

# Transporte de Sedimentos em Suspensão no Alto Ribeirão das Antas – Poços de Caldas – MG- Brasil

**ANTONIO MARCIANO DA SILVA**

*Professor Visitante Nacional Sênior, ICT/Universidade Federal de Alfenas - UNIFAL-MG, antonio.marciano@unifal-mg.edu.br*

**Flavio Henrique de Souza Moreira**

*Mestre em Ciências- Bolsista da Comissão Nacional de Energia Nuclear - CNEN-Póços de Caldas, MG, flaviohsmoreira2@gmail.com*

**Heber Luiz Caponi Alberti**

*Doutor em Ciências – Pesquisador da Comissão Nacional de Energia Nuclear - CNEN-Laboratório de Póços de Caldas, MG; heber@cnen.gov.br*

**Paulo Henrique Bretanha Junker Menezes**

*Doutor em Ciências – Professor Universidade Federal de Alfenas - UNIFAL-MG - Póços de Caldas, MG; paulo.menezes@unifal-mg.edu.br*

## RESUMO

Avaliou-se no período de abril/2016 a março de 2017, a interação entre o escoamento superficial, a produção/transporte de sedimentos sólidos em suspensão e a potencialidade do monitoramento indireto da concentração de sólidos em suspensão via turbidez, utilizando-se sensor óptico de turbidez. O estudo foi realizado na Bacia Hidrográfica do Alto Ribeirão das Antas, com coordenadas centrais de 21°53'32,54" de latitude S e 46°34'39,82" de longitude O, área de drenagem de 152,4 km<sup>2</sup>, altitude média de 1369m, declividade média de 26,4%, clima dos subtipos Cwa (em áreas baixas) e Cwb (altitude superior a 1100 m), com duas estações bem distintas, uma de abril a setembro, caracterizada por forte estiagem e temperaturas baixas, e, a outra estação entre os meses de outubro e março, de elevada pluviosidade e alta erosividade das chuvas, (> 8000 MJ.mm.ha<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup>), e temperaturas mais elevadas. As classes de solo predominantes são o Latossolo Vermelho-Amarelo-LVA (64,82%); Cambissolo Háplico-CX (21,04%); e, em relação aos usos o a distribuição espacial é: Campos de Altitude e pastagem (40,35%), Mata (22,90%), Eucalipto (15,04%), Agricultura (11,40%), Solo Exposto (5,42%), Área Urbana (2,64%) e Água (2,25%), cenário favorável ao processo de infiltração das chuvas. No monitoramento utilizou-se medidor de velocidade, coletor de sedimento em suspensão (DH-48), estação meteorológica, e, estação hidrométrica com sensores de nível de água e de turbidez. As campanhas em campo forneceram valores simultâneos das concentrações de sedimento suspenso (CSS) e das vazões (Q), e gerar a curva de calibração CSS=f(Q), que associada à Q=f(t) resultou CSS= f(t). A massa de sólidos suspensos transportados (MSST) foi de 4274 t.ano<sup>-1</sup>, ou 0,280t.(ha.ano)<sup>-1</sup>, dos quais 86,5% transportados na estação chuvosa. A perda de solo por erosão hídrica (PSEH) foi estimada em 11,17 t.ha<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup> e a taxa de transferência de sedimentos suspensos (TTSS) obtida pela relação MSST/PSEH, foi de 2,51%. Para a estimativa do transporte de sedimentos em suspensão a partir da turbidez, estabeleceu-se a curva de calibração, CSS = f(TURB) e os valores máximo e médio da CSS(TURB) foram 70,88 mg.L<sup>-1</sup> e 16,83 mg.L<sup>-1</sup> respectivamente, os quais são respectivamente 4,7% a mais, e, 6% a menos daqueles estimados pelo modelo CSS= f(Q), o que sinaliza uma boa performance do sensor de turbidez.

**Palavras-chave:** Monitoramento de Sedimentos; Regime de Escoamento; Taxa de Transporte de Sedimento.

**Palavras-chave:** Monitoramento de Sedimentos; Regime de Escoamento; Taxa de Transporte de Sedimento.

**Tema:** Hidrologia, hidráulica fluvial e obras hidráulicas

## 1- Introdução

O conhecimento do regime hidrológico e sedimentológico de uma bacia hidrográfica permite um melhor gerenciamento dos recursos hídricos disponíveis. O escoamento superficial é a parcela do ciclo hidrológico relacionada ao deslocamento das águas sobre a litosfera, sendo uma das mais importantes, para os projetos de engenharia voltados para o aproveitamento, armazenamento e a drenagem de água superficial. (MELLO; SILVA, 2013, TAGERT; MASSEY; SHAW, 2014)

A dinâmica do escoamento superficial da água em uma bacia hidrográfica requer-se, sobretudo, avaliar a capacidade da mesma em “colher as chuvas e de transformá-las em deflúvio superficial de base”. Em áreas com solos mais propensos à infiltração das precipitações há uma considerável redução das enxurradas e da erosão hídrica, e, consequentemente uma diminuição da quantidade de sedimentos transportados, resultando na oferta de água com melhor qualidade, sob regime de escoamento, naturalmente regularizado e ambientalmente sustentável. (BELINASSO; PAIVA, 2007).

No entanto, atividades antropogênicas como a agricultura, a mineração, a urbanização e várias outras, veem alterando continuamente a cobertura natural da litosfera. A remoção da cobertura natural e consequente exposição da camada superficial da litosfera são responsáveis pelo aumento da quantidade de partículas transportadas pelos cursos d'água, podendo ocasionar a contaminação da água devido ao carreamento de pesticidas, de patógenos, de metais pesados, de metais radioativos e de outros poluentes dispostos na superfície terrestre. (SHUKER; MOGGRIDGE; GURNELL, 2015). A possibilidade de contaminação da água se dá em função de vários fatores, como condições climáticas da região, formação geológica da bacia, intensidade de erosão das rochas e solos, e também a magnitude da influência antropogênica (DURÃES; MELLO, 2014).

A deposição do material carreado ocorre habitualmente nas áreas de várzeas da bacia hidrográfica, nos leitos dos riachos e nos reservatórios, caracterizadas por baixa capacidade de transporte de sedimentos em suspensão, sendo que, mesmo após ocorrer o depósito continua o processo de interação à busca do equilíbrio dinâmico, e a longo prazo o processo reduz a capacidade de transporte e de armazenamento das estruturas hidráulicas. (SIMPONS et al., 2005).

