

**Pontifícia Universidade Católica de Goiás**  
**Programa de Mestrado em Engenharia de Produção e Sistemas**

**MODELAGEM DE PROCESSOS HIDROSEDIMENTOLÓGICOS E  
ESTIMATIVA DE VIDA ÚTIL DE RESERVATÓRIOS DE USINAS  
HIDRELÉTRICAS**

**Luciano Ferreira Ribeiro**

**2022**

# **MODELAGEM DE PROCESSOS HIDROSSEDIMENTOLÓGICOS E ESTIMATIVA DE VIDA ÚTIL DE RESERVATÓRIOS DE USINAS HIDRELÉTRICAS**

Luciano Ferreira Ribeiro

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas da Pontifícia Universidade Católica de Goiás, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção e Sistemas.

Orientadora: Marta Pereira da Luz, Dra.

**Goiânia**

**OUTUBRO / 2022**

Catálogo na Fonte - Sistema de Bibliotecas da PUC Goiás  
Márcia Rita Freire - Bibliotecária - CRB1/1551

R484m Ribeiro, Luciano Ferreira  
Modelagem de processos hidrossedimentológicos e estimativa  
de vida útil de reservatórios de usinas hidrelétricas  
/ Luciano Ferreira Ribeiro. -- 2022.  
88 f.: il.

Texto em português, com resumo em inglês.  
Dissertação (mestrado) -- Pontifícia Universidade  
Católica de Goiás, Escola Politécnica, Goiânia, 2022.

Inclui referências: f. 68-74.

1. Reservatórios. 2. Sedimentação e depósitos - Simulação  
por computador. 3. Usinas hidrelétricas. 4. Simulação  
(Computadores digitais). I. Luz, Marta Pereira da. II. Pontifícia  
Universidade Católica de Goiás - Programa de Pós-Graduação  
em Engenharia de Produção e Sistemas - 17/10/2022. III. Título.

CDU: Ed. 2007 -- 004.942(043)

Luciano Ferreira Ribeiro

# MODELAGEM DE PROCESSOS HIDROSSEDIMENTOLÓGICOS E ESTIMATIVA DE VIDA ÚTIL DE RESERVATÓRIOS DE USINAS HIDRELÉTRICAS

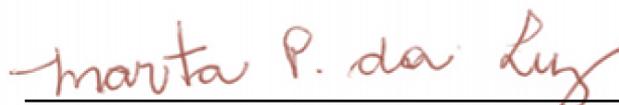
Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas da Pontifícia Universidade Católica de Goiás, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção e Sistemas.



**Prof. Marcos Lajovic Carneiro, Dr.**  
Coord. do Programa de Pós-Graduação em  
Eng. de Produção e Sistemas

## Banca Examinadora:

Data de defesa: 17 de outubro de 2022



**Profa. Marta Pereira da Luz, Dra.**  
Orientadora



**Profa. Maria José Pereira Dantas, Dra.**  
Pontifícia Universidade Católica de Goiás



**Prof. Wellington Nunes de Oliveira, Dr.**  
Universidade Federal de Goiás

**Goiânia 2022**

À Marta Pereira da Luz pelo convite, apoio, paciência e dedicação para que essa pesquisa pudesse acontecer.

*“Toda a nossa ciência, comparada com a realidade, é primitiva e infantil - e, no entanto,  
é a coisa mais preciosa que temos”.*

*Albert Einstein*

## RESUMO

RIBEIRO, L. **Modelagem de processos hidrossedimentológicos e estimativa de vida útil de reservatórios de usinas hidrelétricas.** 2022. 88p. Dissertação Mestrado - MEPROS, Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Goiânia, 2022.

O homem, por questão de sobrevivência, sempre precisou explorar os recursos hídricos disponíveis na natureza. Em países com uma matriz energética predominantemente hidrelétrica como o Brasil, a exploração de reservatórios é essencial, porém esta prática só é sustentável se o manejo correto do recurso for planejado. Infelizmente, a maioria dos reservatórios ainda não apresenta estudos hidrossedimentológicos consistentes para se realizar esse planejamento. Neste cenário, esta dissertação traz uma abordagem do transporte e deposição de sedimentos em reservatórios e apresenta o desenvolvimento de uma ferramenta computacional para auxiliar no monitoramento e análise de vários parâmetros hidrossedimentológicos, em especial, a descarga sólida total, o volume assoreado e o tempo de vida útil de reservatórios, utilizando dados de amostras coletadas e ensaiadas de acordo com métodos indiretos de monitoramento de sedimentos. Como estudo de caso, foram realizadas simulações na ferramenta computacional para o reservatório da Usina Hidrelétrica de Itumbiara (GO) e foi possível contrapor os resultados obtidos com referências de outras modalidades de monitoramento de processos hidrossedimentológicos: topobatimetria e modelagem computacional. Notou-se que os resultados do levantamento topobatimétrico estavam condizentes com os resultados alcançados pela ferramenta computacional desenvolvida. Resultados, inclusive, que foram utilizados, com sucesso, para a calibração do modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT).

**Palavras-chave:** Sedimentos; Reservatório; Modelagem Computacional; Hidrossedimentologia; Assoreamento; Recursos hidroenergéticos.

## ABSTRACT

RIBEIRO, L. **Modeling of hydrosedimentological processes and estimating the useful life of reservoirs of hydroelectric plants..** 2022. 88p. Dissertação Mestrado - MEPROS, Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Goiânia, 2022.

Humanity, as a matter of survival, have always needed to explore the water resources available in nature. In countries with a predominantly hydroelectric energy matrix like Brazil, the exploration of reservoirs is essential, but this practice is only sustainable if the correct management of the resource is planned. Unfortunately, most reservoirs does not yet present consistent hydrosedimentological studies to perform this planning. In this scenario, this dissertation brings an approach to transport and sediment deposition in reservoirs and presents the development of a computational tool to monitore and analyze several hydrosedimentological parameters, in particular, the total solid discharge, the volume silted up and the lifetime of reservoirs, using data from samples collected and tested according to indirect methods of sediment monitoring. As a case study, simulations were performed in the computational tool for the reservoir of the Itumbiara Hydroelectric Power Plant (GO) and it was possible to compare the results obtained with references from other modalities of monitoring hydrosedimentological processes: topobathymetry and computational modeling. It was noted that the results of the topobathymetric survey were consistent with the results achieved by the developed computational tool. Results were even successfully used to calibrate the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model.

**Keywords:** Sediments; Reservoir; Computational Modeling; Hydrosedimentology; Silting; Hydroenergetic Resources.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Energia Hidrelétrica no Brasil - Capacidade Instalada . . . . .	23
Figura 2 – Consumo de Energia do Brasil nos Setores Produtivos entre 2013 e 2019	23
Figura 3 – EAR - Série Histórica por Subsistema . . . . .	27
Figura 4 – EAR x Capacidade Instalada de Geração (GW) - Série Histórica Compilada	28
Figura 5 – Amostrador USD-49 . . . . .	29
Figura 6 – Amostrador USDH-59 . . . . .	29
Figura 7 – Implantação da Rede de Vértices Geodésicos (RVG) . . . . .	32
Figura 8 – Modelo Digital de Terreno (MDT) . . . . .	32
Figura 9 – Processos Hidrossedimentométricos - Modelos Computacionais . . . . .	33
Figura 10 – Modelo SWAT - Soil and Water Assessment Tool . . . . .	34
Figura 11 – Modelo Digital de Elevação (MDE) . . . . .	35
Figura 12 – Uso e Cobertura do Solo (UCS) . . . . .	35
Figura 13 – UHE Furnas - Foto Institucional . . . . .	37
Figura 14 – UHE Itumbiara - Foto Institucional . . . . .	39
Figura 15 – UHE Itumbiara - Mapa de Localização das Estações Hidrossedimento- lógicas . . . . .	40
Figura 16 – UHE Itaipu . . . . .	41
Figura 17 – UHE LCB Carvalho . . . . .	41
Figura 18 – Ferramenta Computacional - Softwares Livres . . . . .	43
Figura 19 – Hidrossedimentologia Furnas - Processo Original . . . . .	44
Figura 20 – Cálculos Hidrossedimentológicos - Ábacos . . . . .	49
Figura 21 – Ferramenta Computacional SISED - Logomarca . . . . .	53
Figura 22 – Ferramenta Computacional SISED - Diagrama Entidade Relacionamento	54
Figura 23 – Hidrossedimentologia Furnas - Processo Modificado pelo SISED . . . . .	55
Figura 24 – Ferramenta Computacional SISED - Simulador de Dados Sedimentomé- tricos . . . . .	56
Figura 25 – UHE Itumbiara - Curva-chave Sedimentos - Estações Sedimentométricas	58
Figura 26 – Cálculos para Geração da Equação da Curva-chave . . . . .	58
Figura 27 – Modelo SWAT calibrado com dados SISED . . . . .	63
Figura 28 – (Ábaco 1) Obtenção de $q'_{nm}$ . . . . .	86
Figura 29 – (Ábaco 2) Obtenção da Concentração Relativa ( $C_r$ ) . . . . .	87
Figura 30 – (Ábaco 3) Obtenção do Fator de Correção . . . . .	88

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 – Matriz de Energia Elétrica no Brasil Capacidade 2022 x Previsão 2026	21
Tabela 2 – Parque Gerador de Furnas . . . . .	38
Tabela 3 – Constantes W e K para Cálculo do Peso Específico Aparente em Função do Tipo de Operação do Reservatório . . . . .	47
Tabela 4 – Simulação SISED para UHE Itumbiara em Comparação a Outros Reservatórios . . . . .	60
Tabela 5 – Simulação SISED para Diferentes Cenários na UHE Itumbiara . . . . .	61
Tabela 6 – UHE Itumbiara - Dados para Curva-Chave de Sedimentos . . . . .	75
Tabela 7 – UHE Itumbiara - Amostras com Respectivas Vazões e Descargas Sólidas	78
Tabela 8 – Ferramenta Computacional SISED - Dicionário de Dados . . . . .	80
Tabela 9 – Valores Estimados de A e B para o Cálculo de Concentração Relativa em Função da Profundidade . . . . .	85

**LISTA DE QUADROS**

Quadro 1 – Breve Resumo de Eventos de Energia Elétrica no Brasil desde 1900 . .	22
Quadro 2 – Reservatórios no Brasil com Problemas de Assoreamento . . . . .	26
Quadro 3 – Estações Hidrossedimentológicas de Interesse . . . . .	39

**LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

a.C.	antes de Cristo
ABRACE	Associação dos Grandes Consumidores Industriais de Energia e de Consumidores Livres
ADCP	Acoustic Doppler Current Profiler
AID	Área de Influência Direta
ANA	Agência Nacional de Águas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ASF	Apache Software Foundation
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico
CAV	Curva Área x Volume
CBA	Companhia Brasileira de Alumínio
CEEE	Companhia Estadual de Geração e Transmissão de Energia Elétrica
CELESC	Centrais Elétricas de Santa Catarina
CEMIG	Centrais Elétricas de Minas Gerais
CEPEL	Centro de Pesquisa de Energia Elétrica
CESP	Companhia Energética de São Paulo
CHESF	Companhia Hidrelétrica do São Francisco
COE	Coefficiente de Nash-Sutcliffe
COPAM	Comissão Permanente de Análise e Acompanhamento do Mercado de Energia Elétrica
CPFL	Companhia Paulista de Força e Luz
CSN	Companhia Siderúrgica Nacional
CSS	Concentração de Sedimentos Suspensos
CTG	China Three Gorges

