

ANÁLISE HIDROSSEDIMENTOLÓGICA COMO INDICADOR DAS CONDIÇÕES AMBIENTAIS EM SISTEMAS DE CABECEIRA: ESTUDO DE CASO NO ALTO CURSO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO CABAÇAL – MT.

Evandro André Félix ¹
João Henrique da Silva Massavi ²
Evaldo Ferreira ³
Joaquim Correa Ribeiro ⁴

INTRODUÇÃO

Um dos desafios da análise comparativa de dados hidrossedimentológicos de sub-bacias consiste na identificação e aplicação de dados de referência caracterizados como parâmetros. Conceituados como medida ou indicador padrão, os parâmetros permitem estabelecer relações entre dados ou conjunto de dados, bem como aferir o estado ou condição de determinada variável, sendo estes essenciais para avaliar e monitorar impactos ambientais e processos de degradação (LANGUAGES, 2013; CARVALHO et al., 2011; ZANCANELA et al., 2023).

De modo específico, os indicadores baseados em dados hidrossedimentológicos são fundamentais na avaliação do comportamento de bacias hidrográficas (MEZZOMO; PELEGRINI; MICHEL, 2019), permitindo identificar áreas mais impactadas pela atividade antrópica e de maior prioridade para a gestão ambiental local, especialmente no conjunto de sub-bacias associadas a sistemas de cabeceira.

De acordo com Hack e Goodlett (1960), os sistemas de cabeceira correspondem às áreas de origem da água, onde interagem intensamente processos hidrológicos, geomorfológicos e biológicos. Para os autores, os sistemas de cabeceira são formados pelas encostas, bacias de ordem zero e canais efêmeros ou temporários (que emergem das bacias de ordem zero e canais de primeira e segunda ordem). Naturalmente complexos, esses sistemas dão origem à manifestação e dinâmica da água no estado líquido e à rede de drenagem (GOMI; SIDLE; RICHARDSON, 2002).

¹ Professor da Secretaria de Estado de Educação-Seduc/MT, Doutorando pelo Curso de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal de Goiás-UFG, efeliks@gmail.com;

² Graduando pelo Curso de Geografia da Universidade do Estado de Mato Grosso - UNEMAT, Bolsista do CBH-Cabaçal, joao.henrique@unemat.br;

³ Professor Titular da Universidade do Estado de Mato Grosso – UNEMAT, Departamento de Geografia, evaldoferreira@unemat.br;

⁴ Professor Titular da Universidade do Estado de Mato Grosso – UNEMAT, Departamento de Geografia, joaquim@unemat.br;

Por estarem localizados em áreas mais elevadas, os sistemas de cabeceira tendem a apresentar maior variação hidrológica em termos de espaço e tempo em comparação com canais maiores, uma vez que dispõem de áreas de contribuição menores, caminhos de fluxo superficiais e subsuperficiais mais curtos; e armazenamento dimensional de água superficial e subsuperficial reduzidos (DOWNING et al., 2012). Estas áreas, portanto, são mais suscetíveis e vulneráveis ao impacto das intervenções antrópicas.

Esta vulnerabilidade é resultado das características específicas destes sistemas, que ocupam, em média, de 70% a 80% da área total de uma bacia hidrográfica. Por representarem a manifestação inicial da água corrente, entre a nascente e o canal de primeira ordem, estes sistemas dispõem de grande proporção de borda. Sendo ainda comum observar maiores índices de precipitações isoladas nestas áreas do que em toda a bacia hidrográfica. Estes elementos convergem para tornar estes ambientes mais vulneráveis aos impactos do uso da terra, sendo crucial reconhecer que pequenos riachos de cabeceira desempenham um papel dominante nas águas e servem como fonte vital de água e sedimentos (DOWNING et al., 2012; GOMI; SIDLE; RICHARDSON, 2002).

Historicamente, no Brasil, os níveis de vulnerabilidade e erosividade da paisagem foram negligenciados durante a ocupação territorial. Devido aos impactos da demanda produtiva, o país perdeu 15,7% de sua superfície de água em 30 anos. Perdas severas foram observadas nos municípios que integram a bacia hidrográfica do rio Cabaçal-MT, com perdas variando de -0,1 a -340.681 hectares por município, conforme estudo de 2022 do Projeto MapBiomás.

