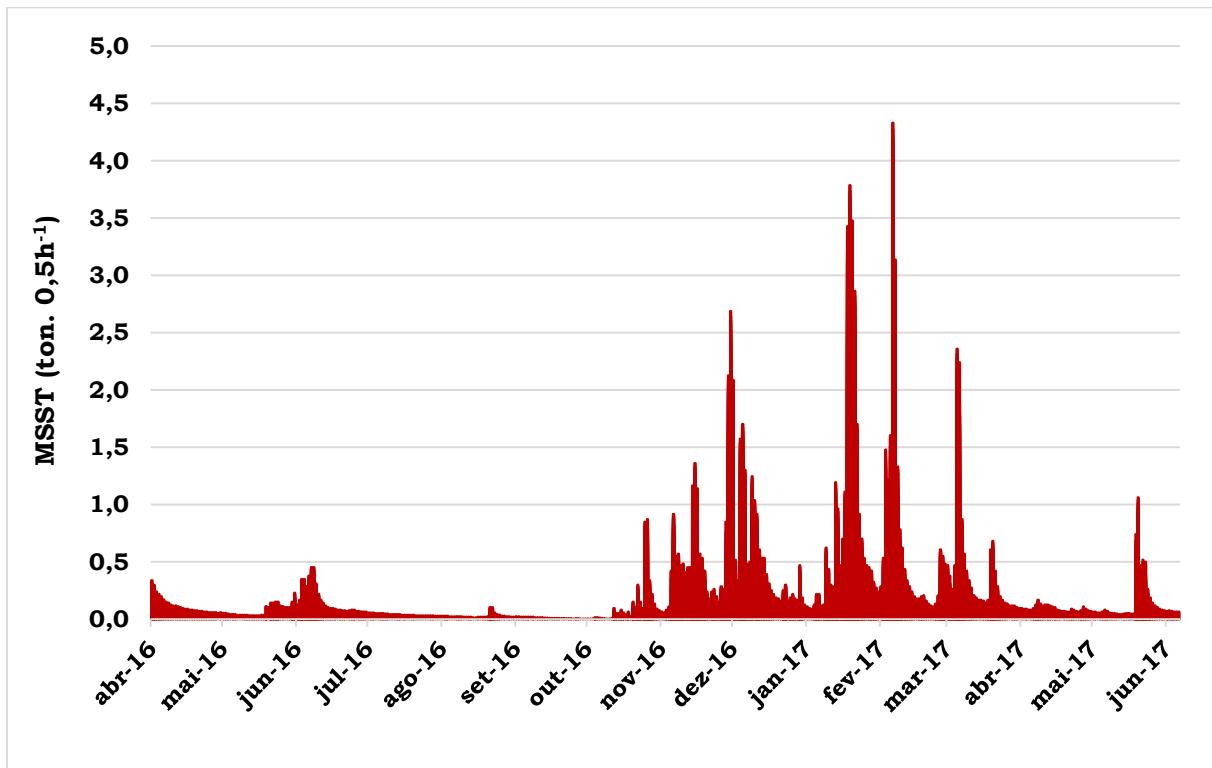
Fonte: Do autor

A análise de todos os dados de CSS_{P-2} obtidos para o intervalo de 30 minutos, permitiu identificar o valor máximo de 67,67 mg.L⁻¹, o médio de 17,91 mg.L⁻¹ e o mínimo de 0,0 mg.L⁻¹. Porém, o mais relevante é a estimativa da taxa de transporte de sedimentos em suspensão, ou seja, a massa de sedimentos transportados num intervalo de tempo.

O Gráfico-24 apresenta distribuição temporal da Massa de Sedimentos em Suspensão Transportados (MSST), a cada 30 minutos ao longo do período de monitoramento, além do fluviograma. Dentre os valores estimados, destacam-se o valor máximo de 4465 kg (4,46 ton), o valor médio de 244 kg e 0,0 kg como mínimo. A MSST nos intervalos de 30 minutos foi obtida por meio da Equação-15.

Considerando a taxa máxima de transporte em 30 minutos, ao final de um dia, a massa transportada equivaleria à 214,3 ton.dia⁻¹, ou ainda à 78230,4 ton.ano⁻¹, ou, à 5,13 ton.(ha.ano)⁻¹, que naturalmente seriam taxas extremamente elevadas o que representa situação de alerta em termos ambientais.

Gráfico 24 – Estimativa de MSST em intervalos de 30 minutos para a seção P-2 no Ribeirão das Antas, Poços de Caldas-MG.



Fonte: Do autor.

Já, levando-se em conta a taxa média para o intervalo de 30 minutos, resultaria $11,71 \text{ ton.dia}^{-1}$, $4272,7 \text{ ton.ano}^{-1}$, ou ainda $0,280 \text{ ton.(ha.ano)}^{-1}$. Este valor médio estimado é relativo a um período de 426 dias, incluindo, neste caso dois meses (abril e maio/2017) do período seco, o que resulta numa redução do valor representativo para um ano.

A massa de sólidos suspensos transportada num determinado período de monitoramento pode ser estimada pelo somatório da Equação-15, que está exemplificado na Equação-16.

Na Tabela-6, estão apresentados os valores obtidos de massa sólida suspensa transportada, na escala mensal de tempo. O total estimado de sedimento suspenso transportado no período avaliado equivale a 5104,8 ton.

Tabela 6 – Massa de Sólidos Suspensos Transportados na seção P-2 do Ribeirão das Antas, Poços de Caldas–MG.

Mês	MSST (ton)
Abr-16	188,5
Mai-16	116,9
Jun-16	225,1
Jul-16	60,9
Ago-16	40,3
Set-16	14,0
Out-16	139,3
Nov-16	761,3
Dez-16	720,1
Jan-17	1123,7
Fev-17	875,0
Mar-17	518,3
Abr-17	134,9
Mai-17	186,6
TOTAL	5104,8

Fonte: Do autor.

A análise dos resultados permite destacar o mês de setembro como de menor taxa de transporte mensal de sedimentos (14 ton.mês^{-1}) ou 0,3 % da taxa anual de transporte, situação coerente com os regimes pluvial e de escoamento, que apontam, setembro como o de menor precipitação e de menor deflúvio mensal. Identifica-se nos resultados o mês de janeiro com a maior taxa de transporte mensal de sedimentos ($1123,7 \text{ ton.mês}^{-1}$) ou 23,5 % da taxa anual de transporte, o que também reflete o regime pluvial e de escoamento superficial, que evidenciam o mês de janeiro, como o de maior precipitação e deflúvio superficial, que são os agentes ativos do processo de transporte de sedimentos.

Considerando-se todo o período de estudo, o valor de 5104,8 ton, corresponde à $11,983 \text{ ton.dia}^{-1}$, ou, $4373,9 \text{ ton.ano}^{-1}$, ou ainda à $0,287 \text{ ton.(ha.ano)}^{-1}$.

Já, considerando-se o período de abril/2016 a março/2017 como um ano hidrológico “invertido”, que se inicia no período seco e finda no fim do

período úmido, com seis meses para cada estação, o total anual é de 4.783,4 ton.ano⁻¹. Observa-se que a massa de sólidos transportados em suspensão na estação seca é de 645,7 ton, ou seja, 13,5 % do transportado no ano. Portanto, a estação chuvosa participou com 86,5 % da massa de sedimentos transportadas no ano, que é um reflexo da concentração dos regimes de chuva e de escoamento neste período.

Considerando ainda o período anual, e a respectiva estimativa de massa transportada, de 4783,4 ton, que ao ser distribuída sobre a área de drenagem (15240 ha), resulta em 0,314 ton.(ha.ano)⁻¹.

Durães; Coelho Filho; Oliveira (2016) estimaram a descarga de sólidos em suspensão na parte Alta da Bacia do Rio Iguaçu, com valores entre 0,47 ton.ha⁻¹.ano⁻¹ a 5124 ton.ha⁻¹.ano⁻¹. Esta amplitude de variação dos valores, é explicada pela diversidade de uso e da intensidade de intervenção antrópica, sendo os valores maiores associados a áreas altamente urbanizadas. Os valores menores correspondem as áreas com menores declividades e com participação expressiva de cobertura vegetal de mata, situação mais próxima da área em estudo.

Segundo Lima et al. (2003), a Bacia Hidrográfica do Alto Antas apresenta uma baixa taxa de transporte de sedimento suspenso. Pois segundo a classificação propostas pelos autores, taxa inferior a 0,70 ton.(ha.ano)⁻¹ é considerada baixa.

6.4.2 Taxa de Transferência de Sedimentos Suspensos

A Taxa de Transferência de Sedimentos Suspensos (TTSS) representa a relação entre a Massa de Sólidos Suspensos Transportados (MSST) e a Perda de Solo por Erosão Hídrica (PSEH).

A MSST diz respeito ao sedimento em suspensão transportado na bacia hidrográfica e contabilizado na seção de controle da bacia. Enquanto que a PSEH corresponde à perda média de solo na bacia hidrográfica, e pode ser obtida com base no mapa de perda de solo anual. Assim a estimativa da TTSS foi obtida através da Equação-17.

Para o presente estudo considerou-se os resultados obtidos por (PURCINO, 2017) para os Solos da sub-bacia do Córrego Chapadão, que se insere dentro da bacia do Ribeirão das Antas, que estimou perdas médias de 17,78 ton.ha⁻¹.ano⁻¹ para o Cambissolo (CX); de 18,00 ton.ha⁻¹.ano⁻¹ para o Neossolo Regolítico (RL), de 10,22 ton.ha⁻¹.ano⁻¹ para o Latossolo Vermelho Amarelo (LVA) e de 4,18 ton.ha⁻¹.ano⁻¹ para os Solos Indiscriminados de Várzea (SIV). Ponderando-se estes valores com suas áreas de ocorrência, estima-se em 11,17 ton.ha⁻¹.ano⁻¹ as perdas médias de solo na BHARA.

Portanto, considerando-se apenas o transporte de sedimentos em suspensão, obtida por meio da Equação-17, resulta uma TTSS de:

$$\text{TTSS} = \frac{0,314}{11,17} * 100 = 2,81 \%$$

Apesar da TTSS apresentar baixo valor, a taxa situa-se dentro dos valores indicados por (BESKOW et al., 2009) para a região do Alto Rio Grande, também na região do Sul de Minas, com condições ambientais e climáticas muito próximas a da BHARA.

6.4.3 Taxa de Transporte de Sedimento Suspenso, via Turbidez

Com os resultados da CSS_{P-2} obtidos no monitoramento direto, por meio de amostras coletadas com o DH-48 e os valores de turbidez (TURB) registrados simultaneamente ao processo de coleta da amostra. Estabeleceu-se mais uma curva-chave, da relação entre as concentração de sedimento suspenso e as medidas do sensor óptico de turbidez, sendo denominada CSS_{P-2}=f(TURB).

O Gráfico-25 exibe a curva-chave CSS_{P-2}=f(TURB), que gerou a Equação-23, desenvolvida e otimizada pela ferramenta Solver® do software Excel® em sua versão 2013. Neste caso o alto valor de r² (0,9713) possibilita afirmar que as estimativas realizadas devem apresentar bom grau de confiabilidade.

$$CSS_{P-2} = -0,0024 * TURB^2 + 1,0157 * TURB - 7,0284 \quad (23)$$

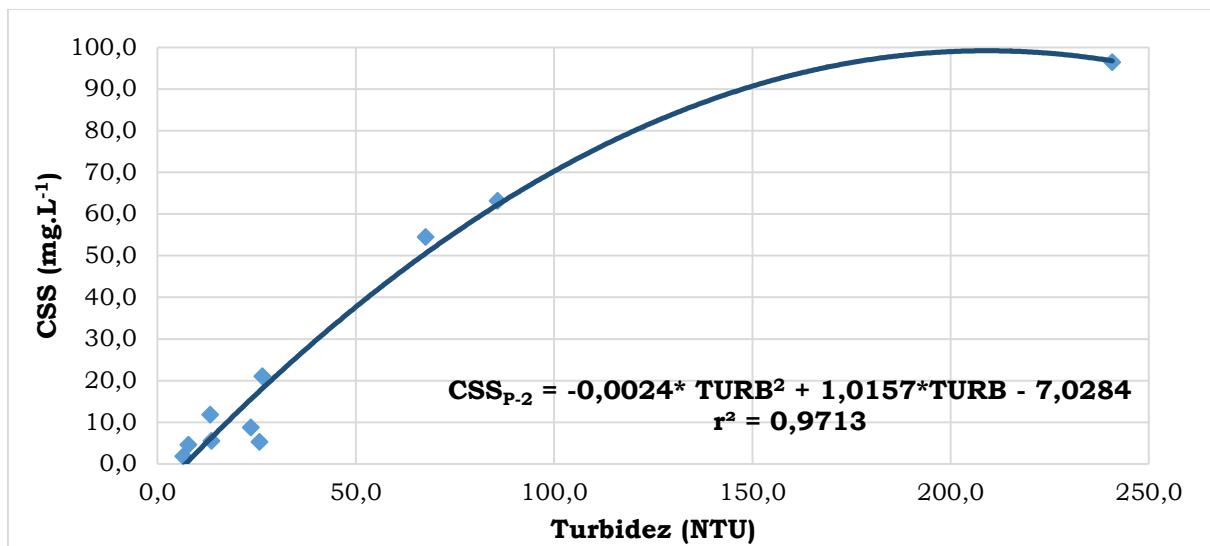
$(r^2 = 0,9713)$

Onde:

CSS_{P-2} = concentração de sedimento suspenso, Ponto-2 (mg.L⁻¹);

TURB = registro de turbidez na estação no Ponto-2 (NTU).