CVRD	Companhia Vale do Rio Doce
DER	Diagrama Entidade Relacionamento
DMAA	Departamento de Meio Ambiente Aquático de Itaipu Binacional departamento de meio ambiente aquático ()
EAR	Energia Armazenada
Eletrobras	Centrais Elétricas Brasileiras
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
GEA	Geologia e Engenharia Ambiental LTDA
GNL	Gás Natural Liquefeito
HRU	Unidades de Resposta Hidrológicas
HTML	HyperText Markup Language
IBOVESPA	Índice da Bolsa de Valores de São Paulo
IDE	Integrated Development Environment
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INPI	Instituto Nacional da Propriedade Industrial
LCB Carvalho	Luiz Carlos Barreto de Carvalho
LTD	Private Limited Company
MDE	Modelo Digital de Elevação
MDT	Modelo Digital do Terreno
MEPROS	Mestrado em Engenharia de Produção e Sistemas
MME	Ministério de Minas e Energia
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PHP	Hypertext Preprocessor
PMO	Programa Mensal de Operação Energética
PUC	Pontifícia Universidade Católica
P&D+I	Projeto de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação

RVG	Rede de Vértices Geodésicos
S.A.	Sociedade Anônima
SGBD	Sistema Gerenciador de Banco de Dados
SIG	Sistema de Informações Geográficas
SIN	Sistema Interligado Nacional
SNIRH	Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos
SAR	Sistema de Acompanhamento de Reservatórios
SPE	Sociedade de Propósito Específico
SQL	Structure Query Language
SWAT	Soil and Water Assessment Tool
UCS	Uso e Cobertura do Solo
UFG	Universidade Federal de Goiás
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UHE	Usina Hidrelétrica
UnB	Universidade de Brasília
USDA-ARS	United States Department of Agriculture - Agricultural Research Service
USLE	Universal Soil Loss Equation

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\%$	Porcentagem;
$\gamma_{ap}$	Peso específico aparente médio dos depósitos, em t/dia - Equações 4.11, 4.4;
$A$ e $B$	Valores em função da profundidade definidos conforme Tabela 9 do Anexo A - Equação 4.9;
$C$	Capacidade do reservatório, em $m^3$ - Equações 4.1, 4.2 e 4.3;
$C_r$	Concentração relativa, em ppm = $mg L^{-1}$ - Equação 4.9;
$C'_s$	Concentração, em ppm = $mg L^{-1}$ - Equação 4.6;
$D_{st}$	Deflúvio sólido total médio anual afluyente ao reservatório, em t/ano - Equação 4.11;
$E_r$	Eficiência de retenção do sedimento afluyente ao reservatório, adimensional - Equações 4.11, 4.1, 4.2 e 4.3;
$GW$	Gigawatt - unidade de potência equivalente a $10^9$ w;
$GWh$	Gigawatt hora - unidade de energia elétrica que indica a taxa de potência consumida durante o tempo;
$h$	Hora - unidade de tempo;
$ha$	Hectare - unidade de área equivalente a $10^4$ metros quadrados;
$hm$	Hectômetro - unidade de comprimento equivalente a $10^2$ metros;
$hm^3$	Hectômetro cúbico - unidade de volume equivalente a $10^6$ metros cúbicos;
$I$	Volume médio anual afluyente em $m^3$ - Equações 4.1, 4.2 e 4.3;
$k$	Fator de correção, adimensional - Equações 4.7, 4.10;
$km$	Quilômetro - unidade de comprimento equivalente a 1.000 metros;
$km^2$	Quilômetro quadrado - unidade de área equivalente a $10^6$ metros quadrados;
$kW$	Quilowatt - unidade de potência equivalente a $10^3$ w;
$L$	Largura do rio, em m - Equação 4.7;

$l$	Litro - unidade de volume equivalente a $10^{-4} m^3$ ;
$m$	Metro - unidade de comprimento;
$m^2$	Metro quadrado - unidade de área;
$m^3$	Metro cúbico - unidade de volume;
$ml$	Miligrama - unidade de massa equivalente a $10^{-6} g$ ;
$MW$	Megawatt - unidade de potência equivalente a $10^6 w$ ;
$p_c, p_m, p_s$	Frações de quantidades de argila, silte e areia contidas no sedimento afluente, em % - Equação 4.4;
$q'_{nm}$	Descarga sólida não-medida aproximada por metro de largura, em $t d^{-1} m^{-1}$ - Equações 4.7, 4.8;
$Q$	vazão, em $m^3 s^{-1}$ - Equação 4.6;
$Q_{nm}$	Descarga sólida não medida, em $t d^{-1}$ - Equações 4.5, 4.7;
$Q_{sm}$	Descarga sólida medida, em $t d^{-1}$ - Equações 4.5, 4.6;
$Q_{st}$	Descarga sólida total, em $t d^{-1}$ - Equações 4.5, 4.11, 5.1;
$R_e$	Razão da eficiência, adimensional - Equação 4.10;
$s$	Segundo - unidade de tempo;
$S$	Volume de sedimento retido no reservatório, em $m^3/ano$ - Equações 4.11, 4.12;
$t$	Tonelada, unidade de massa equivalente a $10^6 g$ ;
$T$	Tempo de assoreamento de um determinado volume, em anos - Equação 4.12;
$v$	Velocidade média, em $m s^{-1}$ - Equações 4.8, 4.9;
$Vazao$	Vazão, em $m^3 s^{-1}$ - Equação 5.1;
$V_{res}$	Volume do reservatório, total, volume morto ou outro, em $m^3$ - Equação 4.12;
$W$	Watt - unidade de potência;
$W_c, W_m, W_s$	Coefficientes de compactação, ou seja, pesos específicos iniciais de argila, silte e areia, em $t d^{-1}$ - Equação 4.4;

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>17</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b>	<b>19</b>
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>21</b>
<b>3.1</b>	<b>Panorama de Geração de Energia no Brasil - A Importância das Usinas Hidrelétricas</b>	<b>21</b>
<b>3.2</b>	<b>Processos Erosivos e Aporte de Sedimentos em Reservatórios</b>	<b>24</b>
<b>3.3</b>	<b>Monitoramento de Processos Hidrossedimentológicos</b>	<b>28</b>
3.3.1	Medição Indireta	29
3.3.2	Medição Direta	30
3.3.3	Modelagem Computacional	32
3.3.3.1	Modelo <i>Soil and Water Assessment Tool</i> - SWAT	33
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>37</b>
<b>4.1</b>	<b>Eletrobras Furnas</b>	<b>37</b>
4.1.1	UHE Itumbiara	39
4.1.2	Outros Empreendimentos	40
4.1.3	Simulação em Diferentes Cenários	41
<b>4.2</b>	<b>Ferramenta Computacional para Cálculos Hidrossedimentológicos</b>	<b>42</b>
4.2.1	Softwares de Apoio	43
4.2.2	Processo de Hidrossedimentologia Original	44
4.2.3	Variáveis Hidrossedimentométricas	45
4.2.4	Cálculo da Descarga Sólida Total	47
4.2.5	Simulador de Dados Sedimentométricos	50
<b>4.3</b>	<b>Calibração do SWAT</b>	<b>51</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>53</b>
<b>5.1</b>	<b>SISED - Ferramenta Computacional para Cálculos Hidrossedimentológicos</b>	<b>53</b>
5.1.1	Identidade Visual	54
5.1.2	Banco de Dados	54
5.1.3	Processo de Hidrossedimentologia Novo	54
5.1.4	Simulador da Ferramenta Computacional	56
<b>5.2</b>	<b>SISED - Resultados da UHE Itumbiara Comparados com Outros Reservatórios</b>	<b>60</b>

5.3	SISED - Resultados da UHE Itumbiara Simulados em Diferentes Cenários . . . . .	61
5.4	SISED - Resultados da UHE Itumbiara para Calibrar o SWAT . . . . .	62
6	CONCLUSÃO . . . . .	64
	REFERÊNCIAS . . . . .	67
	APÊNDICES . . . . .	74
	APÊNDICE A – DADOS PARA CURVA-CHAVE DE SEDIMENTOS DA UHE ITUMBIARA . . . . .	75
	APÊNDICE B – VAZÃO E DESCARGA SÓLIDA TOTAL - UHE ITUMBIARA . . . . .	78
	APÊNDICE C – DICIONÁRIO DE DADOS . . . . .	80
	ANEXOS . . . . .	84
	ANEXO A – TABELA AUXILIAR PARA CÁLCULO DE CONCENTRAÇÃO RELATIVA . . . . .	85
	ANEXO B – (ÁBACO 1) DESCARGA SÓLIDA NÃO-MEDIDA ( $q'_{nm}$ ) A PARTIR DA VELOCIDADE MÉDIA . . . . .	86
	ANEXO C – (ÁBACO 2) CONCENTRAÇÃO RELATIVA ( $C_r$ ), A PARTIR DA VELOCIDADE MÉDIA . . . . .	87
	ANEXO D – (ÁBACO 3) FATOR DE CORREÇÃO, A PARTIR DA RAZÃO DE EFICIÊNCIA . . . . .	88

## 1 INTRODUÇÃO

O Brasil, devido às suas características naturais de relevo e hidrografia, se encontra em posição de destaque no planeta, com um expressivo potencial hidroenergético (ONS, 2022a). De acordo com o Atlas do Espaço Rural Brasileiro (IBGE, 2020), 12% da produção de água doce mundial está em território nacional, enquanto que para a América do Sul este número está em torno de 53%. Em contrapartida, 80% desses recursos hídricos disponíveis no país estão localizados em regiões de baixa densidade demográfica.

Contar com estes recursos ao longo de todo o ano é de suma importância para o desenvolvimento do país. Tal possibilidade é viabilizada com a implantação estratégica de reservatórios que ajudam a manter, entre outros usos, o abastecimento, a irrigação e a produção de energia elétrica.

Neste contexto, é esperado que se empreenda esforços para a continuidade da exploração sustentável dos recursos hídricos do país, o que se justifica pela sua característica de ser essencial à sociedade (JUNCOSA; CEREIJO; VAZQUEZ, 2022). Em uma dessas frentes, é prudente realizar o monitoramento sedimentométrico sistemático em aproveitamentos com formação de reservatório, buscando o conhecimento da dinâmica de cada bacia hidrográfica para que, individualmente, se planeje corretamente o seu manejo (BISPO *et al.*, 2020).

Em 2010, a própria Agência Nacional de Águas (ANA) e a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) publicaram a resolução conjunta 003/2010 (ANA/ANEEL, 2010) com parâmetros metodológicos para operação e manutenção de estações hidrométricas para controles diversos, dentre eles o sedimentométrico, em empreendimentos hidrelétricos com potência instalada superior a 1.000kW<sup>1</sup>. Essa resolução tem a função de orientar os agentes do setor elétrico sobre os procedimentos de coleta, tratamento e armazenamento de dados hidrométricos, bem como o envio das informações, em formato compatível, para o Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH), de onde são disponibilizadas para consulta pública.

Para levantamento dessas informações, através de métodos indiretos, são necessários equipamentos e equipes que precisam estar em constantes campanhas sazonais para a coleta de amostras em campo. Essas amostras precisam ainda ser transportadas para análise em laboratórios e os resultados utilizados, com ajuda de complexos cálculos de concentração de sedimentos, para gestão e estimativa de tempo de vida útil dos reservatórios, por exemplo (CARVALHO, 2008).