Neste contexto, um dos desafios impostos no gerenciamento de recursos hídricos em sub-bacias consiste na obtenção de dados hidrológicos e sedimentológicos para avaliação e proteção ambiental. Desta forma, o presente estudo visa comparar dados quantitativos de feições erosivas com dados hidrossedimentológicos, a fim de avaliar possíveis correspondências entre o número de feições erosivas e alterações morfodinâmicas sazonais de largura, profundidade, vazão e concentração de carga sólida em suspensão nas sub-bacias, avaliando as particularidades e aplicabilidade destas variáveis como parâmetro de referência e indicador das condições hidroambientais em sub-bacias que integram sistemas de cabeceira.

Conforme dados, as sub-bacias mais afetadas por voçorocas apresentaram aumento significativo na concentração de sedimentos em suspensão, bem como alterações de largura e profundidade. Sendo estes dados cruciais no diagnóstico das condições hídricas e geomorfológicas de sub-bacias, permitindo estabelecer parâmetros de referência para medidas de contenção de erosão e manejo do solo.

Conforme o mapa (Figura 01), a área de estudo está localizada no município de Reserva do Cabaçal, Mato Grosso. Com área de 1.337,02 km², o município dispõe de 55,27% de seu território drenado pelo alto curso da bacia hidrográfica do rio Cabaçal, na transição entre o planalto dos Parecis e a depressão do Pantanal. O levantamento dos processos erosivos identificou um conjunto de 14 sub-bacias ao sul do município com maior concentração de feições erosivas, das quais oito foram monitoradas. Localizadas entre as latitudes de 15°8'0" a 15°8'25" sul e entre as longitudes de 58°29'20" a 58°18'40", essas sub-bacias foram escolhidas para permitir a comparação de áreas com e sem a presença de voçorocas.