Gráfico 25 – Curva de calibração CSS_{P-2}= f (TURB) para a seção P-2 do Alto Ribeirão das Antas, Poços de Caldas – MG.



Fonte: Do autor.

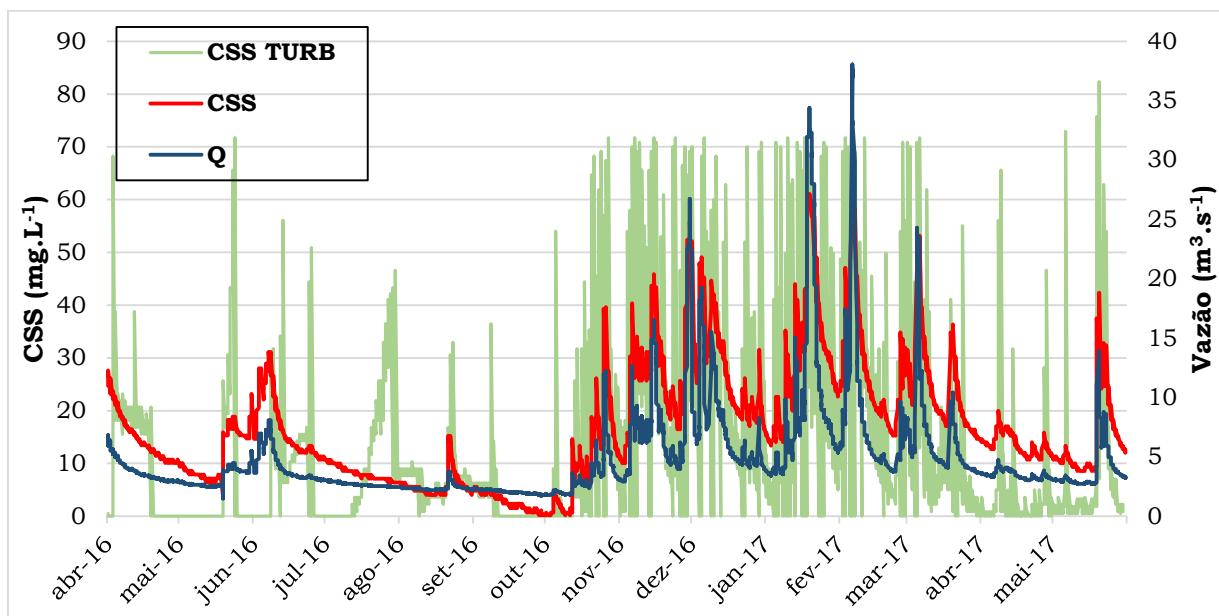
Durante o período de monitoramento (abril/2016 a maio/2017) o sensor de turbidez apresentou situações que culminaram na eliminação de alguns registros, seja por registro de valores muito elevados, como acima de 500 NTU, seja por colapso do alimentador de energia do sistema. No primeiro caso, a situação prevaleceu nos primeiros meses de monitoramento, que foi assim considerado como de adaptação e aperfeiçoamento do processo. Dentre as situações que mereceram ajustes destaca-se o posicionamento do sensor em relação ao sentido do fluxo de água e ao fundo e margens da calha do Ribeirão. Outro ponto a destacar foi a constatação da necessidade de uma limpeza periódica, quase que quinzenal, do sensor de turbidez, que vai acumulando material no seu entorno, principalmente na parte que emite/recebe o feixe de luz levando a registrar de modo errôneo valores elevados de turbidez.

Desta forma considerando os descartes ocorridos que totalizaram aproximadamente 1/3 do número potencial de registros, utilizou-se a Equação-23 para estimar a CSS no P-2 durante o período de monitoramento, tendo-se como dados de entrada a Turbidez registrada pelo sensor a cada 30 minutos, $CSS_{P-2} = f(TURB)$. Os valores estimados estão apresentados no Gráfico-26, onde também se encontram as vazões e a $CSS_{P-2} = f(Q_{P-2})$, para permitir uma avaliação visual dos valores estimados.

Como existiram falhas no registro de turbidez a curva de calibração $CSS_{P-2}=f(TURB)$ apresenta descontinuidade, fato que também limita a estimativa contínua da massa de sólidos suspensos transportados por esta alternativa. Entretanto, considerando-se que os registros utilizados, representam mais de 66% do número de registros do período de monitoramento, consegue-se estimar alguns valores de referência que permitem uma avaliação inicial do potencial do sensor de turbidez em monitorar o transporte de sólidos em suspensão.

O Gráfico-26 apresenta os valores estimados pela curva-chave da turbidez $CSS_{P-2}=f(TURB)$, pela curva-chave da vazão $CSS_{P-2} = f(Q_{P-2})$ e as vazões correspondentes.

Gráfico 26 - Fluviograma e Concentração de Sólidos em Suspensão estimados em função da Vazão e da Turbidez para a estação P-2 do Alto Ribeirão das Antas, Poços de Caldas-MG.



Fonte: Do autor

Os valores máximo e médio da $CSS_{P-2}=f(TURB)$ foram 70,88 mg.L⁻¹ e 16,83 mg.L⁻¹ respectivamente, os quais são muito próximos dos estimados pelo modelo $CSS_{P-2}=f(Q_{P-2})$, (67,7 mg.L⁻¹ e 17,91 mg.L⁻¹, respectivamente) o que sinaliza uma boa performance do sensor de turbidez.

Em termos de massa de sólidos suspensos transportados (MSST) oriundo da concentração de sedimentos suspenso via turbidez, adotou-se o mesmo procedimento de estimativa, empregando-se as Equação-15 e Equação-16.

Assim sendo, para os intervalos de 30 minutos a $CSS_{P-2}=f(TURB)$ estimou uma taxa máxima de 4,08 ton.0,5h⁻¹, equivalente a 195,71 ton.dia⁻¹ e igual à 4,69 ton.(ha.ano)⁻¹. A taxa média foi de 0,22 ton.0,5h⁻¹, ou 10,76 ton.dia⁻¹; ou 3926,2 ton.ano⁻¹, ou ainda à 0,258 ton.(ha.ano)⁻¹. Estas estimativas são bem próximas dos resultados obtidos pelo monitoramento direto, através da curva-chave $CSS_{P-2}=f(Q_{P-2})$.

A relação entre os valores de MSST estimado com base na curva de calibração $CSS_{P-2}=f(TURB)$ e o estimado com base na curva de calibração $CSS_{P-2}=f(Q_{P-2})$, ou seja:

$$\frac{MSST (CSS_{P-2}=f(TURB))}{MSST (CSS_{P-2}=f(Q_{P-2}))} = \frac{0,258}{0,287} = 0,899 \text{ ou } 89,9 \%$$

Sinaliza que a estimativa da MSST, pelo método da turbidez, $CSS_{P-2}=f(TURB)$, Equação-23, no período como um todo, foi de 89,9 % daquela estimada pela $CSS_{P-2}=f(Q_{P-2})$, Equação-22.

Estes resultados sinalizam de forma positiva, para um bom desempenho do sensor de turbidez, nas condições deste estudo, fato que deve continuar a ser aferido, de forma exaustiva e criteriosa, pois, a ser confirmada esta performance, ter-se-á um instrumental estratégico para o monitoramento do transporte de sólidos em suspensão.

6.4.4 Concentração de Sedimento Suspenso, Ponto-1

As concentrações de hidrossedimento suspenso e as vazões aferidas diretamente no Ponto-1 apresentaram valores que variam de 4,27 mg.L⁻¹ a 53,40 mg.L⁻¹, e entre 0,84 m³.s⁻¹ e 5,74 m³.s⁻¹ respectivamente. Estes resultados obtidos e apresentados na Tabela-5 permitiram a construção da curva-chave, fornecendo a Concentração de Sedimento Suspenso no P-1 (CSS_{P-1}) em função da vazão no P-1 (Q_{P-1}) do Ribeirão das Antas.

O Gráfico-27 apresenta a curva-chave CSS_{P-1}=f(Q_{P-1}) que produziu a Equação-24, desenvolvida e otimizada pela ferramenta Solver® do software Excel® em sua versão 2013. O alto valor de r² (0,8446) possibilita concluir que as estimativas obtidas são adequadas.

$$CSS_{P-1} = 2,0364 * Q_{P-1}^2 - 4,7845 * Q_{P-1} + 13,699 \quad (24)$$

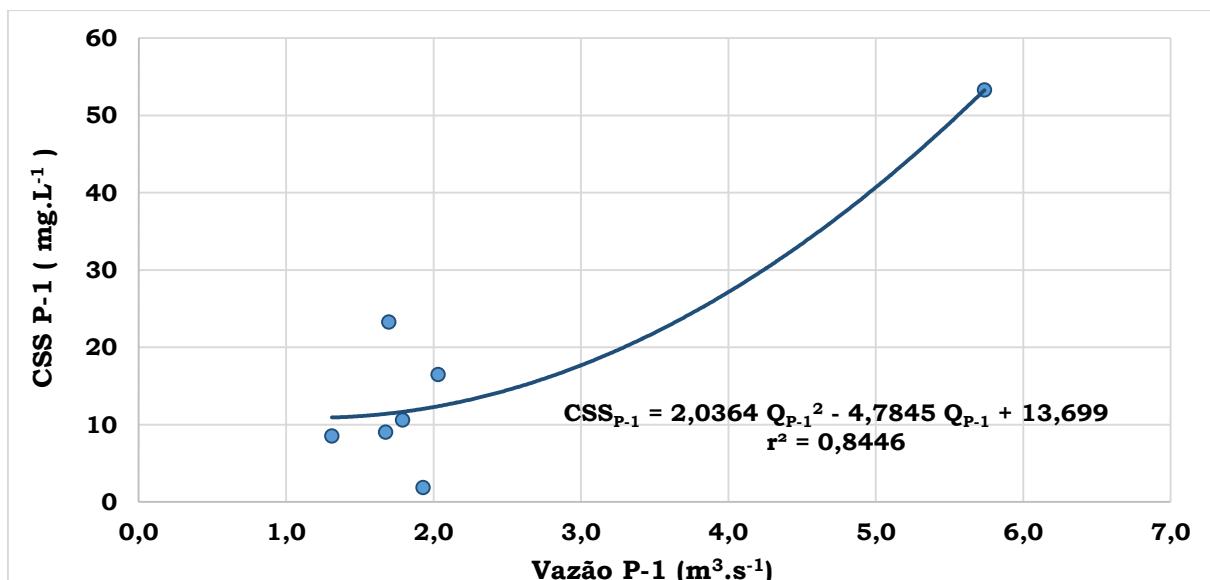
$$r^2 = 0,8446$$

Onde:

CSS_{P-1} = concentração de sedimento suspenso, Ponto-1 (mg.L⁻¹);

Q_{P-1} = vazão no Ponto-1 (m³.s⁻¹).

Gráfico 27 – Curva-chave CSS_{P-1}=f(Q_{P-1}), para seção P-1 do Alto Ribeirão das Antas, Poços de Caldas-MG.



Fonte: Do autor.

6.5 RESULTADOS SEDIMENTOS DE LEITO DA BHARA

A mensuração direta do sedimento de leito nos Ponto-1 e Ponto-2 ocorreram em todas as campanhas de campo realizadas, com a utilização do amostrador BLH-84. Ao total foram 24 coletas entre os meses de abril de 2016 a abril de 2017, observou-se que no período de baixo escoamento superficial não é possível a mensuração do transporte de sedimento de leito.

6.5.1 Transporte de Sedimento de Leito, Ponto-2

A síntese dos dados observados e dos resultados obtidos nas campanhas de campo para o Ponto-2 encontra-se na Tabela-7. Os valores das descargas de sedimentos de leito (CSL_{P-2}) foram estimados aplicando a Equação-18 (CARVALHO, 2008).

Tabela 7 - Síntese do processo de medições diretas de sedimento de leito no Ponto-2 do Alto Ribeirão das Antas, Poços de Caldas – MG.

