



## Vazão líquida, sedimentos em suspensão e turbidez na microbacia do rio Caiabi, no ecotóno Cerrado-Amazônia

Evellynn Sato SIRQUEIRA<sup>1</sup>, Frederico Terra de ALMEIDA<sup>1,2\*</sup>, Handrey Borges ARAÚJO<sup>2</sup>, Cornélio Alberto ZOLIN<sup>3</sup>, Glauber Altrão CARVALHO<sup>4</sup>, Rhavel Salviano Dias PAULISTA<sup>1</sup>, Apoliano Francisco da SILVA<sup>2</sup>, Daniela Roberta BORELLA<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Universidade Federal de Mato Grosso, Sinop, MT, Brasil.

<sup>2</sup>Instituto de Ciências Agrárias e Ambientais, Universidade Federal de Mato Grosso, Sinop, MT, Brasil.

<sup>3</sup>Embrapa Agrossilvipastoril, Sinop, MT, Brasil.

<sup>4</sup>Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, Campo Grande, MS, Brasil.

<sup>5</sup>Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, MT, Brasil.

\*E-mail: fredterr@gmail.com

(ORCID: 0000-0002-0300-9719; 0000-0003-1055-5766; 0000-0003-4453-9932; 0000-0003-3028-8722; 0000-0001-5234-6562; 0000-0003-1920-1569; 0000-0001-7144-6606; 0000-0003-2941-2116)

Submetido em 07/07/2022; Aceito em 08/11/2022; Publicado em 28/11/2022.

**RESUMO:** Objetivou-se determinar as vazões líquidas, as concentrações de sedimentos em suspensão e a turbidez em uma seção fluviométrica, na região central da microbacia hidrográfica do rio Caiabi (MBHRC), localizada na transição da floresta Amazônica e do Cerrado. Foram estabelecidas curvas-chaves para as vazões líquidas e sólidas, além de estimativas da turbidez. O monitoramento a campo ocorreu entre dezembro de 2020 e dezembro de 2021, com mensuração mensal de vazões líquidas e coletas de amostras de água e sedimentos. Os resultados adquiridos possibilitaram ajustes da curva-chave líquida com índice de Nash-Sutcliffe (NSE) de 0,9928, coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 0,9964 e do desvio médio absoluto (D%) de 3,7264. Por meio de ajuste de relações entre as variáveis avaliadas, observou-se que a descarga líquida pode explicar cerca de 80% da descarga de sedimentos na MBHRC, enquanto, a concentração de sedimentos em suspensão pode explicar cerca de 70% da descarga total de sedimentos. Os valores de turbidez medidos por turbidímetro foram correlacionados com a concentração de sedimentos em suspensão e com as descargas sólidas em suspensão, resultando em valores de  $R^2$  de até 0,8807 (NTU x C<sub>ss</sub>) e  $R^2$  de até 0,7185 (NTU x Q<sub>ss</sub>).

**Palavras-chave:** hidrossedimentologia; turbidímetro; concentração de sedimentos; correlação.

## Net flow, suspended sediments and turbidity in the Caiabi River microbasin, in the Cerrado-Amazon ecotone

**ABSTRACT:** The objective was to determine the liquid flows, the suspended sediment concentrations and the turbidity in a fluviometric section, in the central region of the Caiabi River microbasin (MBHRC), located in the transition between the Amazon forest and the Cerrado. Key curves were established for liquid and solid flows, in addition to turbidity estimates. Field monitoring took place between December 2020 and December 2021, with monthly measurement of liquid flows and collection of water and sediment samples. The acquired results made it possible to adjust the net key curve with a Nash-Sutcliffe index (NSE) of 0.9928, coefficient of determination ( $R^2$ ) of 0.9964 and absolute mean deviation (D%) of 3.7264. By adjusting the relationships between the variables evaluated, it was observed that the net discharge can explain about 80% of the sediment discharge in the MBHRC, while the concentration of suspended sediments can explain about 70% of the total discharge of sediment. The turbidity values measured by Turbidimeter were correlated with the concentration of suspended sediments and with the total solid discharges, resulting in  $R^2$  values up to 0.8807 (NTU X Q<sub>ss</sub>) and  $R^2$  values up to 0.7185 (NTU x C<sub>ss</sub>).

**Keywords:** hydrosedimentology; turbidimeter; sediment concentration; correlation.

### 1. INTRODUÇÃO

O processo de sedimentação abrange a erosão, o transporte e a deposição de sedimentos. Este fenômeno ocorre de maneira natural no meio ambiente, mas tem sido intensificado e acelerado significativamente pelas atividades humanas. A falta de planejamento em bacias hidrográficas e o uso inadequado de técnicas de manejo do solo influenciam diretamente a dinâmica dos sedimentos nas bacias hidrográficas, favorecendo a erosão dos solos e o aumento da carga de sedimentos no rio. Após ocorrer a erosão, esses

sedimentos chegam ao corpo hídrico, no qual são transportados em suspensão ou pelo leito do canal (PEIXOTO et al., 2020).

Realizar o monitoramento hidrossedimentológico de bacias hidrográficas é fundamental para a obtenção de informações quanto a produção de sedimentos e a quantificação de impactos relacionados ao uso e manejo do solo associados com as ações antrópicas. A investigação da produção e do transporte de sedimentos pode ser realizada a partir de medições diretas da descarga sólida nos cursos

d'água, porém, essas medições apresentam limitações técnicas em eventos extremos e não permitem observações contínuas (SIMIONI et al., 2021).

O monitoramento e a análise eficiente dos processos sedimentológicos são fundamentais para o bom planejamento e gerenciamento de bacias hidrográficas, ou seja, o melhor conhecimento do comportamento hidrossedimentológico e das características do transporte de sedimento em uma bacia, permitem adoção de medidas para adequada gestão e uso dos recursos hídricos. Desta maneira, é possível realizar medidas à campo para obter informações de vazão e coletar amostras de uma seção de análise, afim de mensurar a concentração de sedimentos por meio de procedimentos laboratoriais. Todo este processo pode ser simplificado por meio de modelagens, na qual é possível realizar análises da produção de sedimentos, minimizando altos custos de monitoramento a campo e possibilitando a previsão de cenários ambientais alternativos. (PEIXOTO, 2020; LIMA et al., 2021).

O estabelecimento de uma curva-chave é o estudo inicial para a obtenção de dados fluviométricos contínuos, pois determina a vazão do rio através de análise gráfica e hidráulica de uma relação entre a lâmina d'água e a vazão, e seu estudo permite, através de análise estatística, otimizar as informações hidrológicas (DIAS et al., 2019). Além disso, possibilita a estimativa da descarga sólida quando medidas e relações são estabelecidas com sedimentos em suspensão e/ou de arrasto.