---

<sup>1</sup> A resolução conjunta ANA/ANEEL 003/2010 foi recentemente revisada e está prevista a entrada em vigor de uma nova norma em 01/01/2023 (GOV.BR, 2022a)

Diante desses desafios, alguns métodos diretos, também, acabam sendo experimentados para se tentar determinar dados de descarga sólida de uma forma mais simplificada. Neste cenário, sondas e turbidímetros e até mesmo satélites, são utilizados para medir imediatamente o aporte de sedimentos. Porém, essas metodologias ainda primam por maior confiabilidade, sendo recomendado um processo de calibração dos equipamentos, correlacionando seus resultados com os obtidos pelos métodos tradicionais (POMÁZI; BARANYA, 2020).

Independente de como é realizado o estudo sedimentológico de uma bacia, o apoio computacional é essencial em todo o processo, desde a organização dos dados de campo e laboratoriais, até as validações estatísticas e realização dos cálculos matemáticos. Esses processamentos, com frequência, envolvem um volume grande de dados oriundos de tabelas meteorológicas de séries históricas, normalmente disponíveis para grandes reservatórios (IJAZ *et al.*, 2022). Não obstante, é fato que as ferramentas computacionais ajudam a reduzir erros comuns em cálculos de descarga sólida total.

Diante da importância do tema e da carência de ferramentas computacionais apropriadas à realidade brasileira, destaca-se a relevância de pesquisas que permitam contribuir com este escopo que impacta sobre empreendimentos fundamentais para a manutenção e melhoria da qualidade de vida e desenvolvimento econômico: os reservatórios.

O presente trabalho é parte do Projeto de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (P&D+I) da ANEEL, desenvolvido em parceria com a Pontifícia Universidade Católica (PUC) Goiás, Universidade de Brasília (UnB), Universidade Federal de Goiás (UFG) e a Eletrobras Furnas, intitulado: “Modelagem em Diversas Escalas da Geração de Sedimentos em Erosões e o Aporte em Reservatórios de UHEs” - PD.0394-1705/2017.

## 2 OBJETIVOS

O principal objetivo deste estudo foi o desenvolvimento de uma ferramenta computacional capaz de oferecer recursos para suporte organizacional de dados hidrossedimentológicos, cálculos de estimativas de descargas sólidas e vida útil de reservatórios, além de auxiliar na compreensão do comportamento do aporte de sedimentos, assumindo um papel de referência no apoio a tomada de decisões para a gestão eficiente de reservatórios.

É importante que a ferramenta computacional contemple:

- Estruturar registros hidrossedimentológicos em um banco de dados único e seguro;
- Revisar e implementar funções de cálculos de descarga total de sedimentos utilizando o método simplificado de Colby (1957);
- Realizar cálculos hidrossedimentológicos para múltiplos reservatórios;
- Adotar UHE Itumbiara como estudo de caso e realizar uma análise crítica dos dados das suas amostras, coletadas e ensaiadas por Furnas de 2012 a 2022;
- Gerar Curva Chave de Sedimentos para cálculos diários de descargas sólidas, a partir de dados diários de vazão;

Outros objetivos específicos:

- Comparar metodologias diferentes de monitoramento de processos hidrossedimentológicos para UHE Itumbiara;
- Simular diferentes cenários para UHE Itumbiara para analisar o comportamento do aporte de sedimentos em condições mais secas e mais úmidas;
- Utilizar os resultados da ferramenta computacional para UHE Itumbiara para calibração do *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT);
- Criação de uma identidade visual para a ferramenta computacional;
- Revisitar trabalhos e projetos anteriores para aproveitamento de dados sobre a UHE Itumbiara, em especial o P&D ANEEL, intitulado “Monitoramento e Estudo de Técnicas Alternativas na Estabilização de Processos Erosivos em Reservatórios de UHEs” - PD-0394-1014/2010.

Este trabalho está organizado em quatro partes, mais um conjunto de apêndices e anexos:

- Capítulo 3 - Revisão Bibliográfica, onde é apresentada a fundamentação teórica para o desenvolvimento dessa pesquisa. A princípio, é trazido ao leitor um panorama da geração de energia no Brasil. Em seguida, um contexto sobre processos erosivos e aporte de sedimentos em reservatórios. Por fim, detalhes de como são realizados os diversos tipos de monitoramentos de processos hidrossedimentológicos;
- Capítulo 4 - Materiais e Métodos, onde é apresentada a empresa Eletrobras Furnas e a UHE Itumbiara que foi utilizada como estudo de caso para o projeto. O capítulo explica como foi o desenvolvimento da ferramenta computacional para cálculos hidrossedimentológicos, suas formulações e softwares de apoio aplicados para UHE Itumbiara. Ainda sobre esta usina, o capítulo também traz referências de outros estudos sobre a atualização das curva Cota x Área x Volume e modelagem computacional do mesmo reservatório.
- Capítulo 5 - Resultados, onde são apresentados os principais produtos obtidos com a pesquisa;
- Capítulo 6 - Conclusão, onde são discutidos os resultados do capítulo anterior e os avanços conquistados com o projeto;
- Apêndices e anexos, onde estão reunidos tabelas e gráficos secundários que foram utilizados para desenvolvimento da ferramenta computacional.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Panorama de Geração de Energia no Brasil - A Importância das Usinas Hidrelétricas

O ser humano constrói barragens há mais de 4.000 anos. Inclusive, grandes civilizações tiveram ascensão e declínio em eventos relacionados à barragens e irrigação. Isso pode ser observado em ruínas de obras do Império Romano, China, Índia, Sri Lanka e dos povos pré-colombianos. A princípio, as barragens eram obras simples onde os métodos construtivos envolviam barreiras de terras nos rios, já com a formação de reservatórios, porém era comum que as obras ruíssem, pois não havia o domínio da mecânica dos materiais e dos escoamentos das cheias (SANDRONI; GUIDICINI, 2022).

As primeiras barragens normalmente tinham como finalidades principais: o consumo, o lazer ou até o controle de vazões durante as cheias dos rios. Com o tempo, descobriu-se novas potencialidades para as barragens. Os romanos, por exemplo, no século I a.C, já sabiam que a força da água sobre uma roda d'água gerava energia mecânica, mas foi somente, durante os séculos XVIII e XIX, com o surgimento de novas tecnologias, que foi possível a conversão dessa energia mecânica em energia elétrica. Assim, surgiram as primeiras usinas hidrelétricas (UHEs) no mundo que permitiram que, por exemplo, indústrias pudessem expandir suas produções, além de ajudarem a alavancar a sociedade ao seu atual estágio evolutivo (SALES *et al.*, 2017).

O Brasil, neste contexto, ainda possui uma história recente e, como pode ser observado na Tabela 1, uma matriz energética diversificada. Mesmo assim, o país tem papel de destaque na construção de barragens para geração de energia elétrica, já que possui o terceiro maior potencial hidrelétrico do mundo (ANEEL, 2022).

Tabela 1 – Matriz de Energia Elétrica no Brasil Capacidade 2022 x Previsão 2026

Fonte	2022 Instalado [MW]	2022 Instalado [%]	2026 Previsto [MW]	2026 Previsto [%]
Hidrelétrica	108.940	60,6	109,599	57,3
Eólica	22.074	12,3	26.535	13,9
Térmica Gás + GNL	16.448	9,1	19.861	10,4
Biomassa	14.885	8,3	15.587	8,2
Térmica Óleo + Diesel	4.346	2,4	4.634	2,4
Solar	7.556	4,2	9.298	4,9
Térmica Carvão	3.017	1,7	3.017	1,6
Nuclear	1.990	1,1	1.990	1,0
Outras	645	0,4	695	0,4

Fonte: Adaptado de Programa Mensal de Operação Energética (PMO) / ONS (2022a)

Um dos primeiros registros de obras para geração de energia elétrica no país foi em 1883, no ribeirão do Inferno, afluente do rio Jequitinhonha, na cidade de Diamantina - MG (PEREIRA, 2015). Como sua capacidade de geração era ínfima, assim como as barragens subsequentes, pode-se considerar que, efetivamente, as usinas hidrelétricas no Brasil começaram a ser construídas somente no início do século XX.

No século XX, no Brasil, houve períodos de investimentos estruturais intensos e períodos de calmarias, de acordo com o momento econômico e as estratégias governamentais de cada época (CRUZ; MATERÓN; FREITAS, 2014). Neste intervalo, grandes obras foram construídas e muitos acontecimentos no setor elétrico foram importantes para a sua atual configuração. O Quadro 1 apresenta um breve resumo dos principais eventos que foram relevantes para a geração de energia elétrica no Brasil, entre 1900 e 2022.

Quadro 1 – Breve Resumo de Eventos de Energia Elétrica no Brasil desde 1900

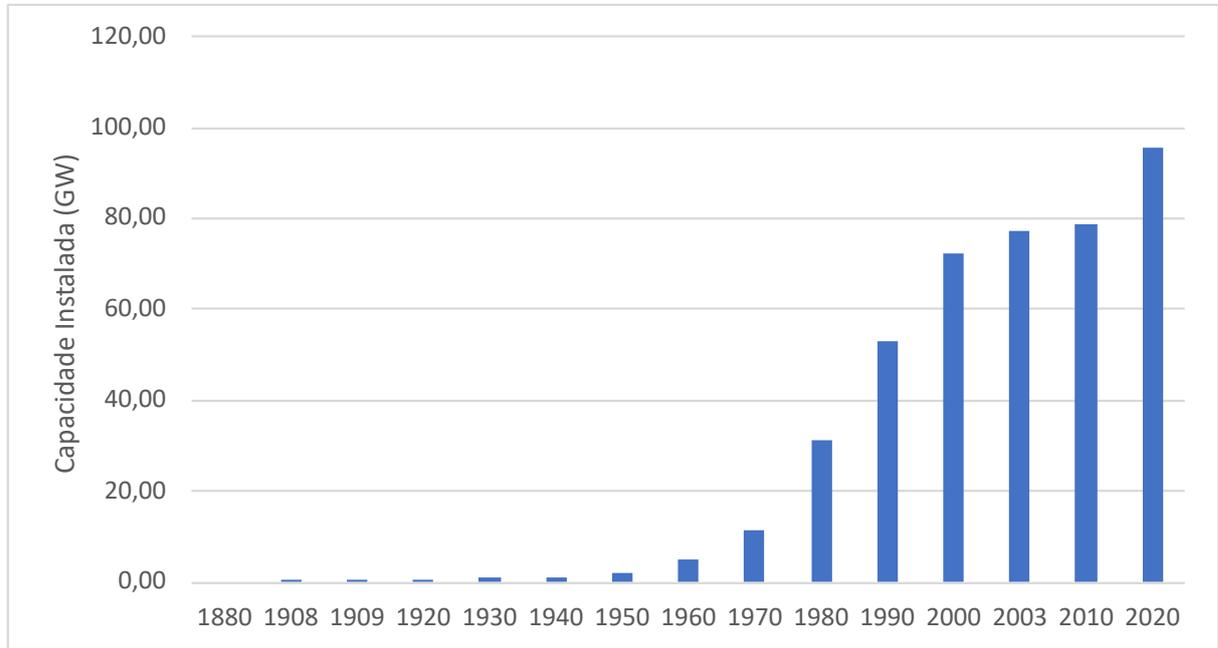
Ano	Eventos
1900-1910	Criação da <i>The Rio de Janeiro Light and Power Company Ltd.</i> / Inauguração da UHE Fontes Velha (RJ), 12MW, a maior da América Latina e segunda no mundo. Em seguida ampliada para 24MW
1910-1920	Companhia Paulista de Força e Luz (CPFL) / UHE Delmiro Correia, primeira hidrelétrica na cachoeira de Paulo Afonso, no Rio São Francisco (BA)
1920-1930	Inauguração da UHE Ilha dos Pombos
1940-1950	Companhia Siderúrgica Nacional (CSN) / Companhia Vale do Rio Doce (CVRD) / Companhia Hidrelétrica do São Francisco
1950-1960	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico (BNDES) / Centrais Elétricas de Minas Gerais (CEMIG) / UHE Paulo Afonso I em operação / Centrais Elétricas de Santa Catarina (CELESC) / Furnas
1960-1970	Centrais Elétricas Brasileiras (Eletrobras) / Companhia Energética de São Paulo (CESP) / Eletrosul
1970-1980	Eletronorte / UHE Sobradinho / Centro de Pesquisa de Energia Elétrica (CEPEL)
1980-1990	UHE Itumbiara / UHE Itaipu / UHE Tucuruí
1990-2000	Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) / Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS)
2000-2010	Crise de Racionamento / Empresa de Pesquisa Energética (EPE-MME)
2010-2021	UHE Santo Antônio / UHE Jirau / UHE Belo Monte / UHE Teles Tires