Data	Vazão (m³.s⁻¹)	Tempo (min)	Largura (m)	C.S. LEITO (mg)	C.S. LEITO (kg.dia⁻¹)
29-abr-16	3,32	7	8,70	228,10	0,78
19-mai-16	3,66	7	8,50	1654,50	5,51
30-jun-16	2,89	7	8,45	1,69	0,01
24-jun-16	2,89	4	8,45	Sem material	-
12-jul-16	2,50	30	8,60	123,70	0,68
9-agosto-16	1,87	80	8,56	Sem material	-
9-set-16	1,79	68	9,00	Sem material	-
14-out-16	4,01	62	9,00	91,80	0,26
27-dez-16	16,64	71	10,00	450,20	1,22
19-jan-17	34,15	105	10,42	3455000,00	940,44
24-fev-17	5,00	80	10,00	Sem material	-
26-abr-17	3,55	88	9,00	Sem material	-

Fonte: Do autor.

Em relação às amostragens de sedimentos de leito no P-2, os valores de descarga sólida variaram da máxima de 940,44 kg.dia⁻¹ para uma vazão de 34,15 m³.s⁻¹ em janeiro de 2017, à mínima corriqueira em certo período do estudo, de 0 ton.dia⁻¹.

O Gráfico-28 origina-se do monitoramento da concentração de sedimento de leito (CSL_{P2}) e das correspondentes vazões (Q_{P-2}), apresentados na Tabela-7. Os dados da curva de calibração, $CSL_{P-2}=f(Q_{P-2})$, geraram a Equação-25, que possibilita estimar a concentração de sedimento de leito por meio dos dados de vazão do P-2, desenvolvida e otimizada pela ferramenta Solver® do software Excel® em sua versão 2013. O alto valor de r^2 possibilita concluir que as estimativas obtidas são satisfatórias.

$$CSL_{P-2} = 27,009 * Q_{P-2} - 123,61 \quad (25)$$

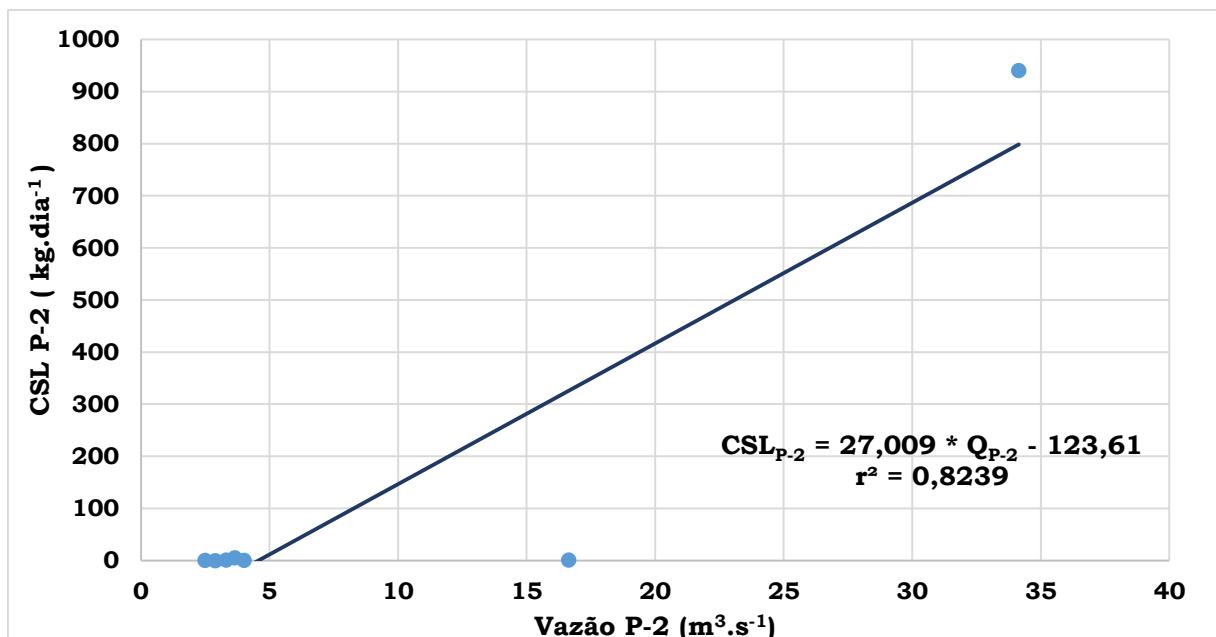
$$r^2 = 0,8239$$

Onde:

CSL_{P-2} = concentração de sedimento de leito, Ponto-2 (kg.dia⁻¹);

Q_{P-2} = vazão no Ponto-2 (m³.s⁻¹).

Gráfico 28 - Curva de Calibração $CSL_{P-2}=f(Q_{P-2})$ para a estação P-2 do Alto Ribeirão das Antas, Poços de Caldas - MG.

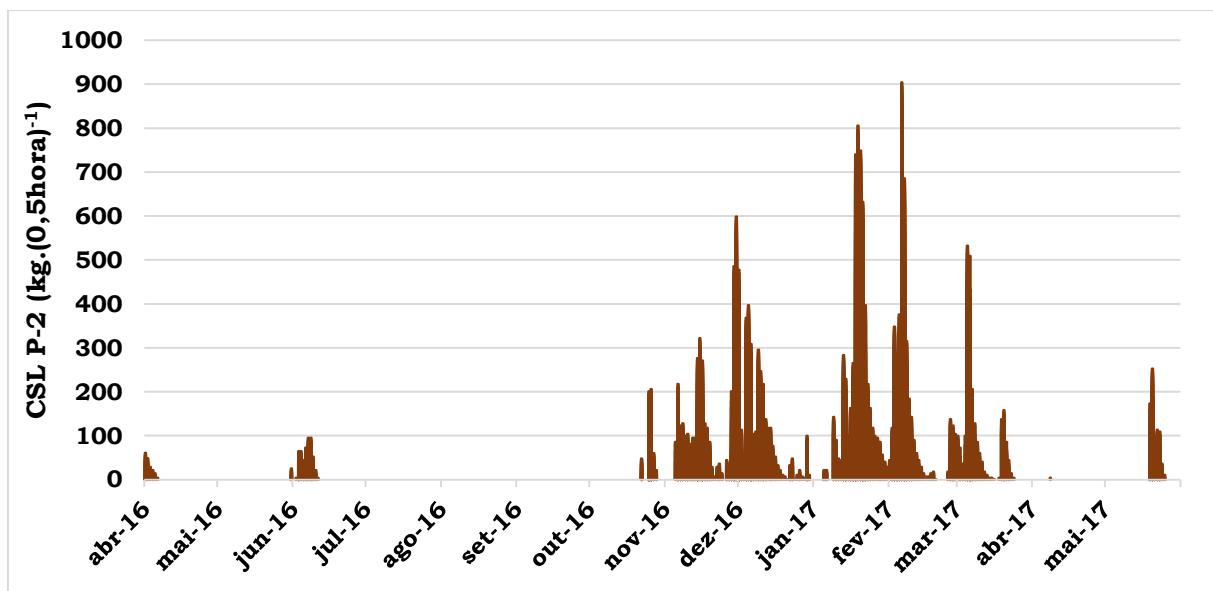


Fonte: Do autor.

Os valores de CSL_{P-2} foram estimados para todo o período da pesquisa, a partir da curva-chave (Equação-25), tendo-se como dado de entrada as vazões estimadas no Ponto-2 (Q_{P-2}).

O Gráfico-29 apresenta o resultado da concentração de sedimento de leito no P-2 em intervalos de 30 minutos, obtidos por meio da Equação-25. A análise dos resultados permite afirmar que a maior taxa de transporte de sedimento de fundo foi de $1,808 \text{ ton.hora}^{-1}$, registrado simultaneamente a uma vazão de $34,3 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ e ocorreu na data de 06 de fevereiro de 2017. Também foi possível observar que na seção P-2 do Alto Ribeirão das Antas o transporte de sedimento de leito só se verifica para vazões iguais ou maiores que $4,22 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, sendo importante ressaltar que a afirmativa é válida apenas para a referida seção.

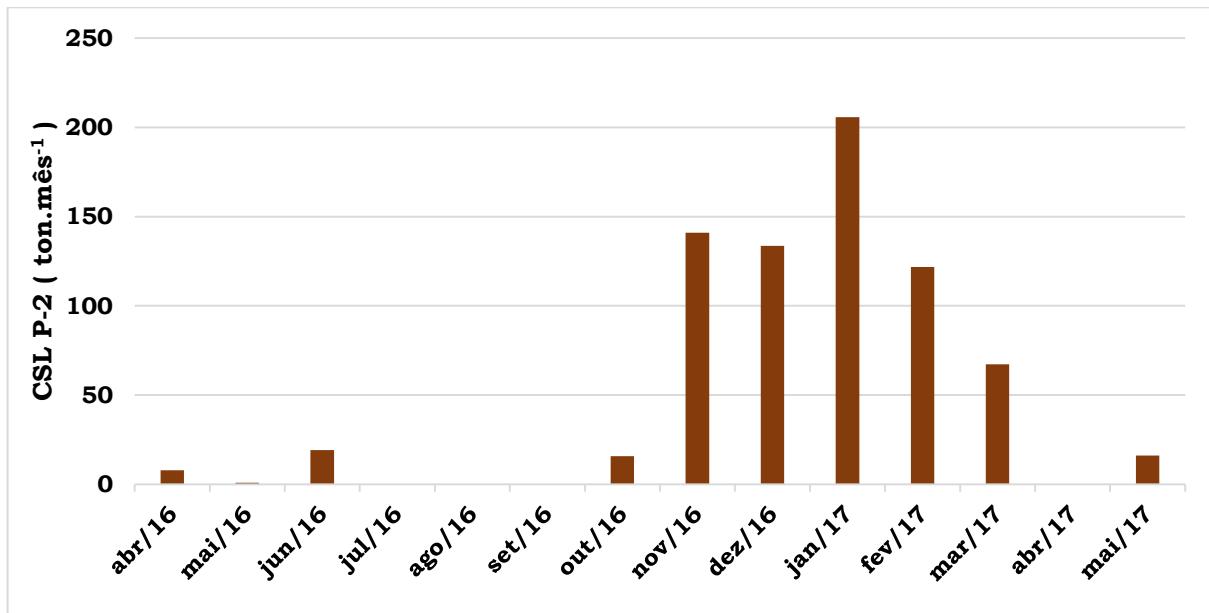
Gráfico 29 - Transporte de CSL_{P-2} a cada 30 minutos, na seção P-2 do Alto Ribeirão das Antas, Poços de Caldas - MG.



Fonte: Do autor.

No Gráfico-30 montado na escala mensal, o transporte de hidrossedimento de leito mensal máximo ocorreu em janeiro de 2017, carreando aproximadamente $205,7 \text{ ton.mês}^{-1}$. Nos meses de julho, agosto e setembro de 2016, não houve carreamento de sedimento de fundo.

Gráfico 30 - Descarga mensal de Sedimento de Leito (CSL_{P-2}) na seção P-2 do Ribeirão das Antas, Poços de Caldas-MG.



Fonte: Do autor.

As estimativas realizadas apresentaram um transporte de sedimento de leito total equivalente 729,03 ton, ocorrendo o carreamento em apenas 135 dias do total de 426 dias avaliados, o correspondente a uma média de 5,37 ton.dia⁻¹.

A análise granulométrica do material de fundo carreado, aponta que 98,5 % do material transportado, são pedregulho fino e areia grossa. Embora a escala mensal sinalize que apenas em dois meses, não houve descarga sólida, quando se analisa escala diária, identifica-se que o transporte do material efetivamente se deu em 157 dias, no restante dos 269 dias da pesquisa a estimativa de CSL_{P-2} foi de 0 ton.dia⁻¹.

Quando se considera esta informação, em termos de frequência ($157/426 = 0,368$), significa que em 36,8 % do período houve transporte de sedimento de fundo. Ao se associar esta frequência com a curva de permanência das vazões no período de estudo, identifica-se que valores iguais ou maiores que $4,22 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ permanecem em 36,8 % do período, o que permite identificar este valor como o mínimo capaz de promover o arraste de sedimento de fundo.

Nessa linha, avaliações de descarga de leito com a utilização do amostrador BLH-84 foram realizadas por (OLIVEIRA et al., 2014) o qual encontrou valores para sedimento de leito da ordem de 9,0 ton.dia⁻¹ para vazões entre 0,088 m³.s⁻¹ e 0,430 m³.s⁻¹. Merten et al. (2008) estimaram valores entre 0,16 ton.dia⁻¹ e 9,16 ton.dia⁻¹ para vazões que variaram de 0,4 m³.s⁻¹ a 1,3 m³.s⁻¹, informações estas que dão sustentação às geradas neste estudo.