O monitoramento hidrossedimentológico é a base para análise de viabilidade de várias atividades econômicas e uma importante ferramenta para estudos ambientais, para projetos e operação de obras fluviais e para conservação de terras e dos recursos hídricos (COOPER; WATTS, 2002). A quantificação dos sedimentos em suspensão transportados pelos rios pode ser obtida por técnicas diretas e/ou indiretas (OLIVEIRA et al., 2014). Os métodos diretos são os mais tradicionais, trabalhosos e possuem um maior custo de operação. Desta forma, tem-se investido na avaliação dos métodos indiretos, os quais permitem uma quantificação do sedimento em suspensão sem a necessidade de análises em laboratório, o que em geral reduz o trabalho e o custo da operação, além de facilitar a obtenção de dados. Neste sentido, tem-se buscado avaliar equipamentos que possibilitem a medida indireta do sedimento transportado em suspensão, que apresentem precisão, sejam de fácil operação, e requeiram baixa manutenção. Um dos métodos indiretos mais usados é uso do sensor óptico de turbidez, que permite o monitoramento contínuo do sedimento suspenso (ASSELMAN, 2000; AULENBACH; HOOPER, 2006; OLIVEIRA 2017).

A Bacia Hidrográfica do Alto Ribeirão das Antas, inserida na Bacia Hidrográfica do Rio Grande, está localizada no sudeste do Brasil, tem participação estratégica para o abastecimento de água potável, geração de energia e lazer para o Município de Poços de Caldas, além das atividades de mineração e agropecuária nela praticados, tornando-se, portanto relevante os estudos hidrológicos para subsidiar as ações de planejamento e gestão de seus recursos hídricos.

Nesta pesquisa analisou-se de forma integrada o regime de escoamento superficial, o transporte de sedimentos suspensos e o monitoramento indireto via turbidez, como

alternativa para reduzir substancialmente os custos operacionais desta prática, visando não só fornecer informações técnicas relevantes, como também avaliar o desempenho do turbidímetro no monitoramento do transporte de sedimentos suspensos.

## 2- MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Região de estudo e sua caracterização

A Bacia Hidrográfica do Alto Ribeirão das Antas (Figura-1-a) possui área de 152,4 km<sup>2</sup>, localiza-se no Planalto Alcalino de Poços de Caldas, e suas coordenadas centrais são 21°53'32.54" S, 46°34'39.82" O e altitude média de 1369 m. Segundo a classificação de Köppen na região ocorrem os climas dos subtipos Cwa (em áreas baixas) e Cwb (altitude superior a 1100 m), com duas estações bem distintas, uma estação de pluviosidade intensa e temperaturas mais elevadas que ocorre entre os meses de outubro e março, e a outra estação caracterizada por forte estiagem e temperaturas baixas, entre os meses de abril a setembro, (ALBERTI, 2008), (MORAES, 2007). O regime pluvial proporciona alta erosividade das chuvas, com valores estimados acima de 8000 MJ.mm.ha<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup>, segundo Melo Neto et al (2017).

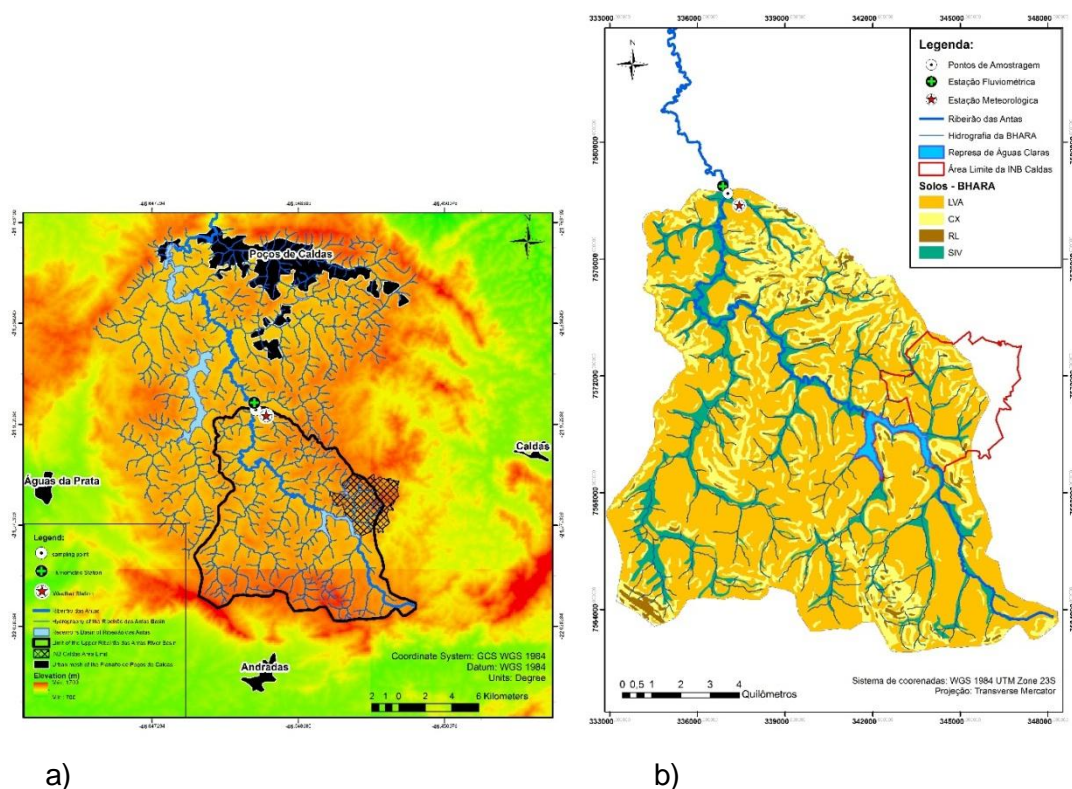


Figura 1-a - Mapa da localização da Bacia do Alto Ribeirão das Antas, no Planalto Alcalino de Poços de Caldas- MG. Figura 2-b - Mapa de Classes de Solos da Bacia do Alto Ribeirão das Antas – Poços de Caldas – MG. Fonte: Adaptado de FEAM, (2010) por CURI, N. & SILVA, S.H.G – Departamento de Ciência dos Solos – Universidade Federal de Lavras.

Na Figura-1-b identifica-se a distribuição espacial dos solos da bacia, obtida a partir do Mapa de Solos de Minas Gerais (FEAM, 2010). As classes de solo predominantes são Latossolo Vermelho-Amarelo-LVA (64,82 %) distrófico típico a moderado textura argilosa; Cambissolo Háplico-CX (21,04 %) distrófico típico e léptico a moderado textura siltosa/argilosa; Neossolo Litólico-RL (1,57 %) distrófico típico a fraco; e, Solos Indiscriminados de Várzea-SIV (12,57 %).