Fonte: Adaptado de Pereira (2015); Energia (2022c); Energia (2022a); Energia (2022b); Pires (2022)

Destaca-se que a criação da Centrais Elétricas Brasileiras (Eletrobras), proposta em 1954 por Getúlio Vargas e autorizada em 1961 por Jânio Quadros, contribuiu decisivamente para a expansão da oferta de energia e o desenvolvimento do país, sendo um grande diferencial para alavancar as construções de usinas hidrelétricas no Brasil. A Figura 1 demonstra como esse fator foi determinante para alteração do cenário de geração hidrelétrica

a partir da década de 60 e para que, em 2021, já houvessem 219 UHEs em operação no país (ANEEL, 2021).

Figura 1 – Energia Hidrelétrica no Brasil - Capacidade Instalada



Fonte: Adaptado de Pereira (2015); Energia (2022c); Energia (2022a); Energia (2022b); Pires (2022)

Fazendo uma análise setorial do uso de energia elétrica, de acordo com dados do Anuário Estatístico de Energia Elétrica (EPE, 2022), o setor de produção industrial é o principal responsável por esta demanda no Brasil (Figura 2). Esse anuário disponibiliza uma base de dados brutos colhidos entre 2013 e 2019, resultado do trabalho cooperativo realizado no âmbito da Comissão Permanente de Análise e Acompanhamento do Mercado de Energia Elétrica (COPAM), sob a coordenação da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), onde estão registradas informações do mercado de eletricidade no Brasil e no mundo.

Figura 2 – Consumo de Energia do Brasil nos Setores Produtivos entre 2013 e 2019



Setores ■ Serviço Público ■ Rural ■ Residencial ■ Industrial ■ Comercial

Fonte: Adaptado de EPE (2022)

Ainda neste cenário industrial, segundo levantamento da Associação dos Grandes Consumidores Industriais de Energia e de Consumidores Livres (ABRACE), o custo com

energia elétrica representa 48% do preço do leite, 34% do valor da carne, 28% do que pagamos na cerveja e 10% do gasto em materiais de construção e açúcar (ABRACE, 2022).

### 3.2 Processos Erosivos e Aporte de Sedimentos em Reservatórios

Erosão é um processo natural de desgaste de solos e rochas, ocasionando a desagregação de sedimentos que podem se deslocar com a ação da água ou do vento. O estudo deste fenômeno é muito amplo e abrange várias áreas, principalmente a agricultura e engenharia civil. Resumidamente, para a agricultura, o acompanhamento da erosão visa diminuir a perda da camada superficial de terra útil e fértil do solo, essencial para as diversas culturas. Já para a engenharia civil, a erosão é monitorada em diversas áreas como a construção de estradas, estabilização de taludes e proteção de rios e reservatórios (CARVALHO, 2008).

Embora naturais, processos erosivos são intensificados pela ação humana, em especial, quando esta faz a remoção da cobertura vegetal que é responsável por proteger o solo dos impactos da chuva e outras intempéries. Além disso, as queimadas e a exploração sem controle da agricultura e pecuária também são fatores agravantes deste fenômeno (SALES *et al.*, 2017).

No Brasil, o governo federal chegou a implantar alguns programas que buscam minimizar os efeitos nocivos da degradação do solo como por exemplo, o Programa Nacional de Microbacias Hidrográficas e Conservação de Solos na Agricultura (MAPA, 2022), o Programa de Recuperação de Áreas Degradadas na Amazônia (SENAR, 2017), e outros. Apesar desses programas, a educação ambiental ainda se mostra como uma das mais eficientes estratégias para fomentar o desenvolvimento sustentável, além de ampliar e proporcionar longevidade e bom desempenho na eficiência energética nacional (BARBOSA, 2022).

Essas ações são necessárias porque a construção de barragens, e conseqüente formação de um reservatório, são intervenções muito bruscas do homem no meio ambiente (ANJINHO *et al.*, 2021), pois alteram desde o ciclo hidrológico da região, até mesmo a velocidade do fluxo do rio e a capacidade natural de transporte de sedimentos, ou seja, a própria dinâmica natural do curso d'água é impactada. Dessa forma, se os níveis dos reservatórios, assim como seus processos erosivos e transporte de sedimentos não forem adequadamente monitorados, pode haver o descontrole do assoreamento e a diminuição de sua capacidade produtiva (POLETO, 2018).

Estes eventos podem culminar, inclusive, com o final da vida útil de um reservatório, que coincide com o momento em que o acúmulo de sedimentos é tamanho que se torna inviável seu aproveitamento hidrelétrico (ELETROBRAS, 2003). Por exemplo, na China, o reservatório de Sanmenxia, que começou operar em 1960, teve que ser desco-

missionado já em 1964 devido ao assoreamento prematuro (WANG; WU; WANG, 2005), enquanto o reservatório de Laoying ficou totalmente assoreado antes mesmo do término das obras (CHAMOUN; CESARE; SCHLEISS, 2016). Na Índia, a barragem de Nizam Sagar, construída em 1923, já tinha perdido mais de 60% de seu volume total no começo da década de 80, (CHETTRI; BOWONDER, 1983). Outros estudos na Europa apresentaram inúmeros reservatórios que foram completamente comprometidos pelo assoreamento (VERSTRAETEN *et al.*, 2006), numa clara alusão que este é um problema mundial.

No Brasil, esse problema também existe em barragens em todas as bacias hidrográficas. O Quadro 2 apresenta alguns reservatórios cujas informações indicam a existência de assoreamento indesejável, seja na área de remanso ou mesmo ao longo do reservatório (CARVALHO; MENDES, 2018). Certamente existem no país outros reservatórios nas mesmas condições.

Quadro 2 – Reservatórios no Brasil com Problemas de Assoreamento

Reservatório	Curso água	Proprietário	MW
<b>Bacia do Amazonas</b>			
Jirau	Madeira	Jirau Energia	3.750
Santo Antônio	Madeira	Santo Antônio Energia	3.568
<b>Bacia do Tocantins-Araguaia</b>			
Itapecuruzinho	Itapecuruzinho	(Inoperante)	1,0
<b>Bacia do São Francisco</b>			
Rio de Pedras	Velhas	CEMIG	9,28
Paraúna	Paraúna	CEMIG	4,28
<b>Bacias do Atlântico Leste</b>			
Funil	Contas	CHESF	10
Pedra	Contas	CHESF	20
Sá Carvalho	Piracicaba	CEMIG	78
Salto Grande	Santo Antônio	CEMIG	102
Rio Bonito	Santa Maria Vitória	Statkraft	22,5
Suíça	Santa Maria Vitória	Statkraft	35,3
Jucu	Jucu	Statkraft	4,8
Jaguari	Jaguari	Furnas	27,6
<b>Bacia do Paraná</b>			
Caconde	Pardo	AES Brasil	80,4
Euclides da Cunha	Pardo	AES Brasil	108,8
Americana	Atibaia	CPFL	30
Jurumirim	Paranapanema	CTG Brasil	100,9
Piraju	Paranapanema	CBA	80
Presidente Vargas	Tibaji	Klabin	22,5
Porto Primavera	Paraná	CESP	1.540
<b>Bacia do Uruguai</b>			
Caveiras	Caveiras	CELESC	3,83
Celso Ramos	Chapecozinho	CELESC	5,62
<b>Bacias do Atlântico Sudeste</b>			
Santa Cruz	Tacaniça	Votorantim	1,5
Passo Real	Jacuí	CEEE	158

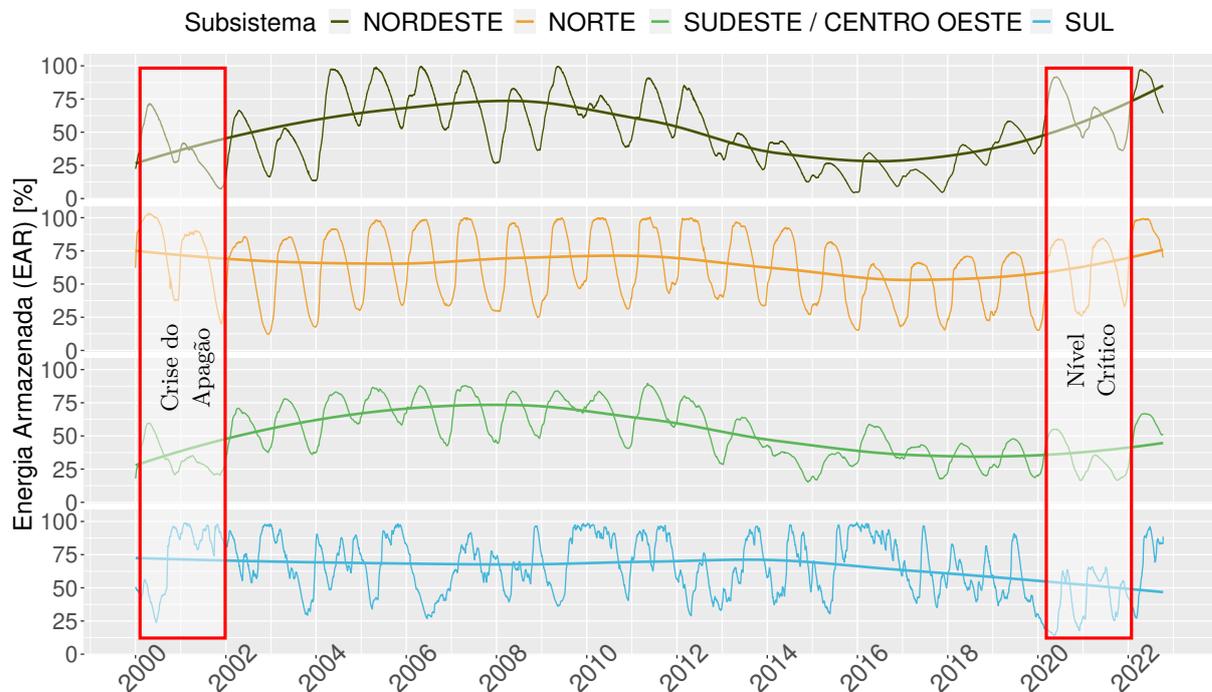
Fonte: Adaptado de Carvalho e Mendes (2018)

Ainda neste contexto, analisando os dados abertos do portal da ONS (ONS, 2022a), a Figura 3 apresenta uma série histórica com os dados de energia armazenada (EAR)<sup>1</sup> dos quatro principais subsistemas (nordeste, norte, sudeste / centro-oeste e sul) que compõem o Sistema Interligado Nacional (SIN), desde o ano 2000. Percebe-se que a maioria deles operaram em um nível crítico em 2021, bem abaixo de suas capacidades máximas. Além da crise de 2021, a Figura 3 também permite visualizar outro período histórico conhecido

<sup>1</sup> A EAR representa a energia associada ao volume de água disponível nos reservatórios que pode ser convertido em geração na própria usina e em todas as usinas à jusante na cascata.

como “apagão” de 2001, onde o país passou por um período de racionamento de energia devido aos baixos índices nos volumes dos principais reservatórios do país.