O aporte de sedimentos em cursos d'água (sedimentos em suspensão) podem ser obtidos por medição direta na seção de controle, mas com os avanços ocorridos nas últimas décadas, em termos de tecnologias, este monitoramento tem como alternativa a implantação de sistemas de monitoramento mais eficientes, como é o caso dos sensores de turbidez (SARI et al., 2017).

A análise de turbidez é de grande importância para o monitoramento ambiental, visto que está relacionada com a transparência da água, que por sua vez, é uma característica que afeta o espalhamento e absorção de luz pelas partículas sólidas em suspensão. Quando a água é considerada muito turva, aumenta a dificuldade de entrada de luz solar e causa modificações nos ciclos biodinâmicos, diminuindo a fotossíntese. Além disso, podem ocorrer efeitos nas questões financeiras em atividades do setor agropecuário, como por exemplo, o entupimento de equipamentos de irrigação; e interferir na eficiência de geração de energia das usinas de hidrelétricas por conta do processo de sedimentação em reservatórios (FERNANDES et al., 2017; SILVA, 2018).

Relacionar a concentração de sedimentos em suspensão com a turbidez em massas de água em movimento tem um grau de complexidade, pois a turbidez também é dependente das propriedades das partículas de sedimentos transportados, das características do escoamento e do tipo de sensor empregado. Assim sendo, a desconsideração ou a representação inadequada desses fatores podem limitar a aplicabilidade dessa tecnologia, resultando em curvas de calibração não confiáveis e, conseqüentemente, gerando modelos que muitas vezes não são aplicáveis a condições relativamente diferentes daquelas para as quais o modelo foi desenvolvido (SARI et al., 2015; SARI et al., 2017).

Dessa maneira, este trabalho teve como objetivo estabelecer as curvas-chaves líquida e sólida e relacionar a turbidez com variáveis medidas e estimadas de sedimentos (concentração de sedimentos em suspensão e descarga de

sedimentos em suspensão), para a região central da microbacia hidrográfica do rio Caiabi.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1. Local de Estudo

O estudo foi realizado entre 2020 e 2021 na microbacia hidrográfica do rio Caiabi (MBHRC), considerada como uma sub-bacia hidrográfica da região do Alto Teles Pires. Localizada na região Norte do estado do Mato Grosso, e inserida na transição entre a floresta Amazônica e o Cerrado, o rio Caiabi, possui uma extensão de 51,17 km e a MBHRC apresenta rede total de cursos d'água de 135,38 km, área de drenagem de 441,09 km<sup>2</sup> e altitude média de 378,18 m (DORNELES et al., 2019).

O clima local é caracterizado por chuvas concentradas no verão/outono e deficiências hídricas no inverno/primavera, com precipitação média anual de 1.974 mm e temperatura média anual de 24,7°C (SOUZA et al., 2013). Os tipos de solos predominantes na área de estudo são os Latossolos Vermelho-Amarelo Distrófico e com textura variando de argilosa a franco-arenosa (ALVES et al., 2022).

A seção fluviométrica de controle, onde foram monitorados as vazões líquidas e os sedimentos, foi instalada a 21,3 km da confluência do rio Caiabi com o rio Teles Pires (Figura 1).

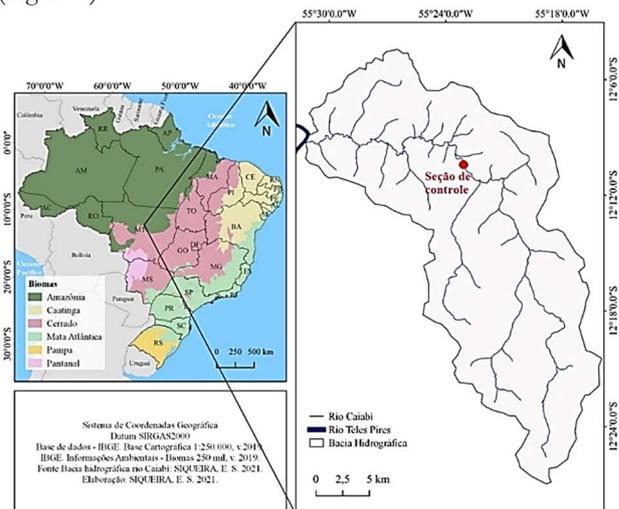


Figura 1. Localização da microbacia hidrográfica do rio Caiabi e da seção fluviométrica de monitoramento, Mato Grosso, Brasil.

Figure 1. Location of the Caiabi River watershed and the fluvimetric section, Mato Grosso, Brazil.

### 2.2. Medição da vazão líquida

Foram realizadas 12 medições de cota e vazão líquida, no período de dezembro de 2020 a dezembro de 2021. Por meio do método de meia seção, foi determinada a vazão líquida, multiplicando-se a velocidade média pela área de influência de cada vertical (8 verticais no total), e de acordo com a metodologia proposta por Santos et al. (2001), estabeleceu-se a curva-chave líquida.

O ajuste de dados se deu por equações do tipo potencial (Equação 1), modelo que se assimila ao tipo de relação entre cota e vazão líquida encontrado em equações para regime permanente e uniforme.

$$Q = a (H - H_0)^b \quad (01)$$

em que:  $Q$  é a vazão líquida (m<sup>3</sup>/s);  $H$  é a cota observada no referencial linimétrico (m);  $H_0$  é a cota no referencial linimétrico

para a qual a vazão líquida será nula (m); *a* e *b* são coeficientes adimensionais característicos de cada local e/ou período monitorado.

Os valores de *a*, *b* e *H0* foram estimados pelo método dos mínimos quadrados, com o objetivo de encontrar as menores diferenças entre as vazões observadas e as vazões estimadas para uma mesma cota. Empregou-se a ferramenta Solver, que emprega uma rotina de ajuste de mínimos quadrados iterativa para produzir a qualidade ideal de ajuste entre dados e função (COUTINHO, 2019). Nesse caso, considerou-se as restrições: i) método de solução GRG não linear; ii) precisão de restrição de 0,000001; iii) escala automática; iv) convergência 0,001 (GRG não linear); v) encaminhar derivativos; vi) propagação aleatória com limites necessários em variáveis.