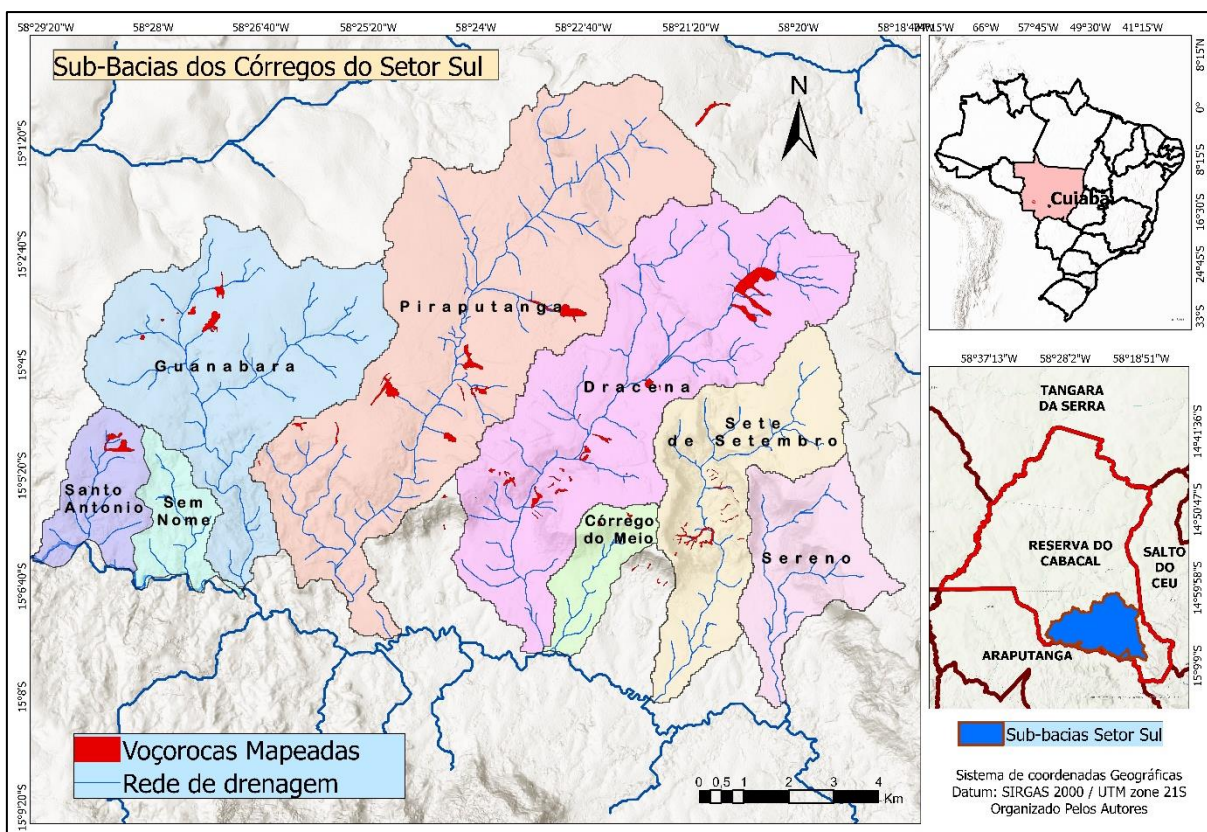


Figura 1 - Localização da área e objeto de estudo

O mapeamento da área e o objeto de estudo foram realizados de forma semiautomática utilizando o software ArcGIS Pro 3.4® e imagens do Satélite CBERS 04A, com resolução espacial de 2 m. As imagens foram validadas com outras de maio de 2023, obtidas do programa de alerta de desmatamento da Secretaria de Estado de Meio Ambiente (SEMA-MT), disponíveis no link <https://alertas.scon.com.br/matogrosso/#/dashboard>, e com observações de campo.

Os dados hidrossedimentológicos foram obtidos em trabalhos de campo realizados no fim da estiagem (06/09/2023) e no fim da estação chuvosa (16/04/2024), quando foram coletadas amostras de água em garrafas plásticas de 1 litro, previamente lavadas com água da seção, para cálculo dos sedimentos suspensos. Para cálculo da vazão, procedeu-se à aferição da velocidade do fluxo com o aparelho VEC-FLOWATCH, de haste telescópica e hélice com diâmetro de 60 mm, e com trena para as medidas de largura e profundidade da seção.

Para análise hidrossedimentológica, foram utilizados cálculos de vazão e de descarga sólida em suspensão. Os valores da área da seção molhada foram obtidos com a fórmula: $A = L \times P$ (Cunha, 2009), em que: A = área da seção; L = largura do canal; P = profundidade média. Para obter o cálculo da vazão, foi utilizada a fórmula: $Q = V \times A$ (CUNHA, 2009, p. 157–167), em que: Q = vazão; V = velocidade das águas; A = área.

Para avaliar os níveis de variação sazonal de vazão, Cssi e QSS, foi aplicada a fórmula de variação percentual: $Vp = (V^2 - V^1) / V^1 \times 100$. Observando que: Vp é a variação percentual, V² corresponde aos valores do fim da estação chuvosa, e V¹ aos valores do final da estação seca.

Para obter os valores de descarga sólida em suspensão (QSS), utilizou-se a fórmula $QSS = CSS \times QL \times 0,0864$, em que: QSS = Descarga sólida em suspensão (t/dia); CSS = Concentração de sedimento em suspensão da vertical (mg/L); QL = Descarga líquida da respectiva vertical (m³/s); e 0,0864 = fator de conversão de segundos por dia. A concentração de material em suspensão foi determinada pelo método de evaporação, através do qual a quantidade de sedimento em suspensão foi extraída por contraste de peso, sendo expressa em mg/L (Leli et al., 2010).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Conforme o levantamento, os processos erosivos classificados como voçorocas apresentam maior concentração por hectare de área nas sub-bacias ao sul do município. Para fins de estudo e planejamento, essa área foi denominada setor sul. Com área total de 18.202 ha, corresponde a 13,62% da área total do município e concentra 90% das voçorocas, com 150,3 ha mapeados. Desse total, 147,05 ha estão distribuídos nas oito sub-bacias analisadas (Tabela 01).