Figura 3 – EAR - Série Histórica por Subsistema

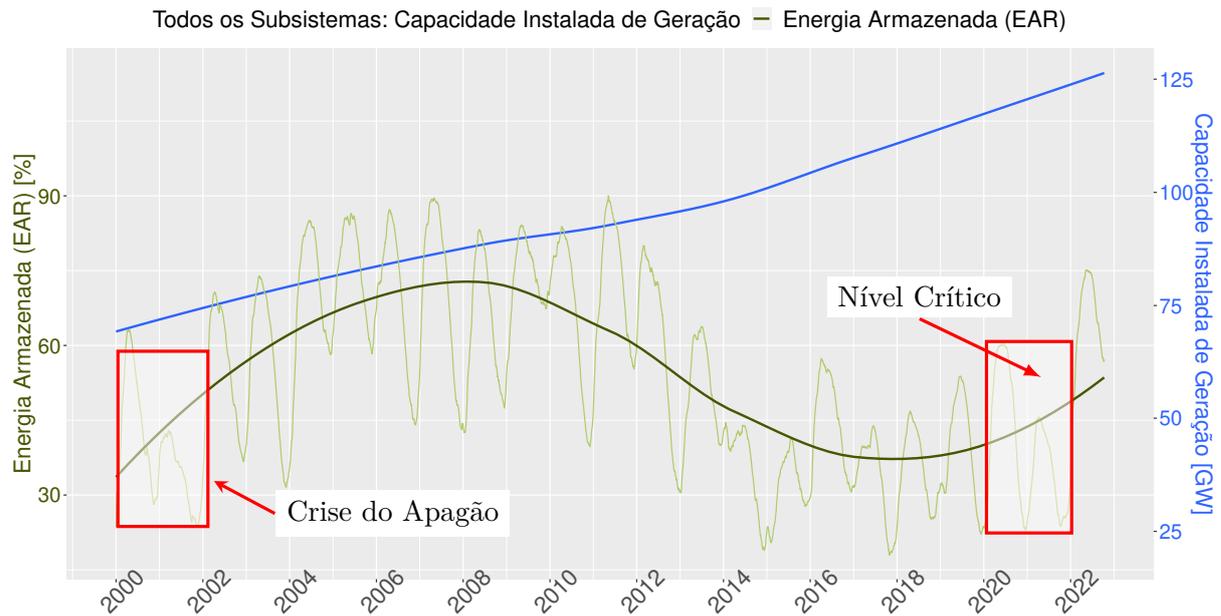


Fonte: Gerado a partir de dados de ONS (2022a)

É importante esclarecer que o subsistema sudeste / centro-oeste é o mais importante do SIN, sendo responsável por 70,38% do total de geração de energia hidrelétrica no país. Já os subsistemas nordeste, sul e norte são responsáveis por 17,84%, 6,53% e 5,24%, respectivamente. Aplicando esses percentuais na mesma base de dados de subsistemas da ONS, obtêm-se o gráfico da Figura 4, que traz uma análise unificada e aproximada da série histórica da energia armazenada ao longo do tempo. Também foi acrescido ao gráfico da Figura 4, para efeito de comparação, uma curva representativa dos dados de capacidade instalada de geração<sup>2</sup> neste mesmo período (ONS, 2022b). É possível perceber que, embora investimentos relevantes em obras de usinas hidrelétricas tenham sido realizados a partir do ano 2000, o percentual de EAR não acompanhou esses números, principalmente a partir de 2007 quando a tendência de crescimento da curva desse gráfico foi revertida, o que nos leva a compreender que o simples investimento em construção de novas usinas não é o suficiente para suprir a demanda sempre crescente por energia elétrica.

<sup>2</sup> a capacidade instalada de geração está relacionada à potência máxima que uma usina elétrica é capaz de gerar

Figura 4 – EAR x Capacidade Instalada de Geração (GW) - Série Histórica Compilada



Fonte: Gerado a partir de dados de ONS (2022a)

Além do problema do assoreamento, os sedimentos podem impactar uma usina hidrelétrica quando, com o tempo, ocorre o choque das partículas com as máquinas hidráulicas, em especial as turbinas, gerando desgastes por abrasão. Isso pode gerar custos de restauração do sistema eletromecânico, além de mais perdas financeiras pela inoperância do equipamento durante sua manutenção (POLETO, 2018).

### 3.3 Monitoramento de Processos Hidrossedimentológicos

Segundo Estigoni *et al.* (2014), toda barragem, independentemente de sua finalidade e características, sofre processo de assoreamento influenciado pelo clima, pluviosidade, hidrologia, formação geológica, topografia, cobertura vegetal, tipo e uso do solo, entre outros. A própria construção de uma barragem favorece a deposição de sedimentos porque o barramento causa redução da velocidade do fluxo de água que está diretamente relacionada com a energia que move as partículas de solo. Diante dessa situação, é evidente que o monitoramento de processos hidrossedimentológicos ajuda a melhorar a compreensão do comportamento de reservatórios e aumentar sua vida útil.

Neste contexto, as agências reguladoras ANA e ANEEL estabeleceram de forma conjunta, por meio da resolução 003/2010, as condições e os procedimentos obrigatórios a serem observados pelos concessionários e autorizados de geração de energia hidrelétrica para a instalação, operação e manutenção de estações hidrométricas, visando ao monitoramento hidrossedimentológicos e de qualidade da água, associado a aproveitamentos hidrelétricos (ANA/ANEEL, 2010).

Em um monitoramento hidrossedimentológico, a descarga sólida total de sedimentos é uma variável essencial, pois é um dado que permite o diagnóstico de eventuais impactos na área de drenagem da bacia ao longo do tempo, podendo tornar-se importante indicador para o manejo sustentável de um reservatório, que podem ser realizadas por meio de:

### 3.3.1 Medição Indireta

É a forma tradicional para calcular a descarga sólida total, que é a quantidade de sedimentos transportados pela seção transversal de um curso d'água em um determinado intervalo de tempo (CARVALHO, 2008). Consiste no uso de amostradores adequados (Figura 5 e Figura 6) para a coleta de material em suspensão e leito no rio, para posteriores análises em laboratório e cálculos com fórmulas convencionais. Este é um trabalho realizado com uma frequência não satisfatória, pois envolve a mobilização de equipes, veículos e equipamentos em empreitadas para localidades distantes umas das outras e, às vezes, de difícil acesso (CARVALHO *et al.*, 2000b).



Figura 5 – Amostrador USD-49



Figura 6 – Amostrador USDH-59

A descarga sólida total é determinada somando a descarga sólida em suspensão com a descarga sólida do leito, que são calculadas separadamente. Os cálculos envolvendo o material em suspensão alcançam resultados precisos e satisfatórios. Infelizmente, o mesmo não se pode observar quanto ao material de leito, onde as metodologias de cálculo, por serem muito dependentes do equipamento e da eficiência de coleta, apresentam falhas que podem interferir nos resultados finais (CARVALHO, 2017).

Para realizar os cálculos de descarga sólida total, dependendo da metodologia, são necessárias variáveis obtidas em campo como vazão, largura da seção, profundidade, área da seção e outras. Além dessas variáveis, outras advindas do laboratório também são utilizadas, como a concentração de sedimentos em suspensão e a granulometria do material. Também, algumas variáveis intrínsecas aos reservatórios precisam ser sistematicamente monitoradas, dentre elas, a Eficiência de Retenção ( $E_r$ ) de sedimentos e o Peso Específico Aparente Inicial.

Os principais métodos utilizados no Brasil para este fim são o método modificado de Einstein (USBR, 1955) e o método simplificado de Colby (COLBY, 1957). É importante ressaltar que para os mesmos dados de entrada, cada metodologia pode entregar resultados bem distintos.

Esses métodos e a maioria de outros métodos empíricos foram desenvolvidos em meados do século XX, baseados em medições e observações em um número reduzido de reservatórios dos EUA, onde, naquela época, havia poucos dados disponíveis para aferição. Por isso, a adoção destes métodos como referência mundial é, no mínimo, questionável, pois eles não levam em consideração que, em outras localidades, os reservatórios têm formatos diferentes e as características de aporte de sedimentos e as condições de operação são bastantes variáveis. No Brasil, por exemplo, o clima, regime tropical de chuvas, solo, geomorfologia, cobertura vegetal, entre outros aspectos, são diferentes daqueles do país de referência (COSTA, 2012).

### 3.3.2 Medição Direta

Mesmo com todos os esforços para se monitorar e aperfeiçoar os cuidados com reservatórios por medições indiretas, o que se percebe é que ainda existe uma grande lacuna de dados neste processo. A medição direta surge a partir de avanços tecnológicos que permitiram a instalação de equipamentos para medir a concentração e turbidez diretamente do curso d'água, de forma imediata e contínua. Estes equipamentos são, por exemplo, turbidímetros, ADCPs (*Dopplers*) e garrafas Delft que podem ou não utilizar de amostras físicas para realizar as medições. Chama atenção que a maioria dos processos de medição direta demandam calibragem dos equipamentos e preparação de gráficos de correlação com métodos indiretos para utilização dos dados (PELLEGRINI *et al.*, 2010).

Nesta conjuntura, Bartels, Terra e Collares (2014) e Carvalho *et al.* (2020) realizaram estudos para estimativa da concentração de sedimentos em suspensão (CSS) utilizando turbidímetros na bacia do Arroio do Ouro e na sub-bacia do rio Caiabi, respectivamente. Ambas pesquisas levaram em consideração a necessidade de calibração dos equipamentos, mas por fim alcançaram resultados que comprovam a correlação significativa entre as medidas de CSS e a turbidez da água.

Alternativamente, medições diretas também podem ser realizadas por levantamentos topobatimétricos periódicos. Esses levantamentos são formas bastante eficientes para medir o aporte de sedimentos, fazendo a leitura do relevo do leito do reservatório, calculando as curvas cota x área x volume (CAV) que ao serem comparadas com outros levantamentos anteriores, permitem determinar o volume de sedimentos recebidos em um intervalo de tempo e, conseqüentemente, sua capacidade atual (ESTIGONI *et al.*, 2009).