### 2.3. Monitoramento de Descarga Sólida

A amostragem dos sedimentos foi realizada de acordo com a metodologia proposta por Carvalho (2008), sendo utilizado para amostras de suspensão, o equipamento US DH-48 com o bico 3/16" ("K = 0,4"), após a avaliação de testes de eficiência de amostragem. A coleta foi realizada com amostras "pontuais" e "compostas", sendo definidas como:

i) Amostra Pontual: foram realizadas amostragens em cada vertical (8 verticais coletadas), e armazenadas separadamente em potes plásticos para determinação de *C<sub>ss</sub>* (concentração de sedimentos em suspensão) por vertical;

ii) Amostra média das pontuais: mantendo a amostragem supracitada, obteve-se a *C<sub>ss</sub>* média das verticais;

iii) Amostra Composta: foram obtidas sub-amostras de cada vertical (com mesmo número de garrafas amostradas) e foram homogeneizadas em uma única amostra de aproximadamente 10 litros.

Para determinar a concentração de sedimentos em suspensão, foi empregado filtração em sistema de polisulfona à vácuo, sendo as amostras filtradas em membranas de abertura igual a 0,45 µm, e secas em estufa a 105° C por 1 hora, antes e depois das filtrações, sendo posteriormente resfriadas em dessecador e pesadas. Por fim, calculou-se a concentração em cada amostra, conforme Equação 2:

$$C_{ss} = \frac{mf - mi}{V} \quad (02)$$

em que: *C<sub>ss</sub>* é a concentração de sedimentos em suspensão (mg/L); *mf* é a massa final da membrana seca com sedimento (mg); *mi* é a massa inicial da membrana seca e limpa (mg); *V* é o volume da amostra (L).

Após obter um valor de *C<sub>ss</sub>* das diferentes amostragens, a descarga sólida em suspensão pode ser calculada de acordo com a Equação 3:

$$Q_{ss} = 0,0864 \cdot Q \cdot C_{ss} \quad (03)$$

em que: *Q<sub>ss</sub>* é a descarga sólida em suspensão (t/dia); *Q* é a vazão líquida (m³/s); *C<sub>ss</sub>* é a concentração de sedimentos em suspensão (mg/L).

### 2.4. Turbidez

O monitoramento da turbidez ocorreu com turbidímetro da empresa SOLAR, conforme algumas características descritas a seguir:

- Range de 0 a 4000 NTU (Solução formazina);
- Erro máximo: 5%;
- Insensível a cor da água;

- Insensível a luz solar;
- Princípio de Operação: Backscattering;
- Sinal de saída: 4 a 20 mA;
- Alimentação: 8 a 35 V;
- Tempo de atualização do sinal: < 4 seg;
- Resistência a profundidade: 50 m;
- Construído em alumínio anodizado.

Este foi alocado em um tubo de PVC perfurado e posicionado na vertical 2 da seção de controle. Os dados de turbidez (em mV) foram adquiridos e armazenados em intervalos de 10 minutos, e para a instalação do sensor, o sistema de aquisição de dados foi posicionado em um suporte afim de preservar o equipamento em casos de eventos extremos.

A sonda foi calibrada com o uso da solução de Formazina de 4.000 NTU, considerando a diluição para diferentes valores de concentração (0; 5; 10; 25; 50; 100 e 200 NTU). Estabeleceu-se uma regressão linear entre os valores obtidos em mV e as concentrações em NTU.

A turbidez final foi resultado da média dos valores apresentados pelo equipamento nas respectivas horas de coleta das amostras, que tiveram um intervalo em torno de 3 horas.

### 2.5. Avaliação Estatística

O desempenho estatístico das curvas-chave ajustadas foi avaliado com base nos seguintes indicativos: índice de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE - Equação 4), Coeficiente de Determinação (*R*<sup>2</sup> - Equação 5) e Desvio Médio Absoluto (D% - Equação 6), que são considerados importantes critérios para avaliação de modelos hidrológicos (ROLIM et al, 2020).

$$NSE = 1 - \frac{\sum(Q_{obs} - Q_{cal})^2}{\sum(Q_{obs} - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (04)$$

$$R^2 = \left( \frac{\sum(Q_{obs} - \bar{Q}_{obs})(Q_{cal} - \bar{Q}_{cal})}{\sqrt{\sum(Q_{obs} - \bar{Q}_{obs})^2} \sqrt{\sum(Q_{cal} - \bar{Q}_{cal})^2}} \right)^2 \quad (05)$$

$$D(\%) = \frac{\sum |Q_{cal} - Q_{obs}|}{n} \cdot 100 \quad (06)$$

em que: *Q<sub>obs</sub>*: vazão observada em campo (m³/s); *Q<sub>cal</sub>*: vazão calculada pela equação da curva-chave (m³/s); *Q<sub>obs</sub>*: média das vazões observadas em campo (m³/s); *Q<sub>cal</sub>*: média das vazões calculadas pela equação da curva-chave (m³/s); *n*: número de eventos observados

O coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE) pode variar entre negativo infinito a 1, sendo o valor 1 indicado como um perfeito ajuste (ASCE, 1993). Conforme Silva et al. (2008), quando o valor de NSE for maior que 0,75, o desempenho do modelo é considerado "bom". Para valores de NSE entre 0,36 e 0,75, o desempenho é considerado aceitável, enquanto valores de NSE inferiores a 0,36, fazem com que o modelo seja julgado como inaceitável.

Krause et al. (2005) apontam que o intervalo do coeficiente de determinação (*R*<sup>2</sup>) está entre 0 e 1, sendo que esse indicativo descreve quanto da dispersão observada é explicada pela estimada. Um modelo irá resultar em bons valores se *R*<sup>2</sup> quanto mais próximo de 1. Contudo, é aconselhável considerar informações adicionais para a validação do modelo.

O desvio médio absoluto apresenta os seguintes intervalos e respectivas interpretações: < 10 %: muito bom; entre 10% e 15%: bom; entre 15% e 25%: satisfatório; e > 25%: o modelo produz estimativas inadequadas à tendência. (COLLISCHONN; DORNELLES, 2013).

As curvas-chave sólidas foram ajustadas por modelos matemáticos de regressão linear simples, polinomial, exponencial, logarítmica e potencial, relacionando os valores de descarga sólida em suspensão (Q<sub>ss</sub>) com a vazão líquida (Q) e também com a concentração de sedimentos em suspensão (C<sub>ss</sub>), a fim de obter o melhor ajuste da curva-chave (R<sup>2</sup> próximo a 1).