A Figura-2-a apresenta o uso e ocupação da bacia com a seguinte tipologia: Campos de Altitude e pastagem (40,35 %), Mata (22,90 %), Eucalipto (15,04 %), Agricultura (11,40 %), Solo Exposto (5,42 %), Área Urbana (2,64 %) e Água (2,25 %). Em função de expressiva parcela (37,94 %) estar ocupada por mata nativa e plantada, este cenário de ocupação é bastante favorável ao processo de infiltração das precipitações que ocorram na bacia.

A distribuição espacial das classes de declividade está apresentada na Figura-2b sendo a declividade média da bacia é de 26,4 %.

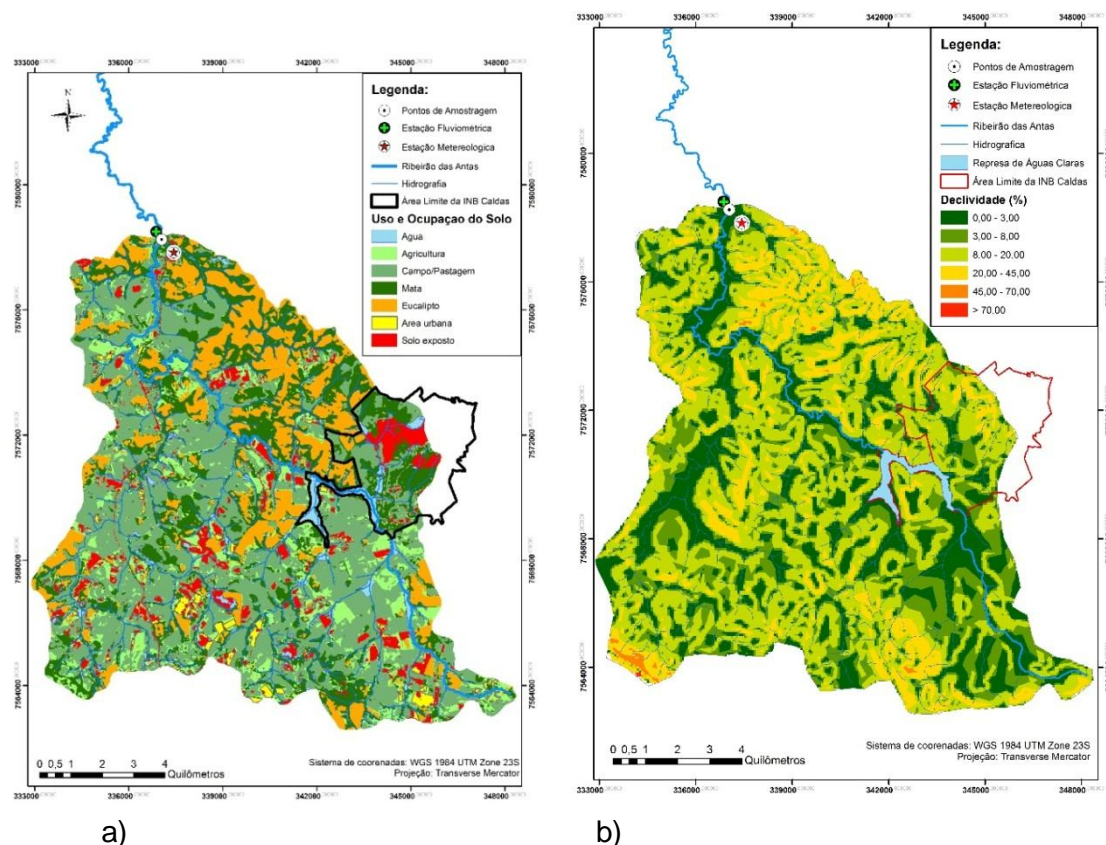


Figura 2 – a) Mapa de Uso e Ocupação da Bacia do Alto Ribeirão das Antas – Poços de Caldas – MG. Figura 2-b - Mapa de declividade da Bacia do Alto Ribeirão das Antas – Poços de Caldas – MG.

## 2.2 Monitoramento, amostragem e análises

Na seção de monitoramento do escoamento e do transporte de sedimentos situada 18 Km à jusante da Represa de Águas Claras, foi instalada uma estação hidrométrica contendo uma central de controle com conexão para dois sensores, um de nível d'água e um sensor de turbidez com registros a cada 30min, e capacidade para armazenar 32000 registros, alimentado por bateria e painel coletor solar. O sensor hidrostático foi calibrado no laboratório da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN). Já o sensor de turbidez foi avaliado e calibrado por Oliveira (2017), em condições de laboratório. Dispõe-se ainda de uma estação meteorológica com registro de precipitação, temperatura, umidade do ar, vento e radiação. Durante o período de estudo que abrangeu os meses de abril de 2016 a março de 2017, realizaram-se várias campanhas de campo, promovendo-se medições de vazão, coleta de sedimentos suspensos e de fundo de leito do córrego., utilizando solos coletados

dentro da área da bacia.

Nas medições de vazão utilizou-se um medidor de velocidade “FlowTracker” e para a amostragem isocinética do sedimento em suspensão um coletor DH-48, segundo metodologia igual incremento de largura (CARVALHO, 2008). A concentração de sedimentos em suspensão foi determinada pelo método de filtração do Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 1998).

### 2.2.1 Curvas de Calibração

As medições simultâneas e diretas da vazão (Q), do nível de água (h), da concentração de sedimentos suspensos (CSS) e da turbidez (TURB), permitiram obter as curvas de  $Q = f(NA)$ ,  $CSS = f(Q)$  e  $CSS = f(TURB)$

### 2.2.2 Taxa Transferência de Sedimentos Suspensos

A Taxa Transferencia de Sedimentos Suspensos (TTSS), relação entre a massa de sedimento suspenso transportado na seção de monitoramento da bacia hidrográfica e a média da perda de solo por erosão hídrica na bacia hidrográfica, segundo Durães (2014) foi obtida pela Equação-1:

$$TTSS = 100 * \frac{MSST}{PSEH} \quad (1)$$

Em que: MSST= massa de sedimento suspenso transportado, representa o transporte de sedimentos determinado na seção de controle da bacia hidrográfica em  $(t.ha^{-1}.ano^{-1})$  e PSEH= perda de solo por erosão hídrica, ou potencial de erosão hídrica em  $(t.ha^{-1}.ano^{-1})$ .