Foi com esse propósito que Hassan *et al.* (2017) analisaram, em 2014, um estudo topobatimétrico no reservatório de Dokan no Iraque. Os resultados desta pesquisa permi-

tiram atualizar as antigas curvas CAV do reservatório, datadas de 1959, logo após sua entrada em operação. Além disso, estimou-se que sua média anual de aporte de sedimentos era de, aproximadamente,  $3,8 \text{ hm}^3$

Outro levantamento topobatimétrico desse tipo foi realizado, entre os dias 09 de maio e 11 de julho de 2018, para a UHE Itumbiara, localizada entre os municípios de Itumbiara-GO e Araporã-MG. Segundo Sá (2021), a empresa Rural Tech foi contratada por Furnas para fazer esse levantamento, em atendimento à resolução conjunta ANA/ANEEL 003/2010 (ANA/ANEEL, 2010). O contrato envolveu serviços especializados na área de cartografia, batimetria, topografia e geoprocessamento para atualização das curvas CAV, conforme segunda versão do documento orientativo da ANA "Orientações para Atualização das Curvas Cota x Área x Volume" (PRADO *et al.*, 2013). O relatório intitulado IT-CAV-RT-R02 (SÁ, 2021), emitido em Abril de 2021, está disponível para consulta pública no catálogo de metadados da ANA (ANA, 2022) e dispõe de toda metodologia empregada nos levantamentos realizados para atualização das curvas CAV da UHE Itumbiara.

Chama atenção que, para esse levantamento, foi implantada uma Rede de Vértices Geodésicos - RVG para UHE Itumbiara, composta por um total de 60 vértices principais distribuídos uniformemente ao longo do reservatório (Figura 7). A RVG implantada serviu de base para o georreferenciamento das seções batimétricas e adensamento de pontos para o apoio ao levantamento batimétrico.

O produto final dos levantamentos foi o Modelo Digital do Terreno - MDT (Figura 8), uma espécie de matriz de números que representa a distribuição geográfica de elevações. Através desse modelo foi possível calcular o volume atual do reservatório, com apoio do software ArcGis, além de permitir a elaboração das curvas Cota x Área x Volume da UHE Itumbiara.

Ao analisar o levantamento topobatimétrico da UHE Itumbiara de 2018 e comparar com o volume original da usina quando esta entrou em operação em 1980, percebe-se que o reservatório pode ter perdido um pouco de seu volume. Em 38 anos de operação, o volume útil do reservatório teria passado de  $12.454,00 \text{ hm}^3$  para  $12.189,03 \text{ hm}^3$ , o que equivale a uma perda de capacidade da ordem de 2,12%. Porém, deve-se ter muita cautela em considerar essa análise, pois é uma comparação a partir de uma investigação que pode conter diferenças de metodologia com o levantamento original. Uma melhor avaliação poderá ser realizada no futuro, quando um segundo levantamento topobatimétrico for realizado dentro dos mesmos critérios.

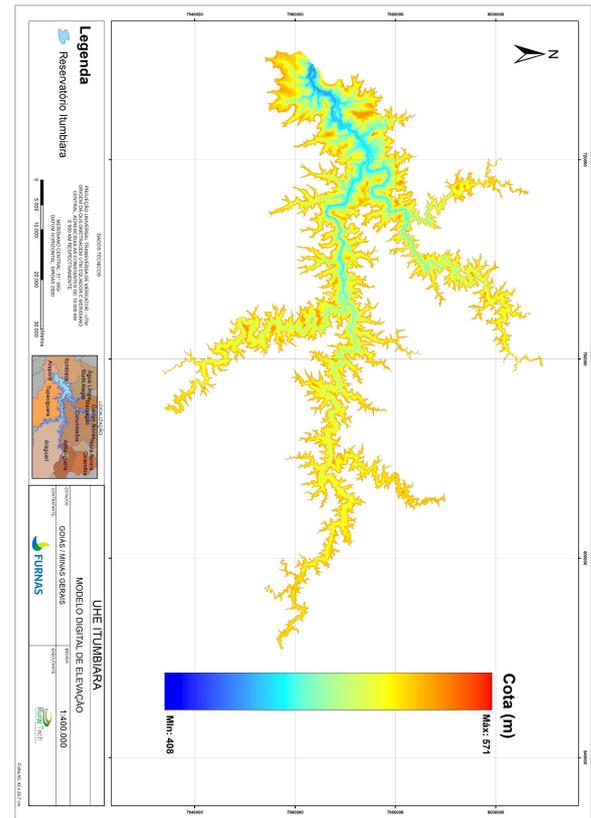
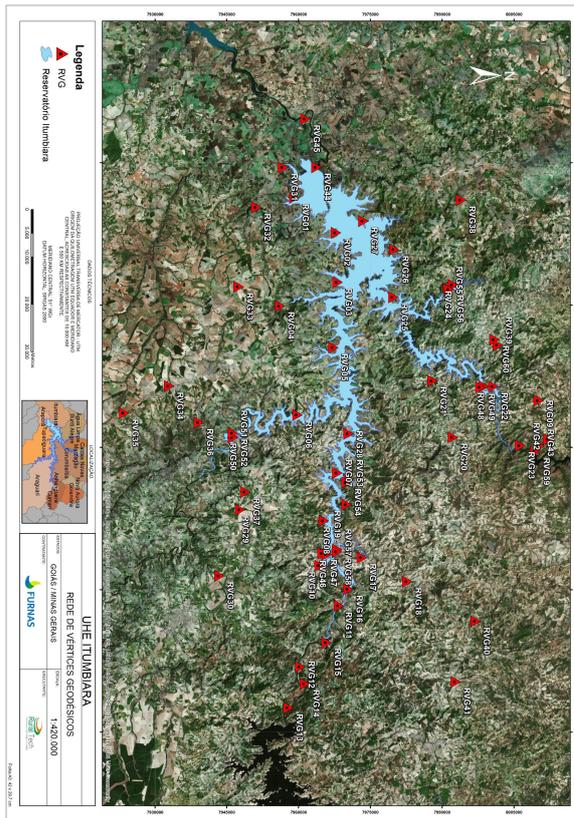


Figura 7 – Implantação da Rede de Vértices Geodésicos (RVG)      Figura 8 – Modelo Digital de Terreno (MDT)

Fonte: (SÁ, 2021)

### 3.3.3 Modelagem Computacional

A modelagem de processos hidrossedimentológicos com apoio de ferramentas computacionais é utilizada para simular esse tipo de fenômeno e assim, melhorar o seu entendimento, estimando a erosão do solo e o processo de assoreamento em reservatórios em menos tempo e com menor investimento. Na ausência de modelos, a quantidade de medições de campo necessárias, por métodos indiretos, tornaria financeiramente proibitiva a maioria dos projetos de avaliação, planejamento e manejo de bacia hidrográfica. Sua utilização, porém não é simples, por isso é necessária a adoção de critérios minuciosos para evitar que variáveis de entrada sejam informadas inadequadamente, gerando distorções nos resultados e decisões equivocadas possam ser tomadas (YU; CHEN; WU, 2022).

Não obstante, a utilização desses softwares no Brasil é discutível pelo fato de que a maioria dos modelos foram desenvolvidos em outros países onde existem variações quanto ao formato dos reservatórios, características de aporte de sedimentos e condições de operação. Uma das formas de contornar essas distorções é realizando a calibração do modelo para minimizar as incertezas relacionadas aos seus parâmetros. Normalmente, a calibração e validação desses modelos demanda extenso volume de dados, além de

envolver dificuldades para o levantamento de informações de entrada como a precipitação, características do solo, declividade das encostas e o tipo de cobertura vegetal, por exemplo. Na maioria das vezes, a caracterização desses processos físicos é dispendiosa e de difícil medição, sendo necessário estimá-los (BESKOW *et al.*, 2009).

De qualquer forma, a estimativa de dados para alimentar esses modelos deve ser evitada. Caso isso não seja possível, é preciso quantificá-la para melhorar a interpretação dos resultados e o monitoramento da bacia hidrográfica, diminuindo o grau de incerteza (SÁNCHEZ-CANALES *et al.*, 2015).

Vários softwares de modelagem são utilizados para realizar esse tipo de simulação, cada um tem suas particularidades e uma abordagem específica focada em fenômenos mais ou menos relevantes dentro de uma área de estudo. Alguns exemplos de softwares de modelagem: o Delft3D (DELTARES, 2022), de origem holandesa, o HEC-RAS (USACE, 2022), de origem norte americana e o Modelo de Grandes Bacias (MGB) (UFRGS, 2022), esse menos difundido, mas desenvolvido no Brasil pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) (Figura 9).

Figura 9 – Processos Hidrossedimentométricos - Modelos Computacionais



Fonte: (DELTARES, 2022; USACE, 2022; UFRGS, 2022)

Além desses modelos, destaca-se um modelo que chama bastante atenção aos pesquisadores nesta área por conferir maior representatividade e maior praticidade de execução e aplicação: o *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT).

### 3.3.3.1 Modelo *Soil and Water Assessment Tool* - SWAT

Produto de mais de 30 anos de pesquisas sobre modelos hidrológicos e erosivos, é a principal ferramenta computacional no mundo para modelagem de bacias hidrográficas e previsão de aporte de sedimentos em reservatórios. o SWAT (Figura 10) foi desenvolvido pela *United States Department of Agriculture - Agricultural Research Service* (USDA-ARS) e baseia seus cálculos em longas séries temporais (NEITSCH *et al.*, 2011).

O SWAT divide a bacia hidrográfica em estudo em sub-bacias e em seguida gera as Unidades de Resposta Hidrológica (Hydrologic Response Units - HRUs). Esta divisão é baseada nos mapas de tipos, usos e ocupações do solo que são sobrepostos como variáveis de entrada do software (BUONO, 2021). Além dessas informações, o processamento necessita de dados climáticos e parâmetros dos solos. Em cada HRU, o SWAT utiliza da *Universal Soil Loss Equation* (USLE) e suas variações para simulação da produção de sedimentos.

Figura 10 – Modelo SWAT - Soil and Water Assessment Tool



Fonte: (SWAT, 2022)

Estas equações calculam a quantidade de solos erodida que será transmitida para um exutório (OLIVEIRA, 2013).

A principal limitação do SWAT é o detalhamento espacial necessário para simular de maneira correta os processos ambientais, um exemplo disso é a precipitação em uma bacia hidrográfica. Ela não ocorre de maneira uniforme, por isso há dificuldade em representar a variabilidade espacial destes dados. Outra adversidade do modelo é que os arquivos de dados podem ser difíceis de manipular, podendo apresentar vários registros faltantes. O modelo também é incapaz de simular eventos de enchente detalhados e o encaminhamento dos sedimentos. Enfim, todos estes fatores fazem com que a ferramenta carregue consigo um grau de incerteza (KUWAJIMA *et al.*, 2011), principalmente ao ser aplicada em países como o Brasil que apresenta carência de dados nesta área.

Ainda assim, a utilização do SWAT está em franca expansão, demonstrando ser uma ferramenta robusta e flexível sendo, hoje, reconhecida internacionalmente, o que é evidenciado pelas conferências anuais e publicações relacionadas ao modelo em encontros e revistas científicas.