Para análise da turbidez, os valores de NTU foram relacionados com os valores de concentração de sedimentos em suspensão (C<sub>ss</sub>) e com a descarga sólida (Q<sub>ss</sub>) pelo método de regressão linear.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1. Vazão líquida

A seção hidrológica em estudo teve avaliada a sua vazão por 8 verticais espaçadas de 1 m entre si, independentemente da época do ano (Figura 2). A contribuição do escoamento das verticais na vazão líquida total obedeceu a geometria do canal, tendo as maiores vazões no centro e diminuindo gradativamente em direção às margens. As verticais 3, 4 e 5 juntas foram responsáveis por quase metade da vazão líquida na seção (49,92%), e a vertical 4 foi a maior contribuinte no geral com 17,00%. Por outro lado, ao serem somadas, as verticais 1 e 8 representaram 10,34% da vazão líquida na seção, sendo a vertical 8 a menor contribuinte com 4,63%.

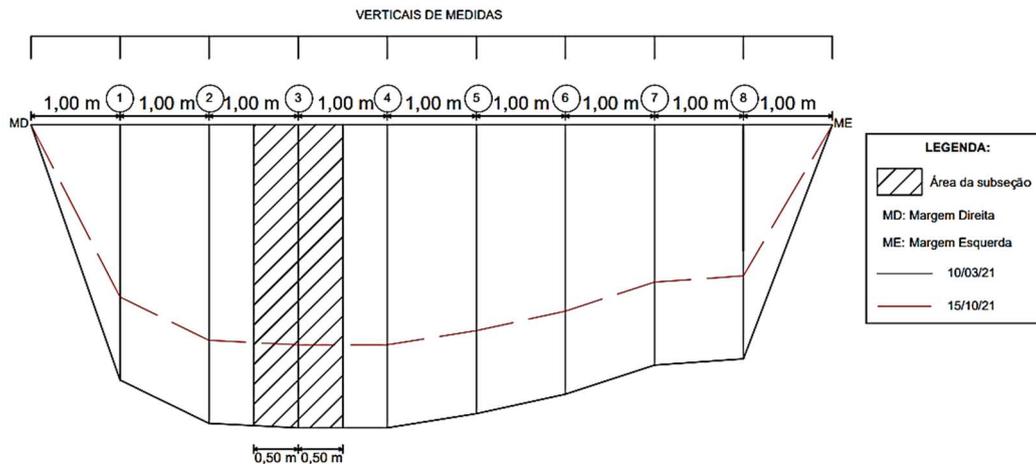


Figura 2. Perfil transversal da seção de monitoramento da microbacia hidrográfica do rio Caiabi com alturas no dia de menor e maior vazão líquida.

Figure 2. Cross-sectional profile of the monitoring section of the Caiabi river hydrographic microbasin with levels on the day of lowest and highest liquid flow.

A curva-chave ajustada com os valores mensais de vazão líquida e cota apresentaram bom desempenho estatístico com valores do índice de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) de 0,9928 (maior que 0,75), coeficiente de correlação (R<sup>2</sup>) de 0,9964 (próximo de 1) e desvio médio absoluto (D%) de 3,7264 % (< 10%) (Figura 3).

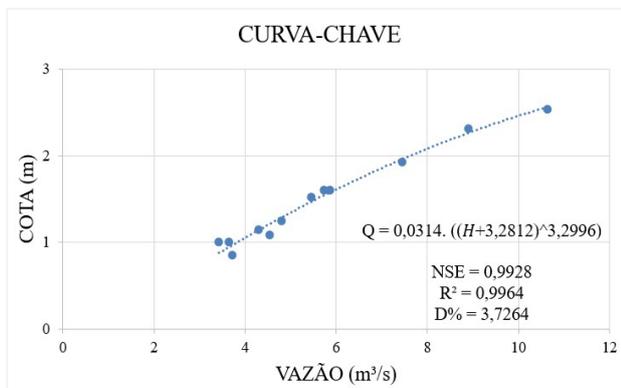


Figura 3. Curva-chave da vazão líquida na seção fluviométrica no curso médio do rio Caiabi (2020-2021).

Figure 3. Rating flow curves in the fluviometric section in the middle course of the Caiabi River (2020-2021).

Quanto ao comportamento hidrológico da seção de monitoramento, verificou-se que as variações mensais da vazão líquida acompanharam a sazonalidade climática da região, com picos de máxima e mínima das vazões entre as estações chuvosa e seca, respectivamente.

Ainda avaliando o comportamento da vazão líquida na seção de monitoramento, verificou-se que o nível de régua variou de 0,86 a 2,54m e a vazão líquida variando de 3,43 a 10,63 m<sup>3</sup>/s (Tabela 1).

#### 3.2. Descarga sólida

A partir dos valores de vazão líquida (Q) e das concentrações de sedimentos em suspensão (C<sub>ss</sub>), obtidos pelas diferentes formas de amostragens, foram obtidas as descargas sólidas em suspensão (Q<sub>ss</sub>) (Equação 3). Observa-se que, o período de maior vazão líquida teve seu pico em 10/03/21 com 10,63 m<sup>3</sup>/s, e foi também um dos períodos com uma das maiores descargas sólidas.

Com os dados de vazão líquida (Q) e de descarga sólida (Q<sub>ss</sub>), testou-se então modelos de regressão para ajustar a equação da curva-chave sólida. Para as três formas de amostragem de sedimentos em suspensão, os melhores ajustes entre Q e Q<sub>ss</sub> foram observados com a equação linear e a polinomial (Tabela 2), enquanto que, na relação entre Q<sub>ss</sub> e C<sub>ss</sub>, os modelos exponencial e potencial foram os que melhor se ajustaram (Tabela 3).

Tabela 1. Vazão líquida, concentração de sedimentos em suspensão, vazão sólida e turbidez da microbacia hidrográfica do rio Caiabi, Mato Grosso, Brasil.

Table 1. Net flow, suspended sediment concentration, solid flow and turbidity of the Caiabi river watershed, Mato Grosso, Brazil.

Data	Vertical 2			Média das Pontuais		Composta		
	Q (m³/s)	C <sub>ss</sub> -(mg/L)	Q <sub>ss</sub> -(t/dia)	C <sub>ss</sub> - média (mg/L)	Q <sub>ss</sub> - média (t/dia)	C <sub>ss</sub> -(mg/L)	Q <sub>ss</sub> -(t/dia)	Turbidez (NTU)
18/12/2020	4,55	8,20	3,22	8,67	3,41	7,84	3,08	-
28/01/2021	5,88	7,8	3,96	7,7	3,91	10,4	5,28	-
10/03/2021	10,63	12,08	11,09	11,31	10,39	10,98	10,08	17,66
07/04/2021	8,91	11,6	8,93	11,99	9,23	15,26	11,75	17,52
04/05/2021	7,44	2	1,29	3,7	2,38	6,68	4,29	7,30
15/06/2021	5,44	-	-	-	-	10,45	4,91	-
12/08/2021	4,3	5,9	2,19	5,84	2,17	4,85	1,80	-
14/09/2021	3,63	4,3	1,35	5,85	1,83	11,34	3,56	11,10
15/10/2021	3,43	15,2	4,50	12,71	3,77	12,03	3,57	16,74
20/11/2021	5,74	7,2	3,57	7,15	3,55	8,53	4,23	-
09/12/2021	4,81	-	-	-	-	8,16	3,39	-

Q: Vazão Líquida; C<sub>ss</sub>: Concentração de sedimentos em suspensão; Q<sub>ss</sub>: Descarga sólida; NTU: Unidade de Turbidez Nefelométrica.