6.5.2 Transporte de Sedimento de Leito, Ponto-1

As concentrações de sedimento de leito (CSLP_{P-1}) no Ponto-1 apresentaram valores de descarga sólida variando da mínima de 0,25 ton.dia⁻¹ para uma vazão de 1,67 m³.s⁻¹, até a máxima de 3,47 ton.dia⁻¹ para uma vazão de 2,5 m³.s⁻¹. Todos os resultados obtidos encontram-se na Tabela-8, salienta-se que os valores estimados foram fundamentados em Carvalho (2008), por meio da Equação-18.

Tabela 8 - Medições diretas de sedimento de leito, Ponto-1.

DATA	Vazão (m³.s⁻¹)	Tempo (min)	Largura (m)	C.S. LEITO (mg)	CS. LEITO (kg.dia⁻¹)
29-abr-16	0,84	7	7,80	1096,90	3,35
19-mai-16	1,70	6	7,25	407,30	1,35
30-jun-16	1,67	7	7,45	84,70	0,25
12-jul-16	2,50	30	7,20	3009,60	3,47
9-agosto-16	1,08	77	7,30	Sem material	-
9-set-16	0,96	65	7,28	Sem material	-
14-out-16	2,03	55	7,60	581,30	1,54
27-dez-16	5,74	80	8,00	575,30	1,10
26-abr-17	1,79	66	7,42	Sem material	-

Fonte: Do autor.

As medições diretas da CSL_{P-1} forneceram dados para desenvolvimento de uma curva de calibração, que possibilita a obtenção de CSL_{P-1} em função da vazão no P-1 (Q_{P-1}). A curva de calibração de $CSL_{P-1}=f(Q_{P-1})$, produziu a (Equação-26), desenvolvida e otimizada pela ferramenta Solver® do software Excel® em sua versão 2013.

$$CSL_{P-1} = -0,6921 * \ln(Q_{P-1}) + 2,3325 \quad (26)$$

$$r^2 = 0,1132$$

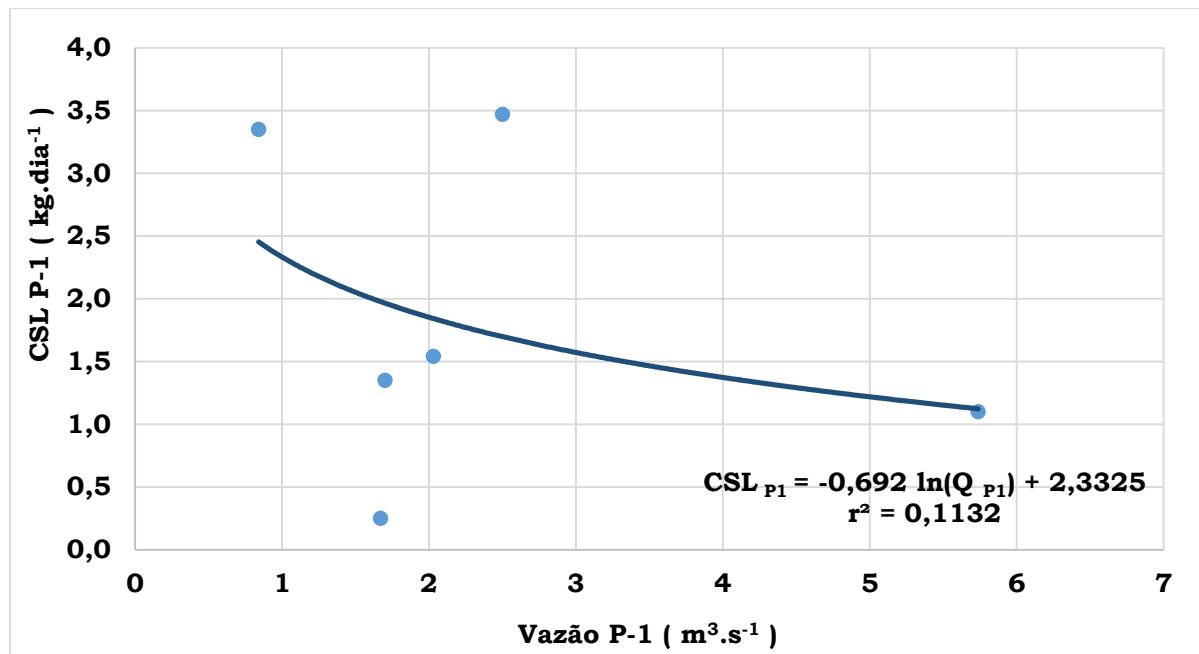
Onde:

CSL_{P-1} = concentração de sedimento de leito, Ponto-1 ($kg.dia^{-1}$);

Q_{P-1} = vazão no Ponto-1 ($m^3.s^{-1}$).

O Gráfico-31 apresenta a curva chave $CSL_{P-1}=f(Q_{P-1})$, no entanto o valor extremamente baixo de r^2 , levam a concluir que as estimativas obtidas para concentração de hidrossedimento de leito no P-1 são insatisfatórias.

Gráfico 31 - Curva de Calibração $CSL_{P-1}=f(Q_{P-1})$ para o P-1 do Alto Ribeirão das Antas, Poços de Caldas - MG.



Fonte: Do autor.

6.5.3 Granulometria

Seguindo a classificação granulométrica elaborada pela ABNT obtida na norma NBR 6.502, realizou-se o ensaio de peneiramento no laboratório do LAPOC. Uma única amostra (SL-14) apresentou massa suficiente para tal, a coletada desta ocorreu na maior vazão aferida em janeiro de 2017. Sendo aplicado no ensaio a seguinte peneiras da série de Taylor: #6 (3,86 mm); #9 (2 mm); #10 (1,65 mm); #28 (0,58 mm); #35 (0,41 mm); #40 (0,29 mm); #60 (0,25 mm); #100 (0,148 mm) e #250 (0,063 mm).

A Tabela-9 apresenta a composição granulométrica do hidrossedimento de leito do Ribeirão das Antas no Ponto-2, sendo 74,79 % de pedregulho fino, 23,62 % de areia grossa, 1,36 % de areia média, 0,19 % de areia fina e 0,04 % de silte.

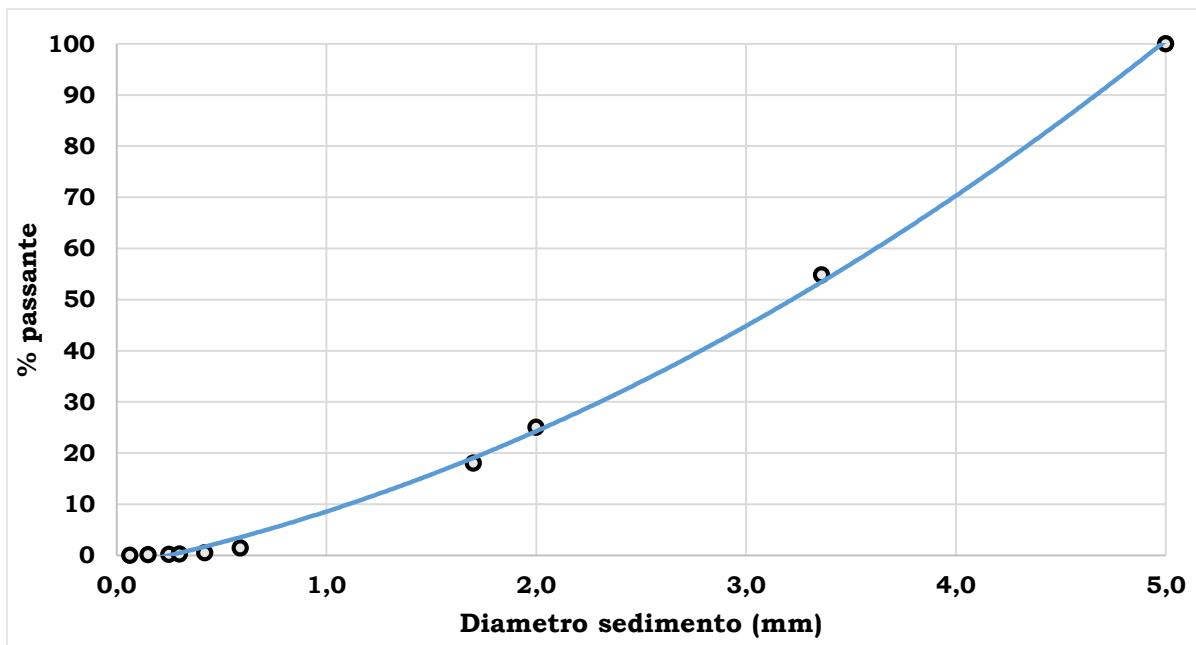
Tabela 9 - Análise Granulométrica do sedimento de leito na seção P-2 do Alto Ribeirão das Antas, Poços de Caldas – MG.

Peneira (mesh)	Massa Inicial (g)	Massa Final (g)	Massa Retida (g)	Massa Retida (%)	Σ Massa (%)	Classe*
#6	505,00	2055,32	1550,32	45,01		Pedregulho fino
#9	445,00	1470,76	1025,76	29,78	74,79	Pedregulho fino
#10	485,00	725,34	240,34	6,98		Areia grossa
#28	380,00	953,21	573,21	16,64	23,62	Areia grossa
#35	389,03	422,13	33,10	0,96		Areia média
#48	370,43	380,96	10,53	0,31		Areia média
#60	317,65	320,78	3,13	0,09	1,36	Areia média
#100	312,85	315,64	2,79	0,08		Areia fina
#250	337,52	341,22	3,70	0,11	0,19	Areia fina
Base	400,00	401,46	1,46	0,04	0,04	Silte
TOTAL		3444,34g			100%	

Fonte: Autor; * ABNT NBR 6.502.

O Gráfico-32 apresenta a curva granulométrica característica do sedimento de leito amostrado, cuja análise permitiu identificar o diâmetro médio (D_{50}) do material de fundo na seção P-2 do Alto Ribeirão das Antas, como sendo igual a 3,40 mm.

Gráfico 32 - Curva Granulométrica do sedimento de leito na seção P-2 do Alto Ribeirão das Antas, Poços de Caldas-MG.



Fonte: Do autor.

6.5.4 Produção Total de Sedimento de Leito

A produção total de sedimento de leito expressa para toda a área de drenagem abrangida, neste caso 15240 ha, foi de 729,03 ton.ano⁻¹. Portanto, a produção de sedimento de leito, por unidade de área de drenagem, foi obtida a partir da Equação-27.

$$P_{Sed.LEITO} = \left(\frac{P}{A} \right) \quad (27)$$

Onde:

$P_{Sed. LEITO}$ = produção sedimento de leito, (ton.ha⁻¹.ano⁻¹);

P = produção anual sedimento de leito, (ton.ano⁻¹);

A = área da bacia hidrográfica (ha).

Desta forma, substituindo os valores na Equação-27 encontra-se:

$$P_{Sed.LEITO} = \left(\frac{729,03}{15240} \right) = 0,0478 \text{ ton.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$$

Assim, obteve-se a estimativa do transporte de sedimento de leito para toda a Bacia Hidrográfica do Alto Ribeirão das Antas, sendo o valor do transporte equivalente a $0,04 \text{ ton.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$, ou $4,78 \text{ ton.(km}^2.\text{ano})^{-1}$.

6.6 RESULTADOS RADIONUCLÍDICOS DA BHARA

6.6.1 Radionuclídeos na Água

A Tabela-10 apresenta os resultados das quantificações dos elementos radioativos ^{210}Pb , ^{226}Ra , ^{228}Ra , Th e U, nas amostras de água do Alto Ribeirão das Antas nos pontos P-1 e P-2.

Tabela 10 – Concentração de Atividade na Água do Ribeirão das Antas, na área da BHARA.