Tabela 1 - Área das sub-bacias e percentual de voçorocas em hectare

Sub-bacias estudadas no Setor Sul			Voçorocas Mapeadas	
Nome	Hectare	% de área	Hectare	%
Sereno	1.020.00	5.55	0.00	0.000
Sete de Setembro	1.734.63	9.50	12.76	0.736
Córrego do Meio	434.07	2.38	1.76	0.405

Dracena	3.631.71	19.88	60.30	1.660
Piraputanga	4.776.77	26.15	45.14	0.945
Guanabara	2.767.17	15.15	16.36	0.591
Sem nome	444.00	2.43	0.00	0.000
Santo Antônio	590.00	3.23	10.73	1.819

Para determinar quais sub-bacias são mais vulneráveis, pode-se considerar a combinação de hectares absolutos e o percentual de área comprometida por voçorocas. Assim, com 1,819% de área comprometida por voçorocas, a sub-bacia do córrego Santo Antônio se mostra a mais propensa a alterações hidrossedimentológicas, seguida das sub-bacias dos córregos Dracena (1,660%) e Piraputanga (0,945%). Mesmo com uma área absoluta de voçorocas significativamente menor que as das sub-bacias dos córregos Dracena e Piraputanga, a sub-bacia do córrego Santo Antônio apresenta maior percentual de área afetada, indicando alta probabilidade relativa de sofrer alterações nos padrões hidrossedimentológicos naturais.

Em síntese, os dados (Tabela 02) nos permitem avaliar os prováveis impactos das voçorocas na dinâmica hídrica, morfológica e hidrossedimentológica das sub-bacias.

Tabela 2 - Parâmetros hidrossedimentológicos das sub-bacias

Sub-bacias/Seção	Período	Largu. (m)	Prof. (m)	Veloc. (m/s)	Área (m ²)	Vazão (m ³ .s ⁻¹)	Cssi (mg/l ¹)	QSS (T/dia)
Serenó	Estiagem	2.63	0.069	0.125	0.180	0.023	58.93	0.11
	Chuvoso	4.70	0.205	0.289	0.300	0.289	160.00	4.00
Sete de Setembro	Estiagem	12.50	0.070	0.300	0.875	0.263	96.13	2.18
	Chuvoso	10.97	0.060	0.400	0.658	0.263	160.00	3.64
Córrego do Meio	Estiagem	2.24	0.041	0.125	0.092	0.012	79.53	0.08
	Chuvoso	5.20	0.069	0.280	0.358	0.100	173.33	1.50
Dracena	Estiagem	7.68	0.154	0.440	1.182	0.520	50.33	2.26
	Chuvoso	8.80	0.186	0.640	1.638	1.048	340.00	30.80
Piraputanga	Estiagem	4.73	0.293	0.340	1.387	0.472	31.40	1.28
	Chuvoso	6.80	0.245	0.720	1.666	1.200	96.67	10.02
Guanabara	Estiagem	4.72	0.182	0.340	0.858	0.292	64.47	1.63
	Chuvoso	5.20	0.235	0.380	1.222	0.464	120.00	4.81
Sem Nome	Estiagem	3.10	0.137	0.140	0.426	0.060	31.93	0.16
	Chuvoso	3.90	0.168	0.100	0.655	0.066	100.00	0.57
Santo Antônio	Estiagem	2.12	0.055	0.300	0.117	0.035	408.07	1.23
	Chuvoso	2.44	0.090	0.433	0.220	0.095	240.00	1.97

Com base nos dados de largura e profundidade, é possível afirmar que a maioria das sub-bacias analisadas se encontra em avançado estado de assoreamento, com destaque para a sub-bacia do córrego Sete de Setembro. Com uma relação largura (11,73 m) x profundidade (0,065 m) elevada entre os períodos, a sub-bacia praticamente não apresentou elevação de vazão. Pode, portanto, ser caracterizada como uma sub-bacia de canal principal excessivamente dilatado e raso, contrariando a dinâmica natural de canais de sub-bacias de cabeceira, que são naturalmente mais estreitos e profundos em virtude do gradiente topográfico mais elevado (mais

erosão do que deposição). Observando o mesmo comportamento, exceto para a vazão, as sub-bacias dos córregos Dracena, Piraputanga e Santo Antônio também evidenciam elevado grau de assoreamento, sendo estas as sub-bacias com maior percentual de área de drenagem comprometida com voçorocas (Tabela 01). Comparativamente, sub-bacias que não apresentam erosão por voçorocas (Serenio e Sem Nome) apresentaram uma relação largura x profundidade mais estável.

Os dados de variação percentual (Tabela 03) buscam ampliar a compreensão dos impactos da presença de voçorocas na dinâmica hidrossedimentológica sazonal das sub-bacias. Assim, os resultados evidenciam que os processos relacionados à dinâmica hidrossedimentar das sub-bacias são complexos, sendo necessário considerar todos os fatores ambientais para uma análise mais realista.