Tabela 2. Modelos de regressão para as curvas-chave sólida entre Q<sub>ss</sub> e Q, com valores do coeficiente de determinação R<sup>2</sup>.

Table 2. Regression models for the solid key curves between Q<sub>ss</sub> and Q, with values of the coefficient of determination R<sup>2</sup>.

Regressão:	Vertical 2		Média das pontuais		Composta	
	Função	R <sup>2</sup>	Função	R <sup>2</sup>	Função	R <sup>2</sup>
Linear	$Q_{ss} = (1,063.Q) - 1,982$	0,6085	$Q_{ss} = (1,056.Q) - 1,884$	0,7133	$Q_{ss} = (1,174.Q) - 1,826$	0,7531
Exponencial	$Q_{ss} = 1,136.e^{0,185.Q}$	0,3827	$Q_{ss} = 1,187.e^{0,192.Q}$	0,6281	$Q_{ss} = 1,398.e^{0,192.Q}$	0,7052
Logarítmica	$Q_{ss} = 6,047.ln(Q) - 6,005$	0,5000	$Q_{ss} = 6,133.ln(Q) - 6,097$	0,6106	$Q_{ss} = 7,076.ln(Q) - 7,031$	0,6851
Polinomial	$Q_{ss} = (0,274.Q^2) + (2,707.Q) + 9,287$	0,7763	$Q_{ss} = (0,204.Q^2) + (1,741.Q) + 6,477$	0,8230	$Q_{ss} = (0,084.Q^2) + (0,020.Q) + 1,687$	0,7696
Potencial	$Q_{ss} = 0,557.Q^{1,061}$	0,3181	$Q_{ss} = 0,536.Q^{1,131}$	0,5550	$Q_{ss} = 0,567.Q^{1,202}$	0,6620

Q: Vazão Líquida; Q<sub>ss</sub>: Descarga sólida; R<sup>2</sup>: Coeficiente de Determinação (em negrito: Valores de melhores ajustes).

Tabela 3. Modelos de regressão para as curvas-chave sólida entre Q<sub>ss</sub> e C<sub>ss</sub>, com valores do coeficiente de determinação R<sup>2</sup>.

Table 3. Regression models for the solid key curves between Q<sub>ss</sub> and C<sub>ss</sub>, with values of the coefficient of determination R<sup>2</sup>.

Regressão:	Vertical 2		Média das pontuais		Composta	
	Função	R <sup>2</sup>	Função	R <sup>2</sup>	Função	R <sup>2</sup>
Linear	$Q_{ss} = (0,586.C_{ss}) - 0,371$	0,5076	$Q_{ss} = (0,713.C_{ss}) - 1,4201$	0,5089	$Q_{ss} = (0,762.C_{ss}) - 2,240$	0,5101
Exponencial	$Q_{ss} = 1,012.e^{0,150.C_{ss}}$	0,6905	$Q_{ss} = 1,084.e^{0,1504.C_{ss}}$	0,4690	$Q_{ss} = 1,167.e^{0,139.C_{ss}}$	0,5626
Logarítmica	$Q_{ss} = 3,811.ln(C_{ss}) - 3,047$	0,4799	$Q_{ss} = 5,257.ln(C_{ss}) - 6,2883$	0,6059	$Q_{ss} = 6,405.ln(C_{ss}) - 9,096$	0,4439
Polinomial	$Q_{ss} = (-0,043.C_{ss}^2) + (1,323.C_{ss}) - 2,914$	0,5542	$Q_{ss} = (0,005.C_{ss}^2) + (0,632.C_{ss}) - 1,115$	0,5091	$Q_{ss} = (0,071.C_{ss}^2) + (0,651.C_{ss}) - 4,190$	0,5671
Potencial	$Q_{ss} = 0,464.C_{ss}^{1,025}$	0,7178	$Q_{ss} = 3,77.C_{ss}^{1,1253}$	0,5728	$Q_{ss} = 0,281.C_{ss}^{1,244}$	0,5577

C<sub>ss</sub>: concentração de sedimentos em suspensão; Q<sub>ss</sub>: Descarga sólida; R<sup>2</sup>: Coeficiente de Determinação (em negrito: Valores de melhores ajustes).

### 3.3 Turbidez

A calibração do turbidímetro por regressão linear simples (Equação 7) resultou em R<sup>2</sup> de 0,96, o que indica ajuste satisfatório pelos valores medidos com o equipamento em mV para NTU.

$$NTU = 5,5214.mV - 49,76 \quad (07)$$

Durante o período de monitoramento, ocorreram falhas no turbidímetro, e algumas leituras foram perdidas. Contudo, fez-se a análise dos dados coletados em março, abril, maio, setembro e outubro. Assim, com a média dos dados de turbidez apresentados pelo equipamento nas respectivas horas de coleta das amostras, relacionou-se os valores de NTU com a concentração de sedimentos em suspensão (C<sub>ss</sub>) e com a descarga sólida (Q<sub>ss</sub>). As relações entre a concentração de sedimentos em suspensão e a turbidez (NTU) apresentaram valores de R<sup>2</sup> de 0,8807, 0,6031, 0,6388 para as amostragens na vertical 2, média das amostras

pontuais e composta, respectivamente (Figuras 4A-C). Enquanto para as relações entre a descarga sólida (Q<sub>ss</sub>) e a turbidez (NTU), os valores de R<sup>2</sup> foram de 0,7185, 0,6031 e 0,4056, para as mesmas amostras supracitadas (Figura 4D-F).

## 4. DISCUSSÃO

### 4.1. Vazão líquida

O excelente ajuste da curva-chave da seção de monitoramento deve-se a estabilidade da seção geométrica, conforme se verificou que a geometria do canal não apresentou variações durante o período de monitoramento (2020-2021), o que é favorável para o estabelecimento e a manutenção da curva-chave de uma seção. O mesmo foi observado por Simioni (2021) ao realizar um estudo em seção fluviométrica à jusante, no mesmo rio. Aquino et. al (2018) observaram em sua pesquisa no córrego do Riacho Fundo em Brasília, que apesar das pequenas variações no fundo do leito ao longo dos anos, não comprometeram a determinação da curva-chave.