Resultados Radiométricos - Água do Alto Ribeirão das Antas							
Local	Data	Nome	Th Bq.L⁻¹	U Bq.L⁻¹	^{210}Pb Bq.L⁻¹	^{226}Ra Bq.L⁻¹	^{228}Ra Bq.L⁻¹
P-1	abr-16	AA-1	<0,0102	<0,061	<0,02	<0,02	<0,02
P-2	abr-16	AA-2	<0,0102	<0,061	<0,02	<0,02	<0,02
P-2	mai-16	AA-3	<0,0102	<0,061	<0,02	<0,02	<0,02
P-1	mai-16	AA-4	<0,0102	0,118	<0,02	<0,02	<0,02
P-2	jun-16	AA-5	<0,0102	<0,061	<0,02	<0,02	<0,02
P-1	jun-16	AA-6	<0,0102	<0,061	<0,02	<0,02	<0,02
P-2	jul-16	AA-7	<0,0102	<0,061	<0,02	<0,02	<0,02
P-1	jul-16	AA-8	<0,0102	<0,061	<0,02	<0,02	<0,02
P-1	ago-16	AA-9	<0,0102	<0,061	<0,02	<0,02	<0,02
P-2	ago-16	AA-10	0,019	0,084	<0,02	<0,02	<0,02
P-2	set-16	AA-11	0,007	<0,061	<0,02	<0,02	<0,02

Local	Data	Nome	Th Bq.L⁻¹	U Bq.L⁻¹	²¹⁰Pb Bq.L⁻¹	²²⁶Ra Bq.L⁻¹	²²⁸Ra Bq.L⁻¹
P-1	set-16	AA-12	0,007	<0,061	<0,02	<0,02	<0,02
P-1	out-16	AA-13	0,013	<0,061	<0,02	<0,02	<0,02
P-2	out-16	AA-14	<0,0102	0,12	<0,02	<0,02	<0,02
P-2	dez-16	AA-15	<0,0102	<0,061	<0,02	<0,02	<0,02
P-1	dez-16	AA-16	<0,0102	<0,061	<0,02	<0,02	<0,02
P-2	jan-17	AA-17	<0,0102	<0,061	<0,02	<0,02	<0,02
P-2	fev-17	AA-18	<0,0102	<0,061	<0,02	<0,02	<0,02
P-1	abr-17	AA-19	<0,0102	<0,061	<0,02	<0,02	<0,02
P-2	abr-17	AA-20	<0,0102	<0,061	<0,02	<0,02	<0,02
Máximo			0,019	0,12	-	-	-

Fonte: Do autor, continuaçāo Tabela-10.

Em 93 % das análises radiométricas nas amostras de água do Ribeirão das Antas, o resultado obtido foi menor que o limite de detecção dos métodos analíticos aplicados. A interpretação destes resultados parte de duas hipóteses. Na primeira hipótese, pode-se considerar que não há nenhum dos elementos radioativos analisados (^{210}Pb , ^{226}Ra , ^{228}Ra , Th e U) dissolvidos na água do Ribeirão das Antas na BHARA, em fração menor que 45 μm . A segunda hipótese é que a metodologia aplicada para a análise das amostras de água não foi adequada.

A bibliografia leva a adotar a primeira hipótese, pois as pesquisas sobre radioatividade na água superficial do Planalto de Poços de Caldas já realizadas apresentaram valores similares (AMARAL, 1979; BONOTTO, 1994; CRUZ; PEIXOTO, 1991; MIEKELEY, 1991; RONQUI, 2008; TEDESCHI, 2005). Os autores citados ressaltaram que os minerais aos quais às anomalias radioativas estão associadas são de difícil dissolução, ou seja, necessitam de condições específicas para que os radionuclídeos sejam lixiviados e permaneçam na fase aquosa.

Deste modo, os resultados para a água do Alto Ribeirão das Antas foram considerados satisfatórios, pois todos os resultados determinados são inferiores aos limites estipulados na COMANA nº 357, de 15 de março de 2005. Importantíssimo salientar que a verificação com a referida CONAMA é apenas

a título comparativo, pois não foi realizado nesta pesquisa análises suficientes para subsidiar o enquadramento da água do Alto Ribeirão das Antas.

A água do Ribeirão das Antas em todas as eventuais participações no abastecimento passa por tratamento de potabilidade realizado pelo Departamento Municipal de Água e Energia- DMAE. Portanto não há fundamentação para comparação da água in natura do Ribeirão das Antas com os limites da Portaria nº36 do Ministério da saúde.

Os resultados das concentrações dos radionuclídeos na água também são inferiores aos limites estipulados pela CNEN para os pontos de interface entre a INB Caldas e ambiente externo. Na presente pesquisa o ponto de interface de interesse é denominado Ponto-14, sendo relevante salientar que o Ponto-14 é o local onde a água da Represa de Águas Claras verte para forma a calha do Ribeirão das Antas. Os pontos de amostragens, P-1 e P-2 estão a 4,2 km e a 18,1 km respectivamente, do Ponto-14 da INB Caldas.

Os limites admissíveis para os elementos radioativos (^{210}Pb , ^{226}Ra , ^{228}Ra , Th e U) na água do Ponto-14, encontram-se no Ofício nº50 da CNEN, de 27 de janeiro de 1997. O ofício considera como tolerável a água ter no máximo 0,1 Bq.L⁻¹ para ^{210}Pb , ^{226}Ra e ^{228}Ra , para Urânio (U) total 0,2 Bq.L⁻¹ e para Tório (Th) total 0,3 Bq.L⁻¹. Todos os resultados das concentrações dos radionuclídeos na água do Ribeirão das Antas determinados ao longo da pesquisa no P-1 e P-2, são inferiores os limites admissíveis pela CNEN.

Comissão das Águas (2012) avaliou a qualidade da água utilizada no Planalto de Poços de Caldas. Os radionuclídeos ^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{210}Pb , Th e U foram analisados na água coletada em 21 pontos de amostragens, disseminados em todas a sub-bacias hidrográficas do Planalto. Os autores não identificaram agravos ambientais que possivelmente seriam fruto da operação da INB Caldas, e concluíram que não há qualquer tipo de impacto radiológico nas águas de abastecimento utilizadas pela zona urbana do Município de Poços de Caldas.

Tonetto; Bonotto (2002) realizaram pesquisas sobre o comportamento do elemento radioativo Tório (Th) na água do município de Águas da Prata, também no Planalto de Poços de Caldas. Os resultados mostraram que a mobilidade preferencial do tório é o hidrossedimento suspenso e de fundo, em

relação a fase líquida. Porém, é muito importante salientar que a pesquisa constatou a transferência de tório para a água subterrânea do Planalto de Poços de Caldas.

Reynolds et al. (2003) destacam que embora o ^{226}Ra e o ^{228}Ra sejam isótopos, seu comportamento geoquímico na água pode ser bastante diferente. Portanto, segundo os autores, vários fatores naturais possuem a capacidade de controlar e influenciar a distribuição dos radionuclídeos na água superficial.

De acordo com (EISENBUD; GESELL, 1997) foi estabelecido que as concentrações de ^{226}Ra e ^{228}Ra na água superficial são classificadas como baixas, usualmente quando apresentarem concentração entre 0,0037 Bq.L⁻¹ e 0,018 Bq.L⁻¹.

Silva et al. (2013) avaliou a concentração de ^{210}Pb , ^{226}Ra e ^{228}Ra nas águas do Rio São Francisco, no estado de Pernambuco. Em 86 % das análises dos radionuclídeos ^{226}Ra e ^{228}Ra na água, o resultado obtido foi menor que o limite de detecção da metodologia empregada. Na pesquisa a maior variação foi do radionuclídeo ^{210}Pb , com quantificações entre 0,012 Bq.L⁻¹ a 0,042 Bq.L⁻¹ nas águas do Rio São Francisco. Os autores, apontam como principal fonte de radionuclídeos na região o fosfogesso, que compõe os fertilizantes agropecuários, que provavelmente foram lixiviados para o Rio São Francisco e acumulado ao longo do tempo.

6.6.2 Radionuclídeos no Sedimento Suspenso

A Tabela-11 apresenta os resultados das concentrações de atividades dos radionuclídeos ^{210}Pb , ^{226}Ra , ^{228}Ra , Th e U em amostras de hidrossedimentos suspensos transportados pela corrente d'água do Ribeirão das Antas. As amostras foram coletas diretamente na calha do ribeirão nos Ponto-1 e Ponto-2, situados a 4,2 km e 18,1 km respectivamente, do vertedouro da Represa de Águas Claras (Ponto-14).

Tabela 11 - Concentração de Atividade no hidrossedimento suspenso do Ribeirão das Antas, na área da BHARA.

Resultados Radiométricos - Hidrossedimento Suspenso							
Local	Data	Nome	Th Bq.L⁻¹	U Bq.L⁻¹	²¹⁰Pb Bq.L⁻¹	²²⁶Ra Bq.L⁻¹	²²⁸Ra Bq.L⁻¹
P-1	abr-16	SS-1	<0,0102	<0,061	<0,02	<0,02	<0,02
P-2	abr-16	SS-2	<0,0102	<0,061	<0,02	<0,02	<0,02
P-2	mai-16	SS-3	<0,0102	<0,061	<0,02	<0,02	<0,02
P-1	mai-16	SS-4	<0,0102	<0,061	<0,02	<0,02	<0,02
P-2	jun-16	SS-5	<0,0102	<0,061	<0,02	<0,02	<0,02
P-1	jun-16	SS-6	<0,0102	<0,061	<0,02	<0,02	<0,02
P-2	jul-16	SS-7	<0,0102	<0,061	<0,02	<0,02	<0,02
P-1	jul-16	SS-8	<0,0102	<0,061	<0,02	<0,02	<0,02
P-1	ago-16	SS-9	<0,0102	<0,061	<0,02	<0,02	<0,02
P-2	ago-16	SS-10	<0,0102	<0,061	<0,02	<0,02	<0,02
P-2	set-16	SS-11	<0,0102	<0,061	<0,02	<0,02	<0,02
P-1	set-16	SS-12	0,019	0,122	0,033	0,045	<0,02
P-1	out-16	SS-13	<0,0102	<0,061	<0,02	<0,02	<0,02
P-2	out-16	SS-14	<0,0102	<0,061	<0,02	<0,02	<0,02
P-2	dez-16	SS-15	0,018	<0,061	0,047	<0,02	<0,02
P-1	dez-16	SS-16	0,011	<0,061	0,059	<0,02	0,039
P-2	jan-17	SS-17	<0,0102	<0,061	0,081	<0,02	0,041
P-2	fev-17	SS-18	<0,0102	<0,061	<0,02	<0,02	<0,02
P-1	abr-17	SS-19	<0,0102	<0,061	<0,02	<0,02	<0,02
P-2	abr-17	SS-20	<0,0102	<0,061	<0,02	<0,02	<0,02
Máximo			0,019	0,122	0,081	0,045	0,041

Fonte: Do autor.

Em 89 % das análises radiométricas nas amostras de hidrossedimento suspenso, os resultados obtidos foram menores que os limite de detecção dos métodos analíticos aplicados.

Dos resultados de hidrossedimentos suspensos a amostra SS-12 é a mais relevante. A amostra, apresentou valores superiores ao limite de detecção da metodologia, sendo quantificado ^{210}Pb , ^{226}Ra , Th e U, salientando a maior determinação na amostra que foi de $0,12 \text{ Bq.L}^{-1}$ para urâno.

A pesquisa abordou um ano e dois meses entre 2016 e 2017, no entanto não houve quantificação significativa de elementos radioativos (^{210}Pb , ^{226}Ra , ^{228}Ra , Th e U) no hidrossedimento suspenso do Ribeirão das Antas na área da BHARA, na fração superior a $45 \mu\text{m}$.

No Ofício nº50 CNEN, de 27 de janeiro de 1997, não há especificações diretas para os limites de elementos radioativos no sedimento suspenso. O ofício apresenta somente os limites para a quantificação total (água + sedimento suspenso), sendo para Rádio total (Ra) de 0,2 Bq.L⁻¹, para Urânio total (U) de 0,2 Bq.L⁻¹ e para Tório total (Th) de 0,3 Bq.L⁻¹. Todos os resultados das concentrações dos radionuclídeos no hidrossedimento suspenso do Ribeirão das Antas determinados ao longo da pesquisa no P-1 e P-2, são inferiores os limites estipulados pela CNEN.

Amaral (1979) em estudos desenvolvidos em relação ao ²²⁶Ra nas águas e nos hidrossedimentos no entorno da INB Caldas, verificou que os valores dos radionuclídeos não avariaram com a granulometria. Por dedução, a granulometria não interfere diretamente no processo de adsorção de radionuclídeos. A autora observou que a retenção de elementos radioativos depende primordialmente das características mineralógicas e químicas do hidrossedimento e do radionuclídeo envolvido.

Silva et al. (2013) quantificaram os radionuclídeos ²¹⁰Pb, ²²⁶Ra e ²²⁸Ra nos hidrossedimentos suspensos do Rio São Francisco, no estado de Pernambuco. Foram determinadas concentrações máximas de 0,092 Bq.L⁻¹ para ²¹⁰Pb, de 0,035 Bq.L⁻¹ para ²²⁸Ra e de 0,015 Bq.L⁻¹ para ²²⁶Ra. De acordo com os autores, os fertilizantes agropecuários a base de fosfato, possivelmente são a principal fonte dos radionuclídeos. Os ventos e as chuvas são significativos carreadores do material até o curso d'água, que aumentam significativamente as concentrações de ²¹⁰Pb, ²²⁶Ra e ²²⁸Ra nos hidrossedimentos suspensos. No Rio São Francisco, as concentrações de mínimas quantificadas para ²¹⁰Pb foi de 0,012 Bq.L⁻¹, para ²²⁸Ra e ²²⁶Ra algumas amostras os resultados obtidos estavam abaixo do limite de detecção da metodologia aplicada na pesquisa.