Tabela 3 - Área de voçoroca e variação percentual de vazão, Cssi e Qss por sub-bacias

Sub-bacias		Vazão (m ³ .s ⁻¹)			Cssi (mg/L ¹)			QSS (T/Dia)		
Córregos	ha	Esti.	Chuv.	Vp %	Esti.	Chuv.	Vp %	Esti.	Chuv.	Vp %
Serenio	0.00	0.02	0.29	1183.6	58.93	160.00	171.49	0.11	4.00	3.384.78
Sete de Setembro	12.76	0.26	0.26	0.3	96.13	160.00	66.44	2.18	3.64	66.93
Do Meio	1.76	0.01	0.10	766.7	79.53	173.33	117.94	0.08	1.50	1.788.80
Dracena	60.30	0.52	1.05	101.7	50.33	340.00	575.50	2.26	30.80	1.262.25
Piraputanga	45.14	0.47	1.20	154.3	31.40	96.67	207.86	1.28	10.02	682.80
Guanabara	16.36	0.29	0.46	59.1	64.47	120.00	86.14	1.63	4.81	196.24
Sem nome	0.00	0.06	0.07	10.0	31.93	100.00	213.15	0.16	0.57	244.39
Santo Antônio	10.73	0.03	0.10	172.0	408.7	240.00	-41.19	1.23	1.97	60.00

Conforme os dados, a sub-bacia do córrego Serenio apresentou o maior aumento percentual de vazão (1.183,6%) e QSS (3.384,78%), sendo uma das duas sub-bacias que não possuem voçorocas mapeadas em sua área. Com aproximadamente 0,4% de sua área comprometida por voçorocas, a sub-bacia do córrego do Meio apresentou o segundo maior aumento percentual de vazão (766,7%) e QSS em toneladas por dia (1.788,80%).

Por sua vez, os menores percentuais de aumento na vazão foram registrados nas sub-bacias dos córregos Sete de Setembro (0,3%), Sem Nome (10%) e Guanabara (59%). Com pouco mais de meio por cento de sua área (0,736%) degradada por voçorocas, o córrego Sete de Setembro apresentou um acréscimo de vazão inferior a 1%, mantendo praticamente os níveis de vazão do período de estiagem. Sem registro de voçorocas, o córrego Sem Nome apresentou o segundo menor percentual de elevação de vazão, enquanto o córrego Guanabara apresentou um crescimento de vazão de 59,1%, bem abaixo da média (305,9%) de elevação de vazão das oito sub-bacias.

Considerando a concentração de sedimento em suspensão ($C_{ssi}/mg/L^1$), a sub-bacia do córrego Dracena, que possui 60,30 hectares de voçorocas, apresentou um aumento percentual de 575,50%. Por sua vez, o segundo maior percentual de elevação (213,15%) foi observado na sub-bacia do córrego Sem Nome, que não possui registro de voçorocas em seus domínios, seguido pela sub-bacia do córrego Piraputanga, a terceira mais degradada por voçorocas, com aumento percentual de C_{ssi} de 207,86%.

Neste ponto, cabe destacar as particularidades dos dados da sub-bacia do córrego Santo Antônio. Em termos proporcionais, é a sub-bacia mais comprometida por voçorocas e, no período de estiagem, registrou a maior concentração de sedimento em suspensão dentre todas as sub-bacias (408,7 mg/L). No período chuvoso, mesmo representando a segunda maior concentração (240 mg/L) dentre as sub-bacias, apresentou uma variação percentual negativa de 41,9%, contrariando a tendência observada nas outras sub-bacias. O que explica essa condição? Excluindo possíveis erros de coleta e processamento dos dados, que foram verificados, a explicação provável pode ser observada na área da seção, composição da água e dinâmica do fluxo. Com profundidade média de apenas 0,055 m, água com elevada concentração de óxido de ferro (coloração avermelhada) e fluxo turbulento, a mobilização de partículas maiores e de maior peso é inevitável, o que resulta na sua coleta nas amostras de água. No período chuvoso, a área da seção molhada quase dobra, permitindo maior dissolução dos óxidos e decantação das partículas de maior tamanho e peso.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise combinada dos dados revela que as variáveis relacionadas à morfologia do canal (largura x profundidade) apresentam maior correspondência com a quantidade de processos erosivos identificados nas sub-bacias. As demais variáveis, como vazão (m^3/s), concentração de sedimentos em suspensão ($C_{ssi} mg/L^1$) e descarga sólida em suspensão (QSS T/dia), também permitem identificar alterações decorrentes de voçorocas, como observado na sub-bacia do córrego Santo Antônio. Contudo, essas variáveis apresentam variações semelhantes em sub-bacias sem a presença de voçorocas. Dessa forma, para fins comparativos do estado ambiental entre sub-bacias, conclui-se que estas devem ser analisadas em conjunto com dados geomorfológicos, pedológicos e geológicos, a fim de ponderar a influência desses componentes nas variáveis hidrossedimentológicas, permitindo assim delinear com mais precisão o impacto dos processos erosivos em diferentes sub-bacias.