## 3 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1 Análise do regime de escoamento superficial

Encontra-se na Tabela-1 a síntese das campanhas de campo, realizadas durante o processo de monitoramento da vazão e da concentração de sólidos em suspensão, na seção de monitoramento do Ribeirão das Antas.

Tabela 1 – Síntese das informações geradas nas campanhas de monitoramento .

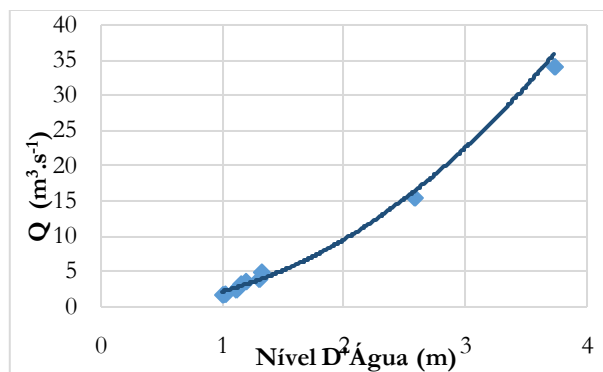
Data	Hora	Vazão ( $m^3.s^{-1}$ )	CSS ( $mg.L^{-1}$ )
08/mar/16	09:25	15,56	54,48
29/abr/16	09:14	3,32	21,05
19/mai/16	09:34	3,66	5,32
28/jun/16	09:06	2,89	8,77
12/jul/16	09:21	2,50	4,62
09/ago/16	09:32	1,87	1,86
09/set/16	09:05	1,79	5,56
14/out/16	09:45	4,01	11,88
27/dez/16	09:40	16,64	16,36
19/jan/17	09:20	34,15	63,20
24/fev/17	09:35	5,34	96,46
31/mar/17	09:45	3,55	9,44



Os dados de vazão (Q) apresentaram uma grande amplitude de valores (1,79 a 34,15 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>), bem como, os respectivos níveis de água (NA), o que permitiu gerar uma curva chave (Q= f(NA)) com boa representatividade (Figura 3), cuja expressão analítica é a Equação (2) desenvolvida e otimizada pela ferramenta Solver<sup>®</sup> do software Excel<sup>®</sup>.

$$Q = 2,184 * NA^{2,087} ; (R^2 = 0,9814) \quad (2)$$

Figura 3 – Curva-chave Q=f(NA) na seção de monitoramento do Alto Ribeirão das Antas.



A distribuição temporal das precipitações registradas a cada 30 minutos (hietograma) pode ser analisada na Figura 4, sendo o total precipitado no período estudado igual a **1787,6** mm. A maior lâmina de precipitação registrada no intervalo de 30 minutos foi de 27,9 mm, a qual corresponde à intensidade de precipitação de 55,8 mm.h<sup>-1</sup> e ocorreu no dia 11/01/2017.

O monitoramento do nível de água na seção, com registros a cada 30 minutos, foi efetivo em 95,3% do período de estudo, um excelente nível de cobertura temporal, sendo a falta de energia, o fator determinante da perda de 4,7 % de registros. O linigrama resultante em associação com a Equação (2) permitiu gerar o fluviograma, Fiura 4 que apresenta informações relevantes sobre o regime de escoamento.

No período da pesquisa o deflúvio total foi de 1,736 \* 10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>, o qual associado à área de drenagem para a seção corresponde a uma lâmina drenada de 1139,13 mm.

Considerando os intervalos de 30 minutos de registros, os valores máximo, médio e mínimo, para a vazão, foram 38,05; 4,90 e 1,50 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>, os quais correspondem à rendimentos específicos (RE) iguais à: RE<sub>máximo</sub> - 249,7 L.(s.km<sup>2</sup>)<sup>-1</sup>; RE<sub>médio</sub> - 32,15 L.(s.km<sup>2</sup>)<sup>-1</sup> e RE<sub>mínimo</sub> - 9,83 L.(s.km<sup>2</sup>)<sup>-1</sup>.

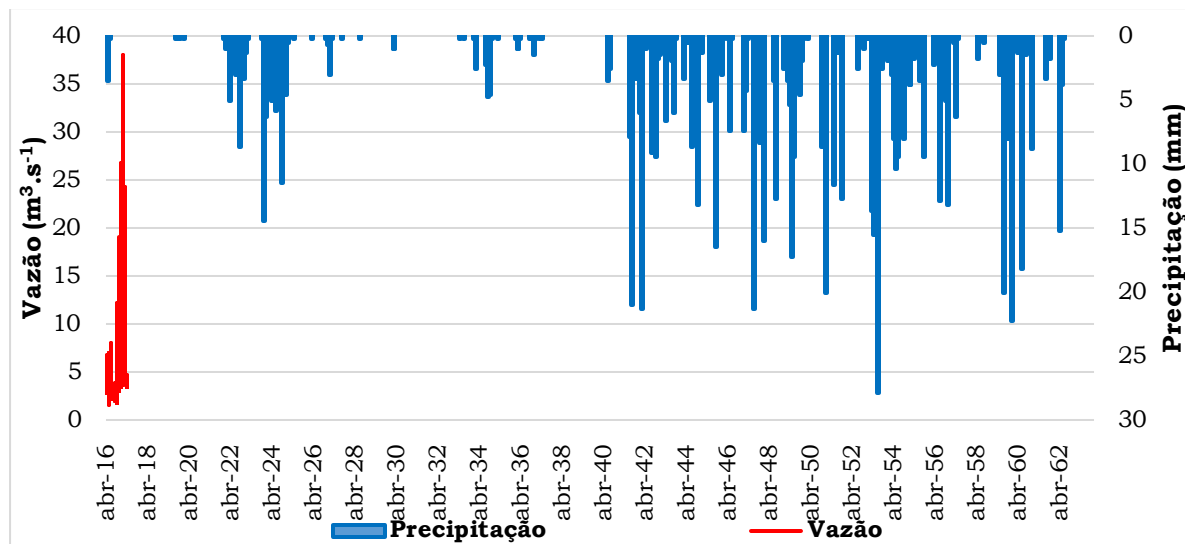
O RE<sub>máximo</sub> apresentou valor relativamente baixo, o que pode ser resultante do efeito de amortecimento de cheias, da própria bacia, bem como, por parte da Represa de Águas Claras, situada 18 km à montante. O valor para o RE<sub>médio</sub> é elevado e é explicado pelo elevado índice pluvial incidente sobre a área da bacia, e está consistente com o estimado por (SILVA, 2014) para o RE<sub>MLT</sub> para a região Sul de Minas, onde há estimativa de valores maiores que 30 L.(s.km<sup>2</sup>)<sup>-1</sup>.