6.6.3 Radionuclídeos no Sedimento de Leito

A Tabela-12 apresenta os resultados das análises do radioativos ²¹⁰Pb, ²²⁶Ra, ²²⁸Ra, Th e U em amostras de sedimento de leito, no P-1 e P-2.

Tabela 12 - Concentração de Atividade no hidrossedimento de leito do Ribeirão das Antas, na área da BHARA.

Resultados Radiométricos - Hidrossedimento de Fundo						
Nome	Amostra	Data	Th Bq.kg⁻¹	Erro	U Bq.kg⁻¹	Erro
SL-1	P-2	abr/16	314,00	±25,12	48,30	±3,86
SL-2	P-1	abr/16	135,10	±10,81	532,60	±42,61
SL-3	P-2	mai/16	42,10	±3,37	72,80	±5,82
SL-4	P-1	mai/16	58,70	±4,70	79,80	±6,38
SL-5	P-2	jun/16	293,60	±23,49	437,70	±35,02
SL-6	P-1	jun/16	573,00	±55,84	945,00	±85,60
SL-7	P-2	jun/16	113,00	±19,04	905,00	±72,40
SL-8	P-1	jul/16	336,00	±26,88	530,00	±61,50
SL-9	P-2	jul/16	70,20	±5,62	58,30	±4,66
SL-10	P-1	out/16	144,00	±11,52	1406,00	±112,48
SL-11	P-2	out/16	204,00	±16,32	1158,00	±92,64
SL-12	P-2	dez/16	0,04	±0,01	0,09	±0,01
SL-13	P-1	dez/16	0,03	±0,01	0,26	±0,02
SL-14	P-2	jan/17	175,70	±14,06	474,90	±37,99
Máximo			573,00		1406,00	
<hr/>						
Nome	²¹⁰Pb Bq.kg⁻¹	Erro	²²⁶Ra Bq.kg⁻¹	Erro	²²⁸Ra Bq.kg⁻¹	Erro
SL-1	0,09	±0,02	<0,02	-	<0,02	-
SL-2	190,60	±36,70	321,20	±9,40	333,90	±10,40
SL-3	246,10	±58,90	360,40	±26,50	242,70	±90,50
SL-4	443,50	±107,50	444,40	±61,20	363,40	±100,00
SL-5	3295,60	±233,40	2808,20	±763,70	4338,20	±940,20
SL-6	93,40	±25,70	114,60	±12,00	147,40	±50,10
SL-7	213,00	±55,00	372,00	±72,00	182,00	±24,70
SL-8	3016,70	±585,90	4088,60	±289,60	3620,90	±226,90
SL-9	497,40	±44,60	416,90	±109,30	379,20	±90,80
SL-10	261,00	±62,00	413,00	±49,00	315,00	±125,40
SL-11	20,00	±9,00	313,00	±74,00	244,00	±49,90
SL-12	0,11	±0,03	0,07	±0,01	0,06	±0,01
SL-13	0,13	±0,03	0,11	±0,02	0,53	±0,09
SL-14	318,00	±23,00	383,00	±8,00	322,00	±20,00
Máximo	3295,60		4088,60		4338,20	

Fonte: Do autor.

Os resultados das análises dos radionuclídeos nos hidrossedimento de leito apresentaram valores que podem ser considerados significativos. Porém, todos os resultados considerados relevantes estavam associados há um alto erro analítico, fator que ocasiona um decaimento na confiabilidade do resultado obtido.

Em todas as amostras de hidrossedimento de leito onde houve determinação de concentrações significativas, possuem massa muito pequena e são provenientes do período estiagem. Essas amostras apresentam massa baixíssima pois o período de baixa precipitação é acompanhado de baixas vazões, que na maior parte do tempo é insuficiente para carrear hidrossedimento de fundo. Assim, a principal hipótese para as análises radiométricas terem apresentado erro elevado é o fato das amostras de hidrossedimento de leito terem sido enviadas para análise com massas muito baixas ou até insuficientes para as técnicas empregadas, o que possivelmente podem ter ocasionado os resultados discrepantes.

É importantíssimo ressaltar que mesmo o maior resultado radiométrico obtido, de 4338,2 Bq.kg⁻¹ para ²²⁸Ra, é uma concentração considerada baixa e equivale a 177 PPM de ²²⁸Ra.

Comissão das Águas (2012) avaliou o sedimento de leito do Planalto de Poços de Caldas. Os radionuclídeos ²²⁶Ra, ²²⁸Ra, ²¹⁰Pb, Th e U foram analisados no sedimento de leito coletado com draga em 21 pontos de amostragens, disseminados em todas a sub-bacias hidrográficas do Planalto. Os autores quantificaram valores elevados para ²²⁶Ra, ²²⁸Ra, ²¹⁰Pb, e principalmente para Th e U, nos sedimentos coletados dentro da área da INB Caldas. No entanto, os resultados radiométricos no sedimento no restante do Planalto e no Ribeirão das Antas, estavam todos dentro dos limites legais e não foram identificados agravos ambientais que possivelmente seriam fruto das instalações da INB Caldas.

7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

7.1 CONCLUSÕES HIDROLÓGICAS

Embora o total precipitado no período tenha sido elevado, houve, porém, a distribuição bem equilibrada entre os meses úmidos, concorrendo para a transformação de precipitação em escoamento base e uma atenuação das vazões de cheia.

A bacia hidrográfica apresentou uma elevada capacidade de transformar precipitação em escoamento, refletidos pelo valor do coeficiente de escoamento superficial (0,567) e pela predominância do deflúvio de base (53,8 %) sobre o deflúvio superficial direto.

A bacia hidrográfica do Alto Ribeirão das Antas apresentou durante o período da pesquisa, valores atenuados para as vazões de pico, e elevados para as vazões que caracterizam o período seco ($Q_{90\%}$; $Q_{95\%}$ e $Q_{\text{mínima}}$), o que é consistente com um regime de escoamento com grau satisfatório de regularização.

7.2 CONCLUSÕES HIDROSEDIMENTOLÓGICAS

O regime hidrossedimentológico apresentou perfeita sintonia com o regime de escoamento, refletido pela sazonalidade das massas de sedimentos transportadas no período seco e chuvoso.

A taxa de transporte de sedimentos (média de $0,355 \text{ ton.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$) posiciona a bacia como de baixa produção de sedimentos. E o processo de monitoramento hidrossedimentológico direto, apresentou resultados consistentes.

O emprego da turbidez para a estimativa do transporte de sedimentos em suspensão apresentou resultados promissores, refletidos pelos valores máximo, médio e total, estimados para as taxas de massa de sedimentos transportados. O turbidímetro utilizado mostrou bom desempenho em condições ideais, ou seja, o desempenho depende da calibração, que deve ser realizada no laboratório e no campo, e também dos cuidados operacionais,

como o posicionamento do sensor em relação ao fluxo e dos suportes de proteção e fixação. O sensor óptico de turbidez utilizado na pesquisa demanda uma limpeza periódica, sobretudo, no período chuvoso.

7.3 CONCLUSÕES RADIOLÓGICAS

Os radionuclídeos ^{210}Pb , ^{226}Ra , ^{228}Ra , Th e U analisados nas amostras de águas e de hidrossedimentos suspensos, sempre se mostraram inferiores aos limites estabelecidos por todos os órgãos fiscalizadores, até do mais restritivo a CNEN. Portanto, não é possível afirmar que existe contribuição ou carreamento dos rejeitos do tratamento da DAM no escoamento superficial do Alto Ribeirão das Antas, nos pontos avaliados à jusante da Represa de Águas Claras. Pois a pequena ocorrência de radionuclídeos detectada no hidrossedimento de leito pode ser de origem natural, uma vez que o Planalto de Poços de Caldas possui constituição geológica dotada de anomalias associadas a radionuclídeos.

7.4 SUGESTÕES

Como sugestões para um próximo trabalho visando o estudo do escoamento e transporte de hidrossedimento suspenso e de leito no Ribeirão da Antas, pode se destacar:

- Construções de passarelas perpendiculares ao ribeirão (estruturas de metal fixadas nas duas margens da seção de amostragem), para auxiliar e facilitar o processo de amostragem.
- Intensificação da limpeza e da manutenção dos sensores da estação durante o período chuvoso, com periodicidade mínima quinzenal.
- Intensificação da amostragem de hidrossedimento de leito no período chuvoso, incluindo-se aí, sobretudo, a amostragem na época de algum evento de precipitação extrema.

REFERÊNCIAS

- ALBERTI, H.L.C. **Caracterização fisiográfica e avaliação hidrológica na bacia do Ribeirão das Antas, Planalto de Poços de Caldas, MG.** 2008. 134f. Dissertação (Mestrado em Geociências) - Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, Campinas, 2008.
- AMARAL, E.C.S. **Comportamento do ^{226}Ra no ambiente aquático da região da mina de urânio, Poços de Caldas/MG.** 1979. 111f. Dissertação (Mestrado em Biofísica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, Rio de Janeiro, 1979.
- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA). **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.** American Water Works Association, Water Environment Federation. Washington, D.C., 1998.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502:** Análise Granulométrica de Rochas e Solos. Rio de Janeiro, 1995.
- BARISON, M.R. **Estudo Hidroquímico na Porção Meridional do Sistema Aquífero Bauru no Estado de São Paulo.** 2003. 153f. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) – Universidade Estadual Paulista, UNESP, Rio Claro, 2003.
- BARROSO, D.G.; SILVA, M.L.N. Poluição e conservação dos recursos naturais: solo e água. **Informe Agropecuário**, v.176, n16, p.17-24, 1992.
- BASÍLIO, M.S. **Geoquímica dos sedimentos associados aos minérios de ferro da região leste-sudeste do quadrilátero ferrífero/MG e seu potencial para adsorção e dessorção de metais traço.** 2005. 230f. Tese (Doutorado em Ciências Naturais) - Universidade Federal de Ouro Preto, UFOP, Ouro Preto, 2005.
- BELLINASO, T.B.; PAIVA, J.B.D. Avaliação da produção de sedimentos em eventos chuvosos em uma pequena bacia hidrográfica semiurbana de encosta. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.12, n.4, p.169-181. 2007.
- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F.L. **Conservação do Solo.** 5. ed. São Paulo: Ícone. 2005.
- BESKOW, S. et al. Soil erosion prediction in the Grande river basin, Brazil using distributed modeling. **Catena**, v. 79, n. 1, p. 49-59, 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2009.05.010>>. Acesso em: 19 abr. 2017.
- BORGES, G.B.C. **Avaliação de tecnologias para o monitoramento de recursos hidrominerais: o caso do sistema aquífero São Lourenço em Minas Gerais.** 2006. 243f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia) - Universidade Federal de Itajubá, UNIFEI, Itajubá, 2006.

BONOTTO, D.M. Utilização de modelo isotópico de urânio no estudo de aquíferos do morro do ferro, Poços de Caldas/MG. **Revista Brasileira de Geociencias**, v. 24, p. 52–59, 1994.

BRAGA, et al. **Introdução a engenharia ambiental**. 8. ed. São Paulo, SP: Person Prentice Hall, 2005.

CAMPOS, R.; FREITAS, P.R.B. Características granulométricas e descarga de sedimentos em uma bacia urbana: o rio Maranguapinho no Ceará. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORTE E CENTRO-OESTE, 1. 2007, Cuiabá. **Anais...** Cuiabá, 2007.

CARVALHO, N.O. et al. **Guia de Práticas Sedimentométricas**. São Paulo: ANNEL, 2000.

CARVALHO, N.O. **Hidrossedimentologia - Prática**. 2. ed. rev. atual. e ampliada. Rio de Janeiro: Editora Interciências, 2008.

COMISSÃO DAS ÁGUAS. **Avaliação da qualidade das águas e sedimento das microbacias do Ribeirão das Antas e do Ribeirão de Caldas no Planalto de Poços de Caldas**. 2012. 52f. Relatório Técnico. Poços de Caldas, Minas Gerais, Brasil, 2012.

COMPANHIA TECNOLÓGICA DE SANEAMENTO AMBIENTAL (CETESB). **Relatório de Estabelecimento de Valores Orientadores para Solos e Águas Subterrâneas no Estado de São Paulo**. Relatórios Ambientais. São Paulo, 2001.

CIPRIANI, M. **Mitigação dos impactos sociais e ambientais decorrentes do fechamento definitivo de minas de urânio**. 2002. 363p. Tese (Doutorado em Geociências) - Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, Campinas, 2002.

COLLISCHONN, W.; TASSI, R. **Introduzindo hidrologia**. Rio Grande do Sul: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2008.

COLBY, B.R. **Discharge of sands and mean-velocity relationships in sand-bed streams**. Washington, D.C.: U.S. Geological Survey - Professional Paper 462-A, 1964.