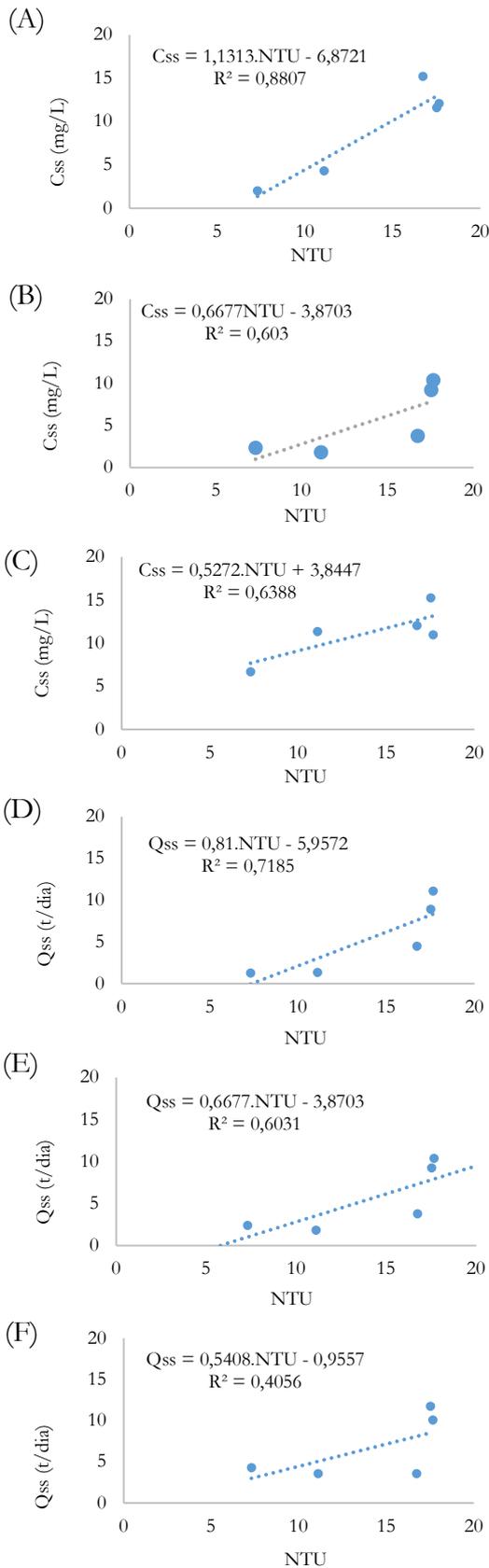


Figura 4. Relação da concentração de sedimentos em suspensão (C<sub>ss</sub>) e a descarga sólida (Q<sub>ss</sub>) com a turbidez (NTU), considerando amostragens na vertical 2 (A,D), média das pontuais (B,E) e composta (C,F), respectivamente.

Figure 4. Relation of the concentration of suspended sediments (C<sub>ss</sub>) and solid discharge (Q<sub>ss</sub>) with turbidity (NTU), considering vertical sampling 2 (A,D), point average (B,E) and composite (C,F), respectively.

#### 4.2. Descarga sólida em suspensão

Os maiores valores de vazão líquida geraram as maiores descargas sólidas na seção de monitoramento da microbacia hidrográfica do rio Caiabi. Isto também foi observado por Bento et al. (2019), com uma dinâmica semelhante ao estudar a bacia hidrográfica do rio Catolé Grande, localizada no Sudoeste do estado da Bahia, em que relacionaram estes resultados com a diferença entre os índices pluviiais ao longo das estações do ano, uma vez que com maiores lâminas precipitadas, e acréscimos na vazão líquida, registraram também um aumento na descarga de sedimentos. Ferraz et al. (2018) também destacam que a concentração de sólidos em suspensão (C<sub>ss</sub>) variou com as flutuações da vazão líquida durante o período avaliado, com a ocorrência de maior descarga sólida com o aumento da vazão líquida.

O modelo de regressão linear simples, ajustado para as diferentes formas de amostragem da descarga sólida em relação a vazão líquida, apresentou valores de R<sup>2</sup> entre 0,6085 e 0,7531, indicando que a variável vazão líquida é capaz de explicar cerca de 60 a 75% da descarga sólida em suspensão entre as diferentes amostragens na vertical 2, na média das pontuais e na composta.

Enquanto o modelo linear teve um bom ajuste para a amostragem composta, o modelo de regressão polinomial apresentou bom ajuste entre Q e Q<sub>ss</sub> tanto para a amostragem composta como para a da vertical 2 (Tabela 2).

Já ao correlacionar a Q<sub>ss</sub> com a C<sub>ss</sub> obteve-se melhores ajustes da curva-chave na análise da vertical 2 com os modelos exponencial e potencial (Tabela 3), e a concentração de sedimentos em suspensão é capaz de explicar cerca de 70 da descarga sólida em suspensão. Na análise da amostragem composta, os modelos linear e polinomial puderam explicar somente cerca de 51 a 56% da Q<sub>ss</sub>, enquanto para a análise da média das pontuais, os modelos que apresentaram melhores ajustes foram o logarítmico e o potencial, sendo capaz de explicar cerca de 60% da Q<sub>ss</sub> na MBHRC.

Segundo Simioni et al. (2021) cerca de 70% da área da bacia hidrográfica do rio Caiabi é ocupada por atividades agropecuárias enquanto o restante é ocupado por florestas e aglomerados urbanos. Esta característica favorece a formação do escoamento superficial e o impacto das gotas da chuva diretamente na superfície do solo, tendo conseqüentemente o aumento no desprendimento das partículas de solo e maiores enxurradas, acarretando o aumento da descarga de sedimentos (BENTO et al. 2019).

#### 4.3. Turbidez

A determinação de sólidos por medidas de turbidez utilizando turbidímetros é algo que ainda busca consenso nas pesquisas, como também no estabelecimento de relações que estejam amparados em variáveis mensuráveis, sendo as mais importantes as relações com C<sub>ss</sub> e Q<sub>ss</sub>. E neste panorama diversos estudos conseguiram estabelecer boas relações.