O valor de RE<sub>mínimo</sub> também é elevado, tomando-se como base o valor indicado por Silva (2014) para um indicador menos restritivo como o RE<sub>90%</sub>, para o qual são sinalizados valores maiores que 5,5 L.(s.km<sup>2</sup>)<sup>-1</sup> para o Sul de Minas Gerais., consequência da capacidade da bacia de colher as precipitações incorporando-as no solo, refletindo no elevado grau de regularização do regime de escoamento, incluindo-se também, neste particular, a possível contribuição do reservatório da Represa de Águas Claras.

A análise do regime de escoamento baseada na frequência de permanência das vazões, permitiu estimar, os valores de Q<sub>50%</sub> 3,54 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>, Q<sub>90%</sub> 2,27 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup> e Q<sub>95%</sub> 2,1 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>, os quais correspondem a RE<sub>50%</sub> 23,23 L.(s.km<sup>2</sup>)<sup>-1</sup>, RE<sub>90%</sub> 14,9 L.(s.km<sup>2</sup>)<sup>-1</sup> e RE<sub>95%</sub> 13,8 L.(s.km<sup>2</sup>)<sup>-1</sup> respectivamente. Estes valores além de serem superiores aos obtidos

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

**Figura 4 – Hietograma e Fluviograma na seção de monitoramento do Alto Ribeirão das Antas – Poços de Caldas/MG.**



Trabalhando-se os dados de precipitação e vazão na escala diária e posteriormente na escala mensal, obtiveram-se os valores apresentados na Tabela-2. Em relação às precipitações, o total anual foi 1787,6 mm, o período seco (abril a setembro) participou com 285,5 mm (15,9 %), o período úmido (outubro a março) participou com 1510,1 mm (84,1 %), evidenciando um elevado grau de concentração do regime pluvial no período úmido, com precipitação média mensal de 251,7 mm e com o mês de mar/2017 apresentando a menor precipitação, da ordem de 165,1 mm, que ainda é um valor considerável, permitindo assim avaliar 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. O mês de jan/2017 foi o mais chuvoso, com um total de 349,5 mm e o mês de jul/2016 o mais seco, com apenas 4,1 mm de chuva.

Em relação às vazões diárias médias mensais, o mês de janeiro apresentou o maior valor,  $9,25 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ , e consequentemente o maior deflúvio mensal,  $24,785 \text{ Hm}^3$ , ou 162,6 mm, e o mês de setembro apresentou o menor valor,  $1,97 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  e consequentemente o menor deflúvio mensal,  $5,103 \text{ Hm}^3$ , ou 33,5 mm. A análise das vazões diárias médias mensais permitiu identificar de forma clara o período de depleção do escoamento superficial, (mês de abril a setembro), e, na sequência, o período de recarga do lençol superficial (outubro a março), e a separação da vazão em suas duas componentes, escoamento de base e escoamento superficial direto. Assim, para o período de depleção ajustou-se o modelo de decaimento exponencial representado pela Equação-3:

$$Q_{Base} = 3,963 * e^{-0,004 * T}; (R^2 = 0,97) \quad (3)$$

Onde,  $Q_{base}$  = vazão de base, ou vazão decorrente da drenagem do lençol superficial ( $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ );  $a = 3,963$  representa a vazão de base no  $T=0$ ;  $b = 0,004 \text{ dia}^{-1}$  é o coeficiente de decaimento da vazão com o tempo; e  $T$  = o tempo acumulado (dia) a partir de primeiro de abril.

No período seco o escoamento superficial é quase que na sua totalidade (91,4 %) devido à participação do escoamento de base, resultante do processo de drenagem do lençol de água superficial, causando o deplecionamento do reservatório subterrâneo. Observa-se que ao final deste período, a vazão de base foi 54,2 % da vazão inicial, ou seja,

um decaimento de 45,8 %. Tal valor que pode ser considerado pequeno e espelha o elevado grau de inércia apresentado pelo escoamento subterrâneo, fato que impacta positivamente no grau de regularização do regime de escoamento da bacia.

**Tabela 2 – Precipitação mensal, vazão diária média mensal e deflúvio mensal para o Alto Ribeirão das Antas, Poços de Caldas – MG.**

Mês	Tempo acumula (Dia)	Precipit. Mensal (mm)	Vazão Média Diária Mensal ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )			Deflúvio Mensal (mm)		
			$Q_{\text{Total}}$	$Q_{\text{Base}}$	$Q_{\text{Sup. Direto}}$	Total	Base	Superf. Direto
Abr	30	7,9	3,67	3,51	0,15	62,3	59,8	2,6
Mai	61	90,4	3,07	3,07	0,00	53,9	53,9	0,0
Jun	91	123,7	4,10	2,75	1,34	69,7	46,8	22,8
Jul	122	4,1	2,55	2,43	0,12	44,8	42,8	2,1
Ago	153	54,6	2,30	2,15	0,15	40,4	37,8	2,6
Set	183	4,8	1,97	1,91	0,06	33,5	32,4	1,1
Out	214	254,2	3,12	2,17	0,96	54,9	38,1	16,8
Nov	244	339,1	7,36	2,36	5,00	125,2	40,2	85,0
Dez	275	230,6	7,38	2,56	4,82	129,7	45,0	84,6
Jan	306	349,5	9,25	2,76	6,49	162,6	48,6	114,1
Fev	334	171,5	8,28	2,95	5,33	131,4	46,8	84,7
Mar	365	165,1	6,23	3,15	3,09	109,6	55,3	54,3
<b>TOTAL</b>	<b>-</b>	<b>1787,6</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>1018</b>	<b>547,5</b>	<b>470,7</b>

Para o período de recarga de outubro a abril, produzido pela parcela da precipitação que infiltra no solo estimou-se uma variação linear para o processo de recarga na razão de  $0,0065 (\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}) \cdot \text{dia}^{-1}$ , segundo metodologia contida em (MELLO & SILVA, 2013).