CRUZ, W.B.; PEIXOTO, C.A.M. A evolução química das águas subterrâneas de Poços de Caldas/MG. **Revista Brasileira de Geociencias**, v. 21, p.23–33, 1991.

CURI, N.; SILVA, S.H.G. **Mapa de solos da bacia hidrográfica do Alto Ribeirão das Antas**. Lavras: Departamento de Ciência dos Solos, Universidade Federal de Lavras, UFLA, Lavras, 2017.

CUTSHAL, N.H.; LARSEN, I.L.; OLSEN, C.R. Direct analysis of ^{210}Pb in sediment samples: self-absorption correction. **Nucl. Instrum. Methods**, v. 206, p. 309-312, 1983.

DURÃES, M. F.; MELLO, C. R. Hydrosedimentologic disturbance index applied to watersheds of Minas Gerais State. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 38, n. 1, p. 61-67, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S1413-70542014000100007>>. Acesso em: 18 jan. 2017.

DURÃES, M.F.; COELHO FILHO, J.A.P.; OLIVEIRA, V. A. Water erosion vulnerability and sediment delivery rate in upper Iguaçu river basin – Paraná. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 21, n.4, p.728-741, 2016. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1590/2318-0331.011616029>>. Acesso em: 15 abr. 2017.

EDWARDS, T.K.; GLYSSON, G.D. **Field methods for measurement of fluvial sediment**. Reston, Virginia: Techniques of Water-Resources Investigations of the U.S. Geological Survey (USGS), 1999.

EISENBUD, M.; GESELL, T. **Environmental radioactivity: from natural, industrial and military sources**, 4th ed., New York: Academic Press, 1997.

ELLERT, R. Contribuição a geologia do maciço de Poços de Caldas. **Bol. Fac. Fil. Cien. Letras USP**, São Paulo, v. 237, n.18, p. 5-63, 1959.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY-USA (EPA). **Technologies and techniques for Early Warning System to monitor and Evaluate Drinking Water Quality: A satete-of-the-art review**. New York: Research Report. EPA/600/R-05/0156. U.S. Environmental Protection Agency. Office of Water, 2005.

FAGNANI, E. et al. Sulfetos volatilizáveis por acidificação e metais extraídos simultaneamente na avaliação de sedimentos de água doce. **Química Nova**, v. 34, n. 9, p. 1618-1628, 2011.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE (FEAM). **Mapa de Solos do Estado de Minas Gerais**. Disponível em:<<http://feam.br/noticias/1/1355-mapa-de-solos>>. 2010. Acesso em: 15 jun. 2017.

FRANCO, A.O.B. et al. História térmica do Maciço Alcalino de Poços de Caldas (SP/MG) e adjacências através da análise de datação por traços de fissão em apatitas. **Revista Brasileira de Geociencias**, v.35, p. 351–58, 2005.

FRAYHA, R. Geologia geral e Recursos Minerais. **Plano de Desenvolvimento Integrado**, Poços de Caldas, v.1, p.141-170, 1971.

GASTMANS, D. et al. Implicações hidroquímicas da interação rocha – água: interpretações através da representação gráfica de análises químicas de águas subterrâneas. In: II SIMPOSIO DE HIDROLOGIA DO SUDESTE, 2005. pp. 1–18. São Paulo, **Anais...**, São Paulo, 2005.

GUIMARÃES, V.; SÍGOLO, J.B. Associação de resíduos da metalurgia com Sedimentos em Suspensão - Rio Ribeira de Iguape. **Revista Do Instituto de Geociencias- USP**, v. 8, p. 1–10, 2008.

GLYSSON, G.D. **Sediment-transport curves.** Reston, Virginia: USGS, Open-File Report, 1987.

GODOY, J.M.O. Determination of ^{226}Ra and ^{228}Ra in gypsum. **Ciência e Cultura**, v. 41, p. 86-87, 1989.

GRANJEIRO, M.L. et al. Caracterização isotópica e hidroquímica das águas subterrâneas da bacia sedimentar Lavras da Mangabeira, Ceará. In: XVII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS. 2007. Fortaleza, **Anais...**, Fortaleza, 2007

HELLEY, E.J.; SMITH, W. **Development calibration of a pressure difference bedload sampler.** Reston, Virginia: USGS Water Resources Division. Open-file report, 1971.

HORTELLANI, M.A. et al. Avaliação da contaminação por elementos metálicos dos sedimentos do estuário Santos - São Vicente. **Química Nova**, v. 31 , p. 10–19, 2008.

HORTON, R.E. Erosional development of streams ad their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. **Bulletin of Geological Society of America**, v. 56. p.278-370, 1945.

HOSSAIN, S. Causes of sedimentation problem in Bakkhali River Estuary, Cox's Bazar, Bangladesh. **Asian Journal of Water, Environment and Pollution**, v. 12 . p. 65–69, 2015.

LEINZ, V. **Geologia Geral.** São Paulo: Editora nacional, 1998.

LIMA, H.M.; FLORES, J.C.; COSTA, F.L. Plano de recuperação de áreas degradadas versus plano de fechamento de mina: um estudo comparativo. **Revista Escola Minas Ouro Preto**,v. 4. p. 397–402, 2006.

LIMA, E.A.M. **Avaliação da qualidade dos sedimentos e prognóstico geoquímico ambiental da zona estuarina do Rio Botafogo, Pernambuco.** 2008. 205f. Tese (Doutorado em Geociências) - Universidade Federal de Pernambuco, UFPE, Recife, 2008.

LONSCHINSKI, M. et al. Flow dynamics of groundwater and soil water in the former heap Gessenhalde at the Uranium Mining Area of Ronneburg: A Stable Isotope Approach. **Hydrological Processes**, v. 25, p. 861–72, 2011.

MCKNIGHT, T.L.; DARREL, H. **Climate Zones and Types: The Köppen System». Physical Geography. A Landscape Appreciation.** Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2000.

MELLO, C.R.; SILVA, A.M. **HIDROLOGIA: princípios e aplicações em sistemas agrícolas.** Lavras: Editora UFLA, 2013.

MELLO, C.R. et al. Multivariate models for annual rainfall erosivity in Brazil. **Geoderma**, v. 202-203, p. 88-102, 2013.

MELLO, J.W.V.; DUARTE, H.A.; LADEIRA, A.C.Q. Origem e controle do fenômeno drenagem ácida de mina. **Cadernos Temáticos de Química Nova na Escola**, v.8, p. 24–29, 2014.

MELO NETO, J.O. et al. Vulnerabilidade dos solos à erosão hídrica em bacia hidrográfica minerada no Sul de Minas Gerais. In: II CONGRESSO INTERNACIONAL DE HIDROSEDIMENTO. Foz do Iguaçu, **Anais...**, Foz do Iguaçu, 2017.

MELO, R.O.; **Caracterização da produção de sedimentos de uma microbacia no semiárido pernambucano**. 2008. Dissertação (Mestrado em Solo) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, UFRPE, Recife, 2008.

MELLO, C.R.; CURI, N. Hydropedology. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 36, n.2, p.137-146, 2011.

MENEZES, M.D. **Levantamento pedológico de hortos florestais e mapeamento digital de atributos do solo para estudos hidrológicos**. 2011. 224p. Tese (Doutorado em Ciências do Solo) - Universidade Federal de Lavras, UFLA, Lavras, 2011.

MERTEN, G.H. et al. Estimativa de fluxo de sedimentos em suspensão utilizando a curva-chave aplicada a vazões mensais e diárias. IN: XVII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, São Paulo. **Anais...**, São Paulo, 2007.

MERTEN, G.H.; et al. Avaliação da descarga sólida do leito em rio de montanha com uso do amostrador BLH-84. In: VIII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE SEDIMENTOS - ABRH. Porto Alegre, **Anais...**, Porto Alegre, 2008.

MIEKELEY, N. et al. **Natural series radionuclide and rare-earth elements geochemistry of suspend particles and colloids in waters from the Osamu Utsumi Mine and Morro do Ferro analogue study sites, Poços de Caldas, Brazil**. New York: Report Technical, 1991.

MONTEIRO, M.A.S. et al. **Sumário Mineral 2014**. Brasília: Departamento Nacional de Produção Mineral-DNPM, 2014.

MORAES, F.T. **Zoneamento geoambiental do planalto de Poços de Caldas, MG/SP a partir de análise fisiográfica e pedoestratigráfica**. 2007. 173f. Tese (Doutorado em Geociencias e Meio Ambiente) - Universidade Estadual Paulista, UNESP, Rio Claro, 2007.

MOYES, L.N. et al. Uranium Uptake from Aqueous Solution by Interaction with Goethite, Lepidocrocite, Muscovite, and Mackinawite: An X-ray Absorption Spectroscopy Study. **Environmental science & technology**, v. 34, n. 6, p.1049-1062, 2000.

NOBREGA, F.A.; LIMA, H.M.; LEITE, A.L. Mineração análise de múltiplas variáveis no fechamento de mina - estudo de caso da pilha de estéril BF-4 , Mina Osamu Utsumi. **Revista Escola Minas Ouro Preto**, p.197–202, 2008.

OLIVEIRA, A.S. et al. Stream flow regime of springs in the Mantiqueira Mountain range region, Minas Gerais State. **CERNE**, v. 20 n. 3; p. 109-121, 2014. Disponível em: <DOI: 10.1590/01047760201420031268>. Acesso em 14 abr. 2017.

OLIVEIRA, F.G.C. **Influência da concentração e da granulometria na medida da turbidez com o uso de sensor ótico**. 2017. 70f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia Ambiental). Universidade Federal de Alfenas, UNIFAL, Poços de Caldas, 2017.

OLIVEIRA, V.A. et al. Soil erosion vulnerability in the Verde river basin, southern Minas Gerais. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 38, n. 3, p. 262-269, 2014.

PAIVA J.B.D.; PAIVA, E. M.C. D. **Hidrologia Aplicada à Gestão de Pequenas Bacias**. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos-ABRH, v.1, 2001.

PANDEY, M. et al. Assessment of metal species in river ganga sediment at varanasi, india using sequential extraction procedure and SEM-EDS. **Chemosphere**, v.134, p. 466–74, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.04.047>>. Acesso em 20 abr. 2017.

PHENRAT, A. et al. Ten-year monitored natural recovery of lead-contaminated mine Tailing in Klity Creek, Kanchanaburi Province, Thailand. **Environmental Health Perspectives**, v. 124, p. 1511–21, 2016.

PRESS, F. et al. **Understanding Earth**. 4. ed, Porto Alegre: Bookman, 2006.

PURCINO, M.D. **Espacialização dos parâmetros físico-hídricos do solo e associação com a vulnerabilidade à erosão hídrica em dois ambientes antropizados do Ribeirão Cipó**. 2017. 140f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Alfenas, UNIFAL, Poços de Caldas, 2017.

PRUSKI, F. F. **Conservação de solo e água: práticas mecânicas para o controle da erosão hídrica**. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 2006.

REYNOLDS B.C, WASSERBRUG, G.J.; BASKARAN, M. The transport of U-and Th-series nuclides in sandy confined aquifers. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v.67. N.11. p.1955-1972, 2003.

RONQUI, L.B. **Caracterização limnológica e avaliação de efeitos ambientais causados por efluentes de mina de urânio sobre populações microbianas planctônicas da Represa das Antas, Caldas/MG**. 2008. 135f. Dissertação (Mestrado em Biotecnologia) - Universidade de São Paulo, USP, São Paulo, 2008.

SCHORSCHER, H.D.; SHEA, M.E. **The regional geology, mineralogy and geochemistry of the Poços de Caldas alkaline caldera complex, Minas**

Gerais, Brazil. Poços de Caldas: Project Report n.1. NAGRA NTB 90-01. NAGRA, 1991.

SCOPEL, R.M.; TEIXEIRA E.C.; BINOTTO, R.B. Caracterização hidrogeoquímica de água subterrânea em área de influência de futuras instalações de usinas hidrelétricas: bacia hidrográfica do Rio Taquari-Antas/RS, Brasil. **Química Nova**, v. 28, p. 383-92, 2005.

SILVA, C.M. et al. ^{228}Ra , ^{226}Ra and ^{210}Pb in Sediment and Water of the São Francisco River PE-Brazil. **Int. J. Low Radiation**, v. 9, p.147-159, 2013.

SILVA, L. A. **Deflúvio Superficial em Minas Gerais – caracterização e associação com fatores físicos e ambientais.** 2014. 121f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Sistemas Agrícolas) – Universidade Federal de Lavras, UFLA, Lavras, 2014.

SILVA JUNIOR, V.P. **Investigação do escoamento superficial e produção de sedimentos em bacia representativa do semiárido.** 2010. 96f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, UFRPE, Recife, 2010.