Bartels et al. (2014) ao estudarem a bacia hidrográfica do Arroio do Ouro, localizada entre os municípios de Pelotas e Morro Redondo, no Rio Grande do Sul, e relacionarem os valores de turbidez e concentração de sedimentos em suspensão, obtiveram ajustes de R<sup>2</sup> de 0,9992 para regressão polinomial e R<sup>2</sup> de 0,9852 para a regressão linear. Enquanto Aquino et al. (2018) obtiveram R<sup>2</sup> de 0,92 ao ajustar os valores de turbidez medidos pela sonda *in situ* com a concentração de sedimentos em suspensão obtidas em laboratório.

Hoffmann; Oliveira (2018) também evidenciaram em sua pesquisa na bacia hidrográfica do rio Capivari, município da Lapa-PR, que a carga sedimentar em suspensão e o nível de turbidez das amostras de água para quantificação de sedimentos, ao serem relacionados, apresentaram um coeficiente de correlação de Pearson de 0,951.

Latuf et al. (2019) verificaram que os dados de turbidez obtidos em 10 anos na bacia do rio Machado, sul de Minas Gerais, ao ser relacionados com os valores de C<sub>ss</sub>, apresentaram um coeficiente de determinação R<sup>2</sup> igual a 0,8923, considerado satisfatório.

Todos esses estudos citados encontraram correlações entre turbidez e C<sub>ss</sub> superiores com relação ao presente estudo, que pode ser explicado provavelmente pelo maior tempo de observação, melhor controle com dados em laboratório, número de amostragens, tipo de turbidímetro, granulometria do solo, dentre outras variáveis.

Dessa forma, apesar dos ajustes e das correlações dos estudos citados apresentarem bons resultados, autores afirmam que é indispensável uma análise mais detalhada quando se trata do uso de sensores de turbidez. Aquino et al. (2018) destacam que é necessário que haja um aumento no esforço amostral, na coleta de dados, assim como uma análise da granulometria e composição dos minerais nos sedimentos para uma comparação mais precisa. Dalbianco et al. (2017) concluem que o uso de turbidez para estimar a concentração de sedimentos em suspensão pode ser afetado pela metodologia de calibração, em que os testes devem ser realizados considerando os efeitos de fatores interferentes dos sedimentos (cor, tamanho e mineralogia).

Desse modo, são necessários estudos e análises complementares com o objetivo de melhoria da compreensão das tecnologias que utilizam a turbidez para estimativa da concentração de sedimentos e posterior descarga sólida pela aplicação de dados de vazão líquida, bem como os fatores que interferem nessas medições, levando em conta características físicas dos solos, condições hidráulicas dos rios e uso e cobertura da terra das bacias hidrográficas brasileiras. Assim, é importante considerar que o efeito da turbidez da água não depende apenas da concentração de sedimentos, mas, também das propriedades das partículas de sedimentos transportadas, das características do escoamento e do sensor de turbidez utilizado (SARI et al., 2015; SARI et al. 2017).

Por fim, a análise do comportamento hidrossedimentológico, concernente a concentração e descarga de sedimentos em corpos hídricos, auxiliará na definição de estratégias de controle e mitigação de impactos ambientais provocados pelas atividades humanas na modificação do uso e cobertura da terra.

## 5. CONCLUSÕES

Ajustou-se uma curva-chave líquida com índice de eficiência de Nash-Sutcliffe de 0,9928, coeficiente de correlação de 0,9964 e desvio médio absoluto de 3,7264%.

As descargas sólidas tiveram as melhores calibrações com a descarga líquida, e em qualquer forma de amostragem, com o modelo polinomial, indicando que a descarga líquida é capaz de explicar cerca de 80% da descarga de sedimentos na microbacia hidrográfica do rio Caiabi, o que não se pode dizer dos ajustes com as concentrações de sedimentos nas diferentes amostragens.

As relações entre descarga sólida em suspensão e a concentração de sedimentos em suspensão com a turbidez apresentam melhores respostas quando consideram amostras pontuais próximas do local de instalação de turbidímetro.

Há importância da calibração de aparelhos turbidímetros para uma seção hidrológica, uma vez que permite construir uma relação contínua entre vazão líquida e vazão sólida.

## 6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT) e do Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais (PPGCAM). A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - código de Financiamento – 001. A Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Mato Grosso (FAPEMAT) pelo apoio financeiro por meio do Edital 042/2016 Universal (Processo Nº: 0106570/2017), bem como pelo apoio do projeto CAPES/ANA Edital Pró Recursos Hídricos 16/2017 (Processo 88887.144957/2017-00).

## 7. REFERÊNCIAS

- ALVES, M. A. B.; BORELLA, D. R.; LUZ, C. C. S.; CASTAGNA, D.; SILVA, W. C.; SILVA, A. P.; ALMEIDA, F. T.; SOUZA, A. P. Classes de solos nas bacias dos rios Caiabi e Renato, afluentes do rio Teles Pires no sul do Amazonas. *Nativa*. v. 10, n. 3, p. 431-448, 2022. <https://doi.org/10.31413/nativa.v10i3.14192>
- AQUINO, I. G.; ROIG, H. L.; OLIVEIRA, E. S.; GARNIER, J.; GUIMARAES, E. M.; KOIDE, S. (2018). Variação temporal da descarga sólida em suspensão e identificação de minerais a partir de aperfeiçoamento de método de amostragem automática no Córrego Riacho Fundo, Brasília, Distrito Federal. *Geologia USP. Série Científica*, v. 18, p. 171-185, 2018. <https://doi.org/10.11606/issn.2316-9095.v18-140500>
- ASCE. (1993). Task committee on definition of criteria for evaluation of watershed models of the watershed management. committee irrigation and drainage division. criteria for evaluation of watershed models. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v. 119, n. 3, p. 429-442, 1993. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(1993\)119:3\(429\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1993)119:3(429))
- BARTELS, G. K.; TERRA, V. S. S.; COLLARES, G. L. Estimativa da concentração de sedimentos em suspensão com o uso de sensor ótico de turbidez na bacia do Arroio do Ouro no Rio grande do Sul. In: XI Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos, XI. *Anais...* João Pessoa, 2014. 13p. Disponível em: [https://files.abrhidro.org.br/Eventos/Trabalhos/5/e4b33b8839fdf57c6cdeb74441ebe9f\\_4bc703027252a77417fd778924a17305.pdf](https://files.abrhidro.org.br/Eventos/Trabalhos/5/e4b33b8839fdf57c6cdeb74441ebe9f_4bc703027252a77417fd778924a17305.pdf)
- BENTO, N. L.; AMORIM, J. da S.; BARROS, F. M.; SILVA, D. P. Descarga sólida em suspensão em uma bacia hidrográfica com a predominância de pastagem. *Gaia Scientia*, v. 13, n. 3, p. 57-73, 2019. <https://doi.org/10.22478/ufpb.1981-1268.2019v13n3.45307>
- CARVALHO, N. D. *Hidrossedimentologia prática*. 2 ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2008. 600p.
- COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. *Hidrologia para engenharia e ciências ambientais*. Porto Alegre: ABRH, 2013. 350p.