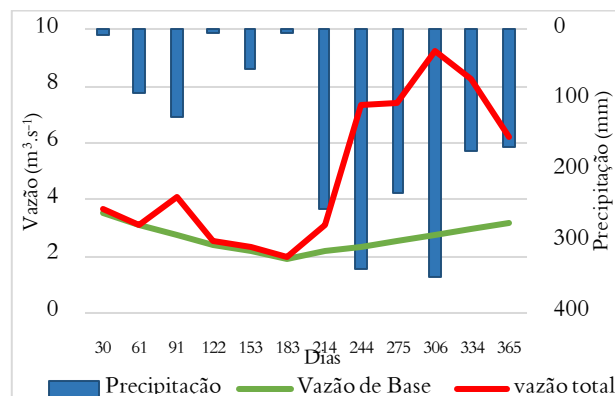
A Tabela-2 apresenta os valores resultantes para escoamento de base ( $Q_{\text{base}}$ ) e escoamento superficial direto ( $Q_{\text{Sup. direto}}$ ). Sendo que a diferença entre a vazão total e a vazão de base corresponde à parcela do escoamento superficial direto. Este procedimento está representado no Figura 5. No período úmido há a predominância do escoamento superficial direto (57,1 %), devendo-se destacar que apesar do escoamento de base ser menor, o seu valor sinaliza a capacidade da área da bacia de infiltrar boa parte da precipitação e promover a recarga do lençol superficial que sustenta o escoamento de base.

$$Q = 2,184 * NA^{2,087} ; (R^2 = 0,9814) \quad (2)$$

A Tabela-2 também apresenta o deflúvio anual em lâmina foi de 1018,2 mm e os valores do deflúvio de base e do deflúvio superficial direto, foram 547,5 mm e 470,7 mm respectivamente. Estes valores relativizados com o deflúvio anual representam 53,8 % e 46,2 % respectivamente, o que sinaliza uma predominância do escoamento de base sobre o superficial direto. 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 e com bom grau de regularização. 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. 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/MG.



**Figura 5- Hietograma e Fluviograma mensal na seção P no Alto Ribeirão das Antas.**



Em termos de sustentabilidade do regime de escoamento, o ideal, é que haja a restituição ao aquífero, no mínimo da lâmina drenada. Quando se relaciona esta lâmina de restituição com a precipitação, identifica-se um índice que pode expressar a taxa de restituição do aquífero (TRAP) estimada com base na Equação 4.

$$TRAP = \left( \frac{\text{Deflúvio base anual}}{\text{Precipitação anual}} \right) * 100 \quad (4)$$

$$TRAP = \frac{547,5}{1787,6} * 100 = 30,6 \%$$

Ou seja, pelo menos 30,6 % da precipitação anual deverá ser efetiva, na recarga do lençol superficial, para que se possa ter uma sustentabilidade do regime de escoamento, atenuando-se a variação interanual.

### 3.2 Estimativa de Concentração de Sedimentos em Suspensão no Ribeirão das Antas

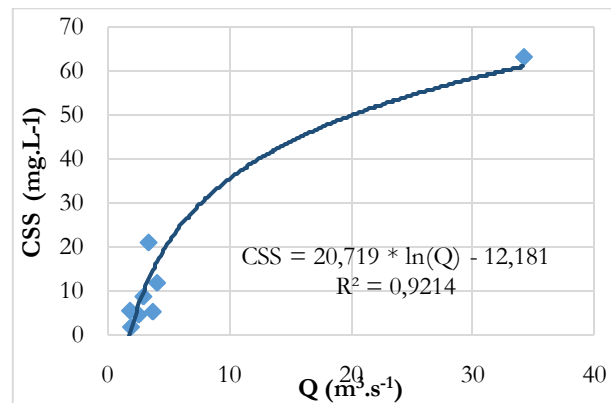
As concentrações de sedimento suspenso (CSS) e as vazões (Q) determinadas simultaneamente foram apresentadas na Tabela-1, sendo que as CSS variaram entre os valores de 1,86 mg.L<sup>-1</sup> a 96,46 mg.L<sup>-1</sup>, enquanto que as vazões, estiveram entre 1,79 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup> e 34,15 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>. A função CSS=f(Q) representada pela Equação-5, com coeficiente de determinação (R<sup>2</sup> = 0,921), o qual sinaliza a potencialidade do modelo para estimar valores de CSS com bom grau de confiabilidade (Figura 6).

$$CSS = 20,719 * \ln(Q) - 12,181 \quad (5)$$

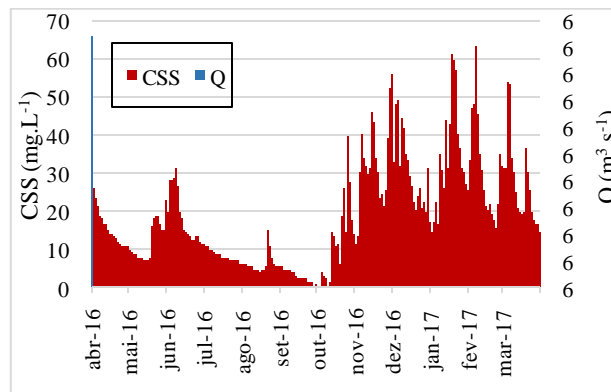
Onde, CSS = concentração de sólidos em suspensão (mg.L<sup>-1</sup>) e Q = vazão (m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>).

Segundo Ferguson (1987) e Carvalho (2008) a representatividade da curva de calibração depende fundamentalmente, da qualidade dos dados, e, de sua representatividade, número de pontos utilizados e amplitude de variação entre os mesmos. Com base no fluviograma gerado para a seção, e na Equação-5, estimaram-se as CSS, Figura 7.

**Figura 6 – Curva de calibração  $CSS=f(Q)$ , para o Alto Ribeirão das Antas em Poços de Caldas/MG.**



**Figura 7 – Vazão e CSS estimada em intervalos de 30 minutos para o Alto Ribeirão das Antas em Poços de Caldas/MG.**



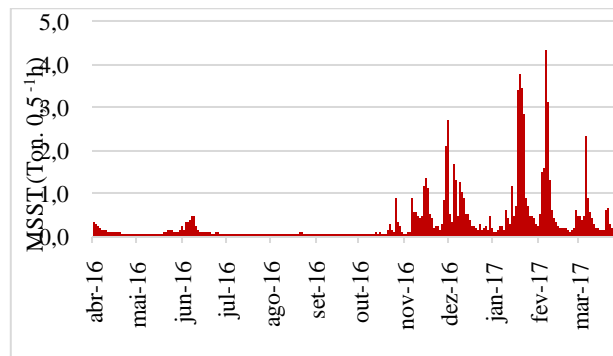
A análise de todos os dados de CSS obtidos em intervalos de 30 minutos, permitiu identificar o valor máximo de  $67,67 \text{ mg.L}^{-1}$ , o médio de  $17,91 \text{ mg.L}^{-1}$  e o mínimo de  $0,0 \text{ mg.L}^{-1}$ . Estes valores de CSS se encontram abaixo dos limites estabelecidos pela Resolução CONAMA 375/2005, o que também sinaliza uma provável redução nos custos de tratamento da água para fins de abastecimento humano. Porém, o mais relevante é a estimativa da taxa de transporte de sedimentos em suspensão, ou seja, a massa de sedimentos transportados em suspensão (MSST) num intervalo de 30 minutos tempo obtida pela Equação-6.

$$MSST_i = VE_i * CSS_i = \frac{(Q_i * 1800 * CSS_i)}{1000} \quad (6)$$

Sendo,  $MSST_i$  = a massa de sólidos suspensos transportados (kg);  $VE_i$  = o volume de água escoado ( $\text{m}^3$ );  $CSS_i$  = a concentração de sólidos em suspensão ( $\text{mg.L}^{-1}$ ), todos os valores associados a um intervalo de tempo  $i$  de 30 minutos e  $Q_i$  = a vazão ( $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ ).