Diante dos dados, podemos concluir que a análise combinada entre dados de áreas comprometidas por voçorocas e dados hidrossedimentológicos por sub-bacias constitui um importante procedimento de diagnóstico das condições hídricas e geomorfológicas de sistemas de cabeceira. Isso permite estabelecer indicadores e parâmetros de referência voltados à avaliação de medidas de contenção de processos erosivos, auxiliando na gestão integrada de bacias hidrográficas.

Palavras-chave: Hidrossedimentologia, Erosão, Sub-Bacias, Sistemas de Cabeceira, Indicadores Ambientais.

AGRADECIMENTOS: Ao Concelho Municipal de Meio Ambiente do Município de Reserva do Cabaçal-MT pelo Suporte e financiamento, LAPEGEOF e FAPEMAT pela parceria na execução do projeto de diagnóstico hidrossedimentológico do município.

REFERÊNCIAS

- CARVALHO, J. R. M. DE et al. Proposta e validação de indicadores hidroambientais para bacias hidrográficas: estudo de caso na sub-bacia do alto curso do Rio Paraíba, PB. **Sociedade & Natureza**, v. 23, p. 295–310, ago. 2011.
- CUNHA, S. B. Geomorfologia Fluvial. In: CUNHA, S. B.; GUERRA, J. T. Geomorfologia: **Exercícios, técnicas e aplicações**. 3ª. ed. Rio de Janeiro: Bertrand do Brasil, 2009.
- DOWNING, J. A. et al. Global abundance and size distribution of streams and rivers. **Inland Waters**, v. 2, n. 4, p. 229–236, 1 jan. 2012.
- GOMI, T.; SIDLE, R. C.; RICHARDSON, J. S. Understanding Processes and Downstream Linkages of Headwater Systems: Headwaters differ from downstream reaches by their close coupling to hillslope processes, more temporal and spatial variation, and their need for different means of protection from land use. **BioScience**, v. 52, n. 10, p. 905–916, 1 out. 2002.
- HACK, J. T.; GOODLETT, OHN C. Geomorphology and forest ecology of a mountain region in the central Appalachians. **Geological survey Professional Paper**, 347. p. 1–66, 1 jan. 1960.
- LELI, I. T.; STEVAUX, J. C.; NÓBREGA, M. T. Produção e transporte da carga suspensa fluvial: teoria e método para rios de médio porte. **Boletim de Geografia**. v. 28, n. 1, p. 43- 58, 2010
- LANGUAGES, O. **Oxford Essential Portuguese Dictionary**. 2nd UK ed. edição ed. Oxford New York: Oxford University Press, USA, 2013.
- MEZZOMO, V.; PELEGRINI, J.; MICHEL, G. P. Importância do monitoramento contínuo em estudos hidrossedimentológicos: estudo de caso da bacia do rio cunha, rio dos Cedros/SC. **ANAIS - XXIII SBRH - Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, p. 1–10, 24 nov. 2019.
- PROJETO MAPBIOMAS. **Mapeamento da superfície de água no Brasil (Coleção 1)**. Disponível em: <<https://plataforma.agua.mapbiomas.org/water>>. Acesso em: 26 jun. 2024.
- ZANCANELA, D. A. I. et al. **Study of Sustainability Indicators for Environmental Management in Hydrographic Basins**. (Y. Iano et al., Eds.) Proceedings of the 7th Brazilian Technology Symposium (BTSym'21). **Anais.Cham**: Springer International Publishing, 2023.