Dentro deste viés, Daramola *et al.* (2019) realizaram um estudo de modelagem com SWAT na barragem de Shiroro, no nordeste da Nigéria, onde ainda não havia monitoramento confiável para o aporte de sedimentos no reservatório. A pesquisa envolveu dados de transporte de sedimentos que permitiu, com dificuldades, que o modelo pudesse ser calibrado pelos dados de CSS e alcançasse resultados satisfatórios, numa média anual na ordem de  $84,1 \text{ t ha}^{-1}$ . Já Singh *et al.* (2012) se propuseram a realizar outro estudo na bacia hidrográfica de Nagwa, na Índia, onde o objetivo foi comparar os resultados da modelagem via SWAT com um modelo utilizando redes neurais artificiais para determinar qual se adaptava melhor as características da região, onde o aporte de sedimento médio anual já era conhecido, na ordem de  $3,7 \text{ t ha}^{-1}$ . Ao final da pesquisa, alcançou-se os valores de  $3,1$  and  $5,0 \text{ t ha}^{-1}$  para os modelos com redes neurais e SWAT, respectivamente. Neste caso específico, os dois modelos foram considerados eficientes, sendo que o modelo com redes neurais obteve resultados mais precisos.

Já em um cenário nacional de modelagem com SWAT, o P&D+I da ANEEL intitulado: “Modelagem em Diversas Escalas da Geração de Sedimentos em Erosões e o

Aporte em Reservatórios de UHEs” - PD.0394-1705/2017 definiu uma frente de atividades de pesquisa cujo tema é “Modelagem da Deposição de Sedimentos na UHE-Itumbiara via Modelos Hidrossedimentológicos”. Inclusive, em março de 2021, foi emitido o relatório técnico P&D\_S 03/2021 (OLIVEIRA, 2021) que apresenta o modelo computacional hidrossedimentológico da UHE Itumbiara, via aplicação do modelo SWAT.

Os pesquisadores, inicialmente, definiram as etapas de parametrização do modelo. Além das informações climáticas, uma dessas entradas foi o Modelo Digital de Elevação – MDE (Figura 11), que representa o relevo de forma real e assegura a convergência do escoamento superficial para a rede de drenagem mapeada. Também foram utilizadas imagens de satélite para mapear diferentes tipos de uso e cobertura do solo (UCS) presentes na área em estudo. As classes mapeadas foram codificadas e inseridas conforme exigido pelo modelo: Água (WATR), Agricultura Genérica (AGRL), Vegetação Nativa (FRST), Pastagem (PAST), Terras Nuas (BARR) e Perímetro Urbano (URML), conforme apresentado na Figura 12.

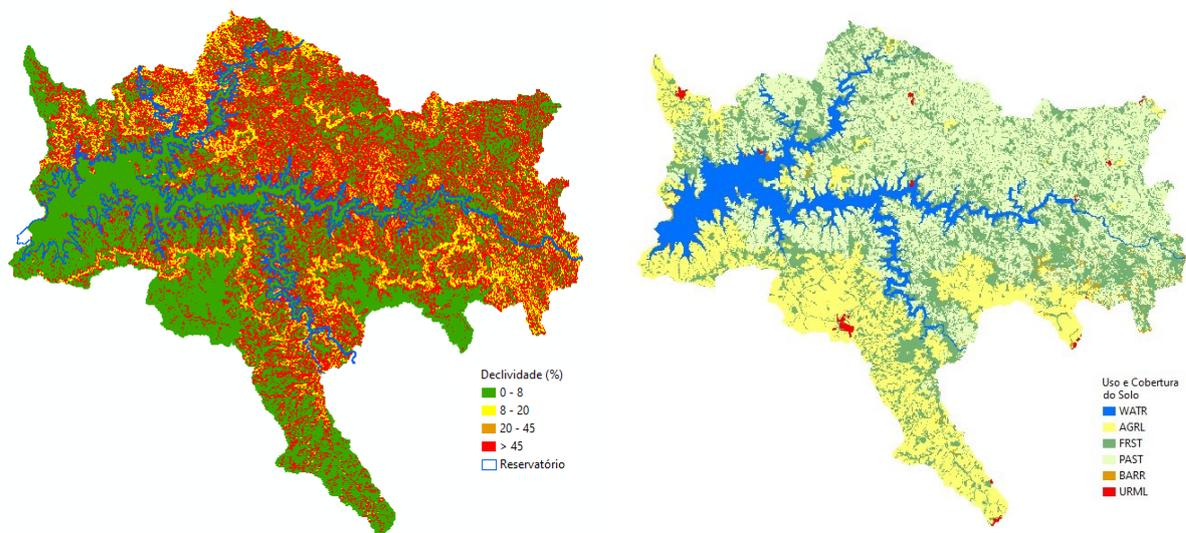


Figura 11 – Modelo Digital de Elevação (MDE)      Figura 12 – Uso e Cobertura do Solo (UCS)

Fonte: (OLIVEIRA, 2021)

Após a inserção de dados físicos, de acordo com as configurações exigidas pelo modelo, a etapa seguinte foi lançar os dados calculados pela ferramenta computacional desenvolvida por esta pesquisa para calibrar o modelo. Para avaliar a eficiência do SWAT, utiliza-se o coeficiente de Nash-Sutcliffe - COE, podendo este variar desde menos infinito até 1, sendo 1 o indicativo de simulação perfeita do evento. Segundo Lemonds e Kasch (2007), o COE é calculado pela equação 3.1.

---

$$COE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - Q_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - Q^{sim})^2} \quad (3.1)$$

Onde:

$Q_i^{obs}$  = é a descarga de sedimentos observada, em  $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ;

$Q_i^{sim}$  = é a descarga de sedimentos simulada, em  $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ;

$Q^{sim}$  = é a média de descarga de sedimentos observada, em  $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ;

$n$  = número de eventos.

Os resultados dessa simulação e sua avaliação de eficiência, por terem sido realizados utilizando a base de dados da ferramenta computacional desenvolvida nesta pesquisa, estão descritos no capítulo 5 (Resultados).

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Esta seção está destinada em realizar a apresentação da empresa Eletrobras Furnas, percorrendo brevemente sobre sua história, missão e seu parque gerador. Na sequência, como estudo de caso, será apresentada a UHE Itumbiara, onde é destacada a lista de estações hidrossedimentológicas dessa bacia que subsidiaram o estudo com suas respectivas localizações. Também são apresentados outros empreendimentos que foram simulados, na mesma metodologia, para comparação de resultados como os números alcançados para a UHE Itumbiara. Por fim, a abordagem passará para a parte conceitual da ferramenta computacional para cálculos hidrossedimentológicos, mostrando seus softwares de apoio, o processo original de hidrossedimentologia de Furnas, suas variáveis de entrada e como será realizado o cálculo da descarga sólida total.

### 4.1 Eletrobras Furnas

Eletrobras FURNAS é uma empresa privada, de capital fechado e controlada pela *holding* Centrais Elétricas Brasileiras S.A. – Eletrobras. Foi criada em 28 de fevereiro de 1957, à princípio como sociedade de economia mista federal<sup>1</sup>, no governo de Juscelino Kubitschek. A empresa nasceu com a missão de implantar um sistema integrado de geração e transmissão na região sudeste, evitando o colapso energético que ameaçava o processo de industrialização do Brasil na década de 50. Furnas, então, foi responsável por construir a primeira hidrelétrica de grande porte do país: a Usina de Furnas (MG) (Figura 13). Desde então, a empresa tem tido papel fundamental no fornecimento energético para a sociedade brasileira (BRANDI, 2021).

Figura 13 – UHE Furnas - Foto Institucional



Fonte: Furnas (2022b)

<sup>1</sup> Em 17/06/2022, de acordo com a Lei nº 14.182, de julho de 2021 (GOV.BR, 2021), a *Holdings* Eletrobras passou por um processo de capitalização por meio da venda de ações na bolsa de valores de São Paulo (Ibovespa) modificando sua natureza de empresa de economia mista para privada. (GOV.BR, 2022b)

Após 64 anos, a empresa conta com instalações nos estados de São Paulo, Minas Gerais, Rio de Janeiro, Espírito Santo, Paraná, Goiás, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Pará, Tocantins, Rondônia, Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Ceará, Bahia e no Distrito Federal, sendo que uma parte de suas concessões de geração e transmissão de energia elétrica é própria, e outra parte é constituída por meio de Sociedades de Propósito Específico (SPEs). Integram seu sistema 21 usinas hidrelétricas, 2 termelétricas e 1 complexo eólico, conforme Tabela 2, além de 34.995,13 km de linhas de transmissão e 72 subestações (FURNAS, 2022b).

Tabela 2 – Parque Gerador de Furnas

<b>Matriz</b>	<b>Usina Hidrelétrica</b>	<b>Condição</b>	<b>MW</b>
Hidrelétrica	Marechal Masc. de Moraes (MG)		476
	Itumbiara (MG/GO)		2.082
	Batalha (MG/GO)		52,5
	Simplício / Anta (MG/RJ)		333,7
	Furnas (MG)		1.216
	LCB Carvalho (MG/SP)	Propriedade Integral	1.050
	Porto Colômbia (MG/SP)		320
	Marimbondo (MG/SP)		1.440
	Funil (RJ)		216
	Corumbá (GO)		375
	Jaguari (SP)		27,6
	Serra da Mesa (GO)	Em Parceria	1.275
	Manso (MT)		210
	Baguari (MG)		140
	Foz do Chapecó (SC/RS)		855
	Peixe Angical (TO)		498,75
	Serra do Facão (GO)		212,58
	Retiro Baixo (MG)	Em SPE	82
	Teles Pires (MT/PA)		1.819,8
	Santo Antônio (RO)		3.568,3
Três Irmãos (SP)		807,5	
São Manoel (MT/PA)		735,84	
Termelétrica	Campos (RJ)	Propriedade Integral	25
	Santa Cruz (RJ)		350
Eólica	Fortim (CE)	Propriedade Integral	123

Fonte: Adaptado de Furnas (2022b)

Dentro da relação de usinas da Tabela 2, optou-se por definir a UHE Itumbiara como estudo de caso para testes com a ferramenta computacional a ser desenvolvida. Esta escolha se justifica pela sua importância natural, já que é a maior usina de propriedade integral do parque gerador de Furnas, e também pela preexistência de um número razoável de pesquisas acadêmicas e outras referências sobre este empreendimento. Em especial, o P&D+I ANEEL, intitulado “Monitoramento e Estudo de Técnicas Alternativas na Estabilização de Processos Erosivos em Reservatórios de UHEs” - PD-0394-1014/2010,

onde o fato do reservatório de Itumbiara ter sido um dos objetos de estudo, contribuiu decisivamente para esta escolha. Além desses fatores, a rotina de Furnas manter estações meteorológicas e coleta de amostras de sedimentos na bacia de contribuição de seus reservatórios, conforme ANA/ANEEL 003/2010 (ANA/ANEEL, 2010), foi importante para alimentar a base de dados da ferramenta computacional, oferecendo condições para a sua validação.

#### 4.1.1 UHE Itumbiara

Localizada no rio Paranaíba entre os municípios de Itumbiara-GO e Araporã-MG, a UHE Itumbiara (Figura 14) teve início de sua construção em 1974 e em 1980, entrou em operação. Hoje, é a maior usina do sistema Furnas, cujo reservatório possui cerca de 800 km<sup>2</sup>, banha 47 municípios e tem capacidade instalada de 2.082 MW (BUONO, 2021).