SKARBØVIK, E. et al. Impact of sampling frequency on mean concentrations and estimated loads of suspended sediment in a Norwegian River: implications for water management. **Science of the Total Environment**, v. 433. p. 462–471, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.06.072>> . Acesso em 15 jan. 2015.

SIMPSON, B.S.L. et al. **Handbook for Sediment Quality Assessment Quality Assessment.** Bangor: CSIRO, 2005.

SINNAKAUDAN S.K.; SULAIMAN M.S.; TEOH S.H. Total bed material load equation for high gradient rivers. **Journal of Hydro-Environment Research**, v. 4, p. 243–51, 2010.

SOMMERLOT, A.R. et al. Evaluating the impact of field-scale management strategies on sediment transport to the watershed outlet. **Journal of Environmental Management**. v. 128, p. 735–48, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.06.019>>. 2013. Acesso em 15 out. 2016.

SONTEK. **Manual do usuário do FlowTracker ADV® de mão versão firmware 3.3.** San Diego, CA: SONTEK-YSI, 2007.

SOUZA, D.H. et al. Aplicação de análise morfométrica relação declividade VS extensão e perfil longitudinal das drenagens na bacia do Ribeirão das Antas para detecção de deformações neotectônicas no Planalto de Poços de Caldas. **Revista de Geografia**, v. 27, n. 1, p. 114-127, 2010.

SOUZA, L. R. **Avaliação da disponibilidade dos metais em sedimentos adjacentes à mina de urânio do planalto de Poços de Caldas, Minas Gerais.** 2013. 96f. Dissertação (Mestrado em Ciência e tecnologia das

Radiações, Minerais e Materiais) - Centro de desenvolvimento de Tecnologia Nuclear, CDTN, Belo Horizonte, 2013.

SUBCOMMITTEE ON SEDIMENTATION. **Determination of fluvial sediment discharge.** Washington, D.C.: Inter-Agency Committee on Water Resources. Report nº 14, 1963.

TEDESCHI, L.R. **Hidrogeoquímica e hidrologia do reservatório na cava da Mina Osamu Utsumi do complexo minero-industrial do Planalto de Poços de Caldas, Caldas/MG.** 2005. 254f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Ouro Preto, UFOP, Ouro Preto, 2005.

TEIXEIRA, W. et al. **Decifrando a Terra.** 2 ed. São Paulo: Companhia Editora Nacional, 2009.

TONETTO, E.M.; BONOTTO, D.M. Mobilização de tório em águas subterrâneas de Águas da Prata, estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Geociencias**, v. 32, p. 343-50, 2002.

TUCCI, C.E.M. **Modelos Hidrológicos.** 2º ed. Porto Alegre: UFRGS. 2005.

TUCCI, C.E.M., org. **Hidrologia. Ciência e Aplicação.** Porto Alegre: ed Universidade – UFRGS, Universidade de São Paulo - USP, Associação Brasileira de Recursos Hídricos - ABRH, 1993.

ULBRICH H.H.; ULBRICH, M.N.C. 'The Lujavrite and Khibinite bodies in the Poços de Caldas Alkaline Massif , Southeastern Brazil : a structural and petrographic study. **Revista Brasileira de Geociencias**, v. 30, p. 615-22, 2000.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS). **Water resources data for Utah.** Salt Lake City, Utah: Part 2. Water Quality records, 1966.

VANONI, V.A. **Sedimentation engineering.** New York: ed. ASCE, 1977.

WILDE, F.D. et al. **Processin of Water Samples.** Reston, Virginia:U.S. Geological Survey, Book 9, 2002.

YANG, C.T. Bed-load transport. in: sediment transport: theory and practice. **McGraw-Hill**, v. 13, p. 90-121, 1996.

ZIEGLER A.D. et al. Bedload Transport in SE Asian Streams-Uncertainties and Implications for Reservoir Management. **Geomorphology**, v. 227, p. 31-48, 2014 . Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.01.015>>. Acesso em 23 fev. 2017.

APÊNDICES

APÊNDICE A

Instalação da estação fluviométrica

A instalação da Estação Fluviométrica SOLAR ML2000 no Ponto-2 coordenadas geodésica $21^{\circ}53'32.51''$ S e $46^{\circ}34'39.82''$ O, demandou planejamento e grande aparato experimental, como ferramentas, tubulação de suporte, arames, cabos e uma grande equipe para a implantação. Sendo primeiramente realizada a limpeza da área de instalação, com as ferramentas enxadas, foice, fação e enxadão. Após a limpeza foi construída uma cerca com moirões e arrame farpada.

Para a instalação definitiva dos sensores de nível e turbidez da estação fluviométrica no P-2, localizado na calha do Ribeirão das Antas, fez-se necessário algumas modificações na tubulação utilizada como suporte para os sensores que permanecessem expostos ao fluxo do ribeirão. A tubulação aplicada (cano de PVC, de comprimento 6,5 metros, espessura de 10mm e diâmetro 100mm, aproximadamente) elimina o risco de carreamento dos sensores durante as altas vazões do ribeirão, e ao mesmo tempo aumenta a segurança da coleta de dados, pois os sensores ficam protegidos das possíveis interferências externas. A preparação (Figura-18) e instalação (Figura-19 e Figura-20) estão expostos a seguir.



Figura 18 - Preparação do suporte dos sensores de nível d'água e de turbidez a serem instalado definitivamente no Ribeirão das Antas.

Fonte: Do autor.



Figura 19 - Instalação dos suportes para os sensores de nível d'água e de turbidez da Estação Fluviométrica SOLAR ML 2000.

Fonte: Do autor.



Figura 20 - Instalação definitiva do *datalogger* da Estação Fluviométrica SOLAR ML 2000.

Fonte: Do autor.

APÊNDICE B

Manutenção dos pontos de monitoramento

As manutenções dos pontos P-1 e P-2, exigiram visitas aos locais com intuito de preparar os pontos para a amostragem durante os períodos de ocorrência das maiores vazões do Ribeirão das Antas, assim sendo, fez-se necessário a instalação de estacas de madeira nas margens dos pontos P-1 e P-2, exemplificados nas Figura-21 e Figura-22. Exigiram também sucessivas visitas para as limpezas das vegetações rasteiras nos locais da amostragem.



Figura 21 - A: Limpeza e manutenção dos pontos de amostragem. B: Instalação das estacas de madeira nas margens na seção de amostragem.
Fonte: Do autor.



Figura 22 - Amostragem com elevada vazão, utilizando bote e suporte de estacas de madeira

Fonte: Do autor.

APÊNDICE C

Manutenção dos sensores

A SOLAR ML2000 demanda uma manutenção constante e intensiva do sensor de turbidez (Figura-23), sendo em alguns períodos do ano realizada semanalmente, em outros períodos quinzenalmente e até mensalmente, isto em decorrência a do acumulo de partículas sólidas no sensor. Nos períodos em que o sensor de turbidez esteve com partículas agregadas em sua interface de aferimento ocorreram medidas de turbidez que não condizem com a realidade.



Figura 23 - Manutenção dos sensores da estação Fluviométrica SOLAR ML2000.

Fonte: Do autor

APÊNDICE D

Monitoramento dos pontos de amostragem

As amostragens diretas no Ponto-2, ponto que está a 18 km do vertedouro da represa foram realizadas 15 (quinze) vezes, enquanto que as visitas ao P-2 totalizaram 39 (trinta e nova) atividades no campo. Em cada campo segue-se a mesma metodologia de Igual Incremento de Largura (IIL) que permite uma amostragem isocinética onde a água e o hidrossedimentos transportados pelo Ribeirão das Antas.

Este ponto conta uma estação fluviométrica de demanda uma atenção especial com os sensores e *datalogger* de armazenamento de dados, assim foram realizados uma quantidade maior de atividades de campo em relação ao P-1. A seguir está exposta a Tabela-13, onde pode-se observar com clareza as atividades de campo realizadas no P-2.

Tabela 13 - Atividades de campo no ponto P-2.

Nº	DATA	SENSOR	DOWNL.	AMOSTRAGEM	FOTO
1	30-jun-15	Manutenção			
2	2-set-15	Manutenção	X		
3	15-set-15	Manutenção	X		
4	22-set-15	Limpeza	X		
5	8-dez-15		X		
6	18-jan-16	Limpeza	X		
7	23-jan-16		X		
8	18-fev-16	Limpeza			
9	23-fev-16		X		
10	1-mar-16	Limpeza	X		
11	8-mar-16			X	X
12	15-mar-16			X	X
13	31-mar-16	Limpeza	X		
14	19-abr-16	Limpeza	X		
15	27-abr-16		X		X

Nº	DATA	SENSOR	DOWNL.	AMOSTRAGEM	FOTO
16	29-abr-16			X	X
17	19-mai-16		X	X	X
18	8-jun-16		X		
19	24-jun-16	Limpeza			
20	30-jun-16			X	X
21	12-jul-16	Limpeza	X	X	X
22	9-agosto-16	Limpeza	X	X	X
23	9-set-16	Limpeza	X	X	X
24	4-out-16	Limpeza			
25	14-out-16	Limpeza	X	X	X
26	1-nov-16	Limpeza	X		X
27	9-nov-16	Limpeza	X		X
28	16-nov-16	Limpeza	X		X
29	8-dez-16	Limpeza	X		X
30	27-dez-16	Limpeza	X	X	X
31	13-jan-17	Limpeza	X		X
32	19-jan-17	Limpeza	X	X	X
33	9-fev-17	Limpeza	X		X
34	24-fev-17	Limpeza	X	X	X
35	21-mar-17	Limpeza	X		
36	26-abr-17	Limpeza	X	X	X
37	5-mai-17	Limpeza	X		
38	2-jun-17	Limpeza	X		X
39	30-jun-17	Limpeza	X		

Continuação Tabela 13: Atividades de campo no ponto P-2.

Fonte: Do autor.

As amostragens no Ponto-1, ponto que está a 5 km do vertedouro da represa foram realizadas 13 (treze) vezes. Em cada campo segue-se a mesma metodologia de Igual Incremento de Largura-IIL que permite uma amostragem isocinética onde a água e o hidrossedimentos transportados pelo Ribeirão das Antas. A seguir está exposta a Tabela 14, onde pode-se observar com clareza as atividades de campo realizadas no ponto P-1.

Tabela 14- Atividades de campo no ponto P-1.

Nº	Data	Atividades executadas			
1	4-mai-16	Visita	Amostragem	VAZÃO	FOTO
2	19-mai-16	Visita	Amostragem	VAZÃO	FOTO
3	8-jun-16	Visita	Instalação suporte		
4	30-jun-16	Visita	Amostragem	VAZÃO	FOTO
5	12-jul-16	Visita	Amostragem	VAZÃO	FOTO
6	9-ago-16	Visita	Amostragem	VAZÃO	FOTO
7	9-set-16	Visita	Amostragem	VAZÃO	FOTO
8	4-out-16	Visita	Manutenção		FOTO
9	14-out-16	Visita	Amostragem	VAZÃO	FOTO
10	11-nov-16	Visita	Manutenção		FOTO
11	28-dez-16	Visita	Amostragem	VAZÃO	FOTO
12	19-jan-17	Visita	Amostragem	VAZÃO	FOTO
13	27-abr-17	Visita	Amostragem	VAZÃO	FOTO

Fonte: Do autor.

ANEXO A**FICHA DE CAMPO – PARTE I****Amostras Hidrossedimento em Suspensão e de Leito**

Nome amostra: _____ Local: _____ Data ___/___/___

Clima: _____ Hora: _____ Equipe: _____

Método de Medição: () a vau, () guincho, () barco, () bote, () cabo

Amostrador Suspensão: _____ Amostrador de Leito: _____

Largura (margem a margem): _____ Bico: () $\frac{1}{4}$ " () $\frac{1}{8}$ " () $\frac{3}{16}$ "

Temp. da água: ____ °C. Temp. do ar: ____ °C.

V_{max} – Maior Velocidade entre verticais: _____ **m/s.**

V_{t max} = 0,4 * V_{max} _____ m/s. **T_{min}** = 2*(prof) _____ m / **V_{t max}** _____.

Tempo amostragem V_{max} = _____ seg.

Velocidade a 0,8 maior prof.:_____ Velocidade a 0,2 maior prof.: _____

Dados da Sonda Multiparamétrica:

pH: _____ ORP: _____ mV Turbidez: _____ NTU

OD: _____ mg/L Temperatura: _____ °C Condutividade: _____ m.S/cm

FICHA DE CAMPO – PARTE II

AMOSTRAGEM em SUSPENSÃO						AMOSTRAGEM DE LEITO
Dist. (m)	Prof. (m)	0,6 da prof.	/ 5 cm FlowTra	Vel. (m/s)	Tempo (s)	Hora de INICIO amostragem:
Nº / identificação da Garrafa						Nº da Embalagem

Fonte: *Apud CARVALHO, 2008.*