A Figura 8 apresenta distribuição temporal da MSST, dentre os valores estimados destacam-se o valor máximo de 4465 kg (4,46 t) e o valor médio de 244 kg. Considerando a taxa máxima, ao final de um dia, a massa carregada equivaleria a  $214,3 \text{ ton.dia}^{-1}$ , a  $78230,4 \text{ ton.ano}^{-1}$ , ou ainda  $5,13 \text{ ton.}(\text{ha.ano})^{-1}$ , que naturalmente seriam taxas extremamente elevadas o que representa situação de alerta em termos ambientais.

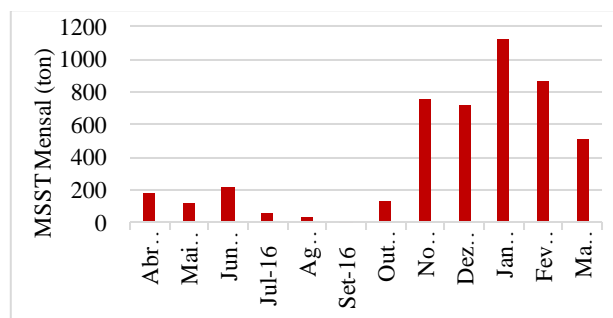
**Figura 8 – Massa de Sólidos Suspensos Transportados (MSST) estimada em intervalos de 30 minutos para o Alto Ribeirão das Antas em Poços de Caldas/MG.**



Já, levando-se em conta a taxa média para o intervalo, resultaria  $11,71 \text{ ton.dia}^{-1}$ ,  $4274 \text{ ton.ano}^{-1}$ , ou,  $0,280 \text{ ton.(ha.ano)}^{-1}$ .

Trabalhando-se na escala mensal de tempo, os valores obtidos estão apresentados na Figura 9.

**Figura 9 – Massa de Sólidos Suspensos transportados mensalmente para o Alto Ribeirão das Antas em Poços de Caldas/MG.**



A análise dos resultados permite destacar o mês de setembro como o de menor taxa de transporte mensal de sedimentos ( $14 \text{ t.mês}^{-1}$ ) 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 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. A MSST na estação seca foi de  $13,5 \%$  do transportado no ano, e, portanto, a estação chuvosa participou com  $86,5 \%$  valores bem próximos dos estimados para o deflúvio superficial nas respectivas estações do ano.

Durães et al (2016) estimaram a descarga de sólidos em suspensão na parte Alta da Bacia do Rio Iguaçu, com valores entre  $0,47$  a  $5124 \text{ t.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ . 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 à áreas com menores declividades e com participação expressiva de cobertura vegetal de mata, situação mais próxima da área em estudo. De acordo com Lima et al (2003), a Bacia Hidrográfica do Ribeirão das Antas apresenta uma baixa taxa de transporte de sedimento suspenso (segundo a classificação proposta pelos autores: taxa

inferior a  $0,70 \text{ t.}(\text{ha.ano})^{-1}$  é considerada baixa).

### 3.3 Taxa de Transferência de Sedimentos Suspensos (TTSS)

A TTSS é estimada pela Equação-1 que além da massa de sólidos suspensos transportados (MSST) requer a estimativa da perda de solo por erosão hídrica (PSEH), realizada a partir dos resultados obtidos por PURCINO (2017) para os solos da sub-bacia do Córrego Chapadão, que se insere dentro da bacia do Ribeirão das Antas. Os valores de perdas de solo estimados foram de  $17,78 \text{ t.}(\text{ha.ano})^{-1}$  para o Cambissolo; de  $18,00 \text{ t.}(\text{ha.ano})^{-1}$  para Neossolo Rigolítico; de  $10,22 \text{ t.}(\text{ha.ano})^{-1}$  Latossolo Vermelho Amarelo e de  $4,18 \text{ t.}(\text{ha.ano})^{-1}$  para Solos Indiscriminados de Várzea. Ponderando-se estes valores com suas áreas de ocorrência, resultou em  $11,17 \text{ t.}(\text{ha.ano})^{-1}$  as perdas médias de solo na área da bacia.

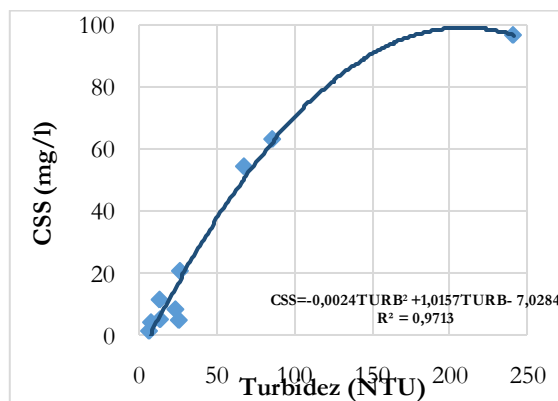
Portanto, considerando-se apenas o transporte de sedimentos em suspensão, resulta em uma taxa de 2,51 %, a TTSS. Esta taxa situa-se dentro dos valores indicados por Beskow et al (2009) para a região do Alto Rio Grande também na região do Sul de Minas e com condições ambientais/climáticas muito próximas.