- COUTINHO E. S. S. Modelagem populacional utilizando regressões com Solver: aplicação para Petrópolis/RJ. **Revista Eletrônica de Matemática**, v. 5, n. 2, p. 225-240, 2019. <https://doi.org/10.35819/remat2019v5i2id3396>
- DALBIANCO, L.; RAMON F.; BARROS, C. A. P.; MINELLA, J. P. G.; MERTEN, G. H.; DIDONÉ, E. J. Sampling strategies to estimate suspended sediment concentration for turbidimeter calibration. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 21, n. 12, p. 884-889, 2017. <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v21n12p884-889>
- DIAS, L. C.; FERNANDES, L. L.; LOPES, D. F. Elaboração e extrapolação de curvas-chave na região Amazônica. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 12, n. 6, p. 2285-2301, 2019. <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/242103/34393>
- DORNELES, J. I.; ALMEIDA, F. T.; ZOLIN, C. A.; SOUZA, A. P.; SCHNEIDER, R. M. Avaliação de diferentes cenários na produção de sedimentos em uma microbacia hidrográfica amazônica. **Gaia Scientia**, v. 13, n. 4, p. 42-55, 2019. <https://doi.org/10.22478/ufpb.1981-1268.2019v13n4.44250>
- FERNANDES, A. J. D.; OLIVEIRA, J. R. A.; GOMES, E. L. S.; FERREIRA, M. L. M.; SANTOS, C. C.; LÚCIO, M. M. L. Avaliação de parâmetros físico-químicos da água dos maceios do Bessa e Intermares/PB. **Principia**, v. 1, n. 36, p. 29-41, 2017. <http://dx.doi.org/10.18265/1517-03062015v1n36p29-41>
- FERRAZ, L. L.; LIMA, F. A.; GUEDES, U. L.; SILVA, F. G. C.; ROCHA, F. A. Estimativa da descarga de sedimentos transportados na bacia hidrográfica do rio Verruga. **Agrarian Academy**, v. 5, n. 9, p. 224-233, 2018. [http://dx.doi.org/10.18677/Agrarian\\_Academy\\_2018a23](http://dx.doi.org/10.18677/Agrarian_Academy_2018a23)
- HOFFMANN, T. C. P.; OLÍVEIRA, F. A. Influência do uso da terra em áreas rurais e urbanas na produção e transporte de sedimentos em suspensão e turbidez na bacia do rio Capivari, Lapa-PR. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 19, n. 4, p. 821-836, 2018. <http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v19i4.1340>
- KRAUSE, P.; BOYLE, D. P.; BASE, F. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. **Advances in Geosciences**, v. 5, p. 89-97, 2005. <https://doi.org/10.5194/adgeo-5-89-2005>
- LATUF, M. O.; MUSSELINI, D. G.; CHINEN, H. S. S.; CARVALHO, P. H. S. Aporte sedimentar em suspensão na bacia do rio Machado, sul de Minas Gerais. **Caderno de Geografia**, v. 29, nesp. 1, p. 16-35, 2019. <https://doi.org/10.5752/p.2318-2962.2019v29 nespP16>
- LIMA, J. S.; NUNES D. D.; CHECCHIA, T. E. (2021). Aplicação do modelo SWAT como ferramenta para análises hidrossedimentológicas na bacia hidrográfica do rio Mutum Paraná – Rondônia. **Geosul**, v. 36, p. 434-453, 2021. <https://doi.org/10.5007/2177-5230.2021.e66199>
- PEIXOTO, R. A. O.; PEREIRA, C. E.; SALLA, M. R.; ALAMY FILHO, J. E.; NISHIMURA, A. Determinação da relação entre vazões líquida e sólida e análise de fatores que influenciam a dinâmica do transporte de sedimentos na Bacia Hidrográfica do Rio Jordão (UPGRH-PN 1). **Engenharia Sanitária Ambiental**, v. 5, n. 6, p. 921-931, 2020. <https://doi.org/10.1590/S1413-4152202020180137>
- ROLIM, P. A. M.; QUEIROZ, J. C. B.; JESUS, E. S.; OLIVEIRA, L. L. Uso da modelagem hidrológica para calibração de curva-chave de vazão em Rio Amazônico com efeito de remanso. **Ibero Americana de Ciências Ambientais**, v. 11, n. 5, p. 273-283, 2020. <https://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2020.005.0026>
- SANTOS, I.; FILL, H. D.; SUGAI, M. R. V. B.; BUBA, H.; KISHI, R. T.; MARONE, E.; LATERT, L. F. **Hidrometria aplicada**. Curitiba: Instituto de Tecnologia para o desenvolvimento, 2001. 372p.
- SARI, V.; CASTRO, N. M. R.; KOBİYAMA, M. Estimativa da concentração de sedimentos suspensos com sensores ópticos: Revisão. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 20, n. 4, p. 816-836, 2015. <https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/230373>
- SARI, V.; PEREIRA, M. A.; CASTRO, N. M. R.; KOBİYAMA, M. Efeitos do tamanho da partícula e da concentração de sedimentos suspensos sobre a turbidez. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 22 n. 2, p. 213-219, 2017. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522016144228>
- SILVA, E. H. **Medidor de turbidez da água por meio de processamento digital de imagens**. 2018. 109f. Dissertação [Mestrado em Mecatrônica] - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.
- SILVA, P. M. O.; MELLO, C. R.; SILVA, A. M.; COELHO, G. Modelagem da hidrógrafa de cheia em uma bacia hidrográfica da região Alto Rio Grande. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 12, n. 3, p. 258-265, 2008. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662008000300006>
- SIMIONI, C. F.; ALMEIDA, F. T.; ZOLIN, C. A.; ULIANA, E. M.; SOUZA A. P.; MARQUES, A. Solid discharge in a microbasin of the amazon region. **Ciência & Natura**, v. 43, e73, 2021. <https://doi.org/10.5902/2179460X64223>
- SOUZA, A. P.; MOTA, L. L.; ZAMADEI, T.; MARTIM, C. C.; ALMEIDA, F. T.; PAULINO, J. Classificação climática e balanço hídrico climatológico no estado de Mato Grosso. **Nativa**, v. 1, n. 1, p. 34-43, 2013. <https://doi.org/10.31413/nativa.v1i1.1334>