### 3.4 Estimativa do transporte de sedimentos em suspensão por sensor de turbidez

Com os resultados da CSS obtidos nas campanhas de campo e os valores de turbidez (TURB) registrados pelo sensor de turbidez simultaneamente ao processo de coleta da amostra, estabeleceu-se a curva  $\text{CSS}=f(\text{TURB})$ , Equação-7 e representada no Figura 10.

$$\text{CSS} = -0,002 * \text{TURB}^2 + 1,015 * \text{TURB} - 7,028 \quad (7)$$

**Figura 10 – Curva de calibração  $\text{CSS}=f(\text{TURB})$  para o Alto Ribeirão das Antas, Poços de Caldas – MG.**



Durante o período da pesquisa o sensor de turbidez apresentou situações que culminaram na eliminação de alguns registros, que totalizaram aproximadamente 1/3 do número potencial de registros, seja por registro de valores muito elevados, como acima de 500 NTU, seja por colapso do alimentador de energia do sistema. 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.

Com base na Equação-7 para estimar a CSS, como existiram falhas no registro de

turbidez a curva de CSS estimada 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, estimaram-se alguns valores de referência que permitem uma avaliação inicial do potencial do sensor de turbidez em monitorar o transporte de sólidos em suspensão.

Os valores máximo e médio da CSS(TURB) foram de 70,88 mg.L<sup>-1</sup> e de 16,83 mg.L<sup>-1</sup> respectivamente, os quais são respectivamente 4,7 % a mais e 6 % a menos daqueles estimados pelo modelo CSS= f(Q), o que sinaliza uma boa performance do sensor de turbidez.

Em termos de massa de sólidos suspensos transportados adotou-se o mesmo procedimento de estimativa, empregando-se a Equação 6, estimou-se a MSST pela curva CSS=f(TURB) foi 0,258 ton.(ha.ano)<sup>-1</sup>. A taxa máxima estimada foi de 4,08 ton.0,5h<sup>-1</sup> equivalente ao carreamento de 195,71 ton.dia<sup>-1</sup> e a 4,69 ton.(ha.ano)<sup>-1</sup>.

A relação entre o método de estimativa direta, curva-chave CSS=f(Q) e o método de estimativa indireta, CSS=f(TURB), foi obtida por meio da Equação 8.

$$R = \frac{MSST(CSS=f(TURB))}{MSST(CSS=f(Q))} * 100 \quad (8)$$

$$R = \frac{0,258}{0,280} * 100 = 89,5\%$$

O que permite interpretar que a estimativa da massa de sedimento suspenso transportada em todo o período, pelo método indireto CSS=f(TURB) foi 89,9 % daquela estimada pelo método direto CSS=f(Q).

Portanto, tomando-se como base os resultados estimados para o valor máximo, o valor médio e o valor total da massa transportada na seção de monitoramento, pode-se avaliar de forma positiva, o bom desempenho do sensor de turbidez, para as condições prevalentes no regime de escoamento no período de estudo. Esta sinalização deve ser aferida de forma exaustiva e criteriosa, para tornar-se uma afirmativa com mais lastro e fundamento, pois o monitoramento do transporte de sólidos em suspensão, é estratégico em termos de avaliação da sustentabilidade ambiental das bacias hidrográficas.

#### 4. CONCLUSÕES

Os valores das vazões de referência do escoamento superficial sinalizam um regime bem regularizado, com baixos valores para as condições de máximo e elevados valores para as condições média e mínima. Os indicadores do processo de transporte de sedimentos sinalizam valores bem baixos, representando um ambiente com bom grau de proteção ambiental. O regime de escoamento superficial e o hidrossedimentológico se mostraram altamente correlacionados.

Os indicadores de desempenho do sensor de turbidez mostram um elevado potencial de utilização, fato que deve ser avaliado por um período de tempo mais prolongado para a ratificação deste comportamento.

No entanto, é fundamental ressaltar que o sensor óptico de turbidez requer cuidados em termos operacionais, como o posicionamento do sensor em relação ao fluxo, os suportes de proteção e fixação, e a limpeza periódica (quinzenal), sobretudo, no período chuvoso.

#### 5 AGRADECIMENTOS

Departamento Municipal de Energia – DMAE - Poços de Caldas; Agência Nacional de Energia Elétrica- ANEEL; Agência Nacional de Energia Nuclear - CNEN e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

APHA. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation. 1998.

ASSELMAN, N.E.M. Fitting and interpretation of sediment rating curves. **Journal of Hydrology**, 48(1): 234-228, 2000.

AULENBACH, B.T.; HOOPER, R.P. The composite method: an improved method for stream-water solute load estimation. **Hydrology Processes**. 47(4): 203-229, 2006.

BELLINASSO, T.B.; PAIVA, J.B.D. Avaliação da Produção de Sedimentos em Eventos Chuvosos em uma Pequena Bacia Hidrográfica Semi-Urbana de Encosta. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, 12(4): 169-181, 2007.

BESKOW, S. et al. Soil erosion prediction in the Grande river basin, Brazil using distributed modeling. **Catena**, 79(1): 49-59, 2009.

CARVALHO, N.O. **Hidrossedimentologia - Prática**. Rio de Janeiro: Editora Interciências, 2008.

COOPER, D.M.; WATTS, C.D. A comparison of river load estimation techniques: application to dissolved organic carbon. **Environmetrics** 13(7): 33–50, 2002.

DELMAS, M. et al. River basin sediment flux assessments. **Hydrological Processes** 25(10): 1587–1596, 2011.

DURÃES, M.F.; MELLO, C.R. Hydrosedimentologic disturbance index applied to watersheds of Minas Gerais State. **Ciência e Agrotecnologia**. 38(1): 61-67, 2014.

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**. 21(4): 728-741, 2016.

FERGUSON, R.I. River loads underestimated by rating curves. **Water Resour Research** 6(1): 22-74, 1986.

FERGUSON, R.I. Accuracy and precision of methods for estimating river loads. **Earth Surf Process Landforms** 12(1): 95-104, 1987.

MELLO, C.R.; SILVA, A.M. **HIDROLOGIA: Princípios e Aplicações em Sistemas Agrícolas**. Editora: UFLA; 2013.

MELLO, C.R. et al. Multivariate models for annual rainfall erosivity in Brazil. **Geoderma**, 202(1): 88-102, 2013.

OLIVEIRA, A.S. et al. Stream flow regime of springs in the Mantiqueira Mountain range region, Minas Gerais State. **CERNE**, 20(3): 109-121, 2014.

OLIVEIRA, F.G.C. Influência da concentração e da granulometria na medida da turbidez com o uso de sensor ótico. Mestrado em Ciência e Engenharia Ambiental. Universidade Federal de Alfenas – Poços de Caldas – MG, 70p. 2017.



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

TAGERT, M.L.M; MASSEY, J.H.; SHAW, D.R. Water quality survey of Mississippi's Upper Pearl River. **Science of the Total Environment**, 481(1): 564-573, 2014.