Figura 14 – UHE Itumbiara - Foto Institucional



Fonte: (FURNAS, 2022c)

Para subsidiar o programa de monitoramento hidrossedimentológico da UHE Itumbiara, Furnas, desde 2012, utiliza as medições de descargas líquida e sólida, realizadas em 9 estações hidrossedimentológicas em uma região de interesse, conforme Quadro 3.

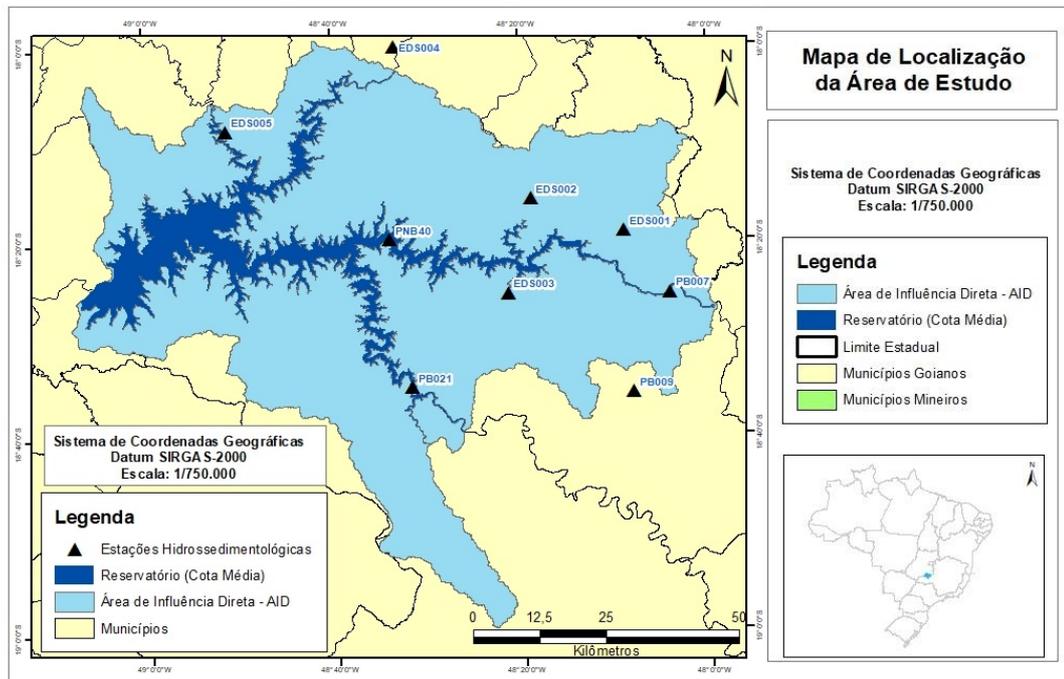
Quadro 3 – Estações Hidrossedimentológicas de Interesse

Estação	Rio	Coordenadas	
		Latitude	Longitude
PB007	Rio Paranaíba	18° 25' 24"S	48° 03' 55"W
PB009	Rio Jordão	18° 35' 38"S	48° 07' 58"W
PB021	Rio Araguari	18° 34' 54"S	48° 31' 38"W
EDS001	Ribeirão Pirapetinga	18° 19' 05"S	48° 08' 48"W
EDS002	Rio Veríssimo	18° 15' 40"S	48° 18' 41"W
EDS003	Ribeirão Araras	18° 25' 20"S	48° 21' 14"W
EDS004	Rio Corumbá	17° 59' 55"S	48° 33' 05"W
EDS005	Rio Piracanjuba	18° 08' 19"S	48° 51' 06"W
PNB040	Rio Paranaíba	18° 19' 41"S	48° 33' 51"W

Fonte: Dados fornecidos por Furnas

A Figura 15 mostra no mapa a localização de cada uma das estações selecionadas para subsidiar este programa<sup>2</sup>.

Figura 15 – UHE Itumbiara - Mapa de Localização das Estações Hidrossedimentológicas



#### 4.1.2 Outros Empreendimentos

Para comparar os resultados obtidos pela ferramenta computacional com os cálculos hidrossedimentológicos do reservatório da UHE Itumbiara, foram considerados mais dois cenários: UHE Itaipu (maior volume útil) e UHE Luiz Carlos de Barreto (LCB) Carvalho (menor volume útil), instaladas nos rios Paraná e Grande, respectivamente.

A UHE Itaipu (Figura 16) é um empreendimento binacional administrado por Brasil e Paraguai na seção de fronteira entre os dois países. Em relação a geração, é líder mundial em produção de energia limpa e renovável, tendo produzido mais de 2,8 milhões de gigawatts-hora (GWh) desde o início de sua operação, em 1984. Com 20 unidades geradoras e 14.000 MW de potência instalada, fornece 8,4% da energia consumida no Brasil e 85,6% no Paraguai. O motivo dessa escolha é pelo seu reservatório que possui volume útil de 29.000 hm<sup>3</sup> (mais que o dobro da UHE Itumbiara) e uma área de 1.350 km<sup>2</sup>, indo de Foz do Iguaçu, no Brasil e Ciudad del Este (BINACIONAL, 2022).

Os cálculos hidrossedimentológicos da UHE Itaipu foram apresentados por Carvalho (2008), onde a metodologia de cálculo adotada foi a mesma utilizada pela ferramenta computacional desenvolvida neste trabalho. Os dados processados são provenientes de

<sup>2</sup> Por razões sanitárias, os serviços de campo foram paralisados no ano de 2020 durante a pandemia de Covid19, sendo retomados somente no ano de 2021.

medições de descarga sólida e de granulometria do sedimento transportado, de vazões naturais, além de dados de projeto, fornecidos pelo departamento de meio ambiente aquático (DMAA) de Itaipu Binacional. As medições de descarga sólida afluente foram efetuadas no rio Paraná em Guaíra, na ponta de jusante da Ilha Grande. Estas medições correspondem ao programa de campanhas quase diárias do período de dezembro/88 a setembro/89, realizadas pela Geologia e Engenharia Ambiental LTDA (GEA).



Figura 16 – UHE Itaipu

Figura 17 – UHE LCB Carvalho

Fonte: Binacional (2022) e Furnas (2022d)

Em outro extremo, a UHE LCB Carvalho (Figura 17), inaugurada em 1969, está localizada no município de Pedregulho, próximo à cidade de Franca, em São Paulo, e possui seis turbinas, totalizando 1.050 MW de capacidade total instalada, o suficiente para suprir a demanda de 20 cidades deste porte. Sua escolha foi motivada pelo reservatório da usina que, em virtude de suas características (fio d'água<sup>3</sup>), tem volume útil de apenas 178 hm<sup>3</sup> e opera, normalmente, num nível quase constante, graças à regularização proporcionada pela Usina de Furnas, a montante (FURNAS, 2022d).

Os cálculos hidrossedimentológicos da UHE LCB Carvalho foram realizados diretamente pela ferramenta computacional construída neste trabalho utilizando séries históricas de vazões diárias de 2012 a 2022. Até a conclusão desta pesquisa, a estruturação dos dados de sedimentos desta usina ainda não tinha sido finalizada na nova ferramenta computacional, portanto foi utilizada a mesma curva-chave de sedimentos da UHE Itumbiara, sendo os resultados apresentados deste empreendimento apenas fictícios, não sendo válidos para análise e tomada de decisão.

#### 4.1.3 Simulação em Diferentes Cenários

Foram realizadas simulações para a UHE Itumbiara, em cenários variados, para ajudar na compreensão da dinâmica de produção de sedimentos em sua bacia hidrográfica

<sup>3</sup> Usina que aproveita a força da correnteza dos rios para gerar energia, sem precisar de um grande reservatório

e seu comportamento em condições naturais diversas. Todos os cenários propostos abaixo foram escolhidos, analisando as variações possíveis dentro do histórico de vazões registrados e os valores de descarga sólida total da UHE Itumbiara, de 2012 a 2021, conforme Tabela 7 do Apêndice B.

Os cenários propostos foram:

1. **Cenário seco** - Historicamente, os meses mais secos na região vão de maio a outubro. Assim foram desconsiderados do processamento os meses de novembro a abril (mais úmidos) e, em compensação os meses de maio a outubro foram duplicados. O objetivo foi simular o ano inteiro, como se houvesse apenas meses mais secos.
2. **Cenário úmido** - Ao contrário do cenário 1, os meses mais úmidos na região vão de novembro a abril. Assim foram desconsiderados do processamento os meses de maio a outubro (mais secos) e, em compensação os meses de novembro a abril foram duplicados. O objetivo foi simular o ano inteiro, como se houvesse apenas meses mais úmidos.
3. **Cenário ano mais seco** - O ano mais seco da série histórica foi o ano de 2021, com uma vazão média de  $722 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , porém devido a pandemia de covid 19, poucas amostras foram coletadas e analisadas neste período. Assim, foi definido o ano de 2017 como o melhor parâmetro de ano mais seco, pois teve controle sedimentométrico normalizado e uma média de Vazão de  $791 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ . O objetivo foi simular o comportamento do aporte de sedimentos na UHE Itumbiara, caso um período prolongado de baixas vazões, como em 2017, se repetisse dentro de toda série histórica.
4. **Cenário ano mais úmido** - Este cenário é similar ao anterior, porém leva em consideração o ano mais úmido da série histórica: 2012, com uma média de vazão de  $1544 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ . O objetivo foi simular o comportamento do aporte de sedimentos, caso um período prolongado de altas vazões, como em 2012, se repetisse dentro da série histórica.

## 4.2 Ferramenta Computacional para Cálculos Hidrossedimentológicos

Como objeto de apoio para este estudo, uma ferramenta computacional foi projetada para reunir, armazenar e gerenciar informações para geração e análise de relatórios hidrossedimentológicos. Um de seus propósitos foi atuar como suporte organizacional deste tipo de dados da empresa Eletrobras Furnas, coletados em várias de suas estações espalhadas ao longo das bacias de contribuição dos reservatórios de suas atuais 21 usinas hidrelétricas, a princípio utilizando os dados da UHE Itumbiara como reservatório piloto. Além disso, a ferramenta fez uso de sua base de dados estruturada para realizar cálculos de aporte de sedimentos e tempo de vida útil de reservatórios.

#### 4.2.1 Softwares de Apoio

A ferramenta computacional foi escrita em PHP (Figura 18) (um acrônimo recursivo para PHP: *Hypertext Preprocessor*). Trata-se de uma linguagem de script de uso geral e código aberto, especialmente adequada para o desenvolvimento de páginas WEB que pode ser mesclada com *HyperText Markup Language* (HTML). Resumidamente, o código PHP é executado no servidor WEB, gerando um HTML que então é enviado ao navegador. O navegador, por sua vez, recebe os resultados da execução desse script, mas não sabe qual era o código fonte (PHP, 2022).

Por outro lado, as tabelas manipuladas pelos scripts em PHP foram definidas em MariaDB (Figura 18). Este é um SGBD relacional, também distribuído como software livre, com recursos de gerenciamento e desenvolvimento que o tornam escalável e robusto, assim como as características de dados provenientes de séries históricas, conforme a demanda da ferramenta computacional. O MariaDB utiliza a linguagem *Structure Query Language* (SQL), que é a linguagem universal para inserir, acessar e gerenciar o conteúdo armazenado em um banco de dados (MARIADB, 2022).

Para dar sustentação a essas tecnologias e segurança aos dados, foi implantado um servidor WEB Apache (Figura 18). O Servidor WEB é o responsável por disponibilizar as páginas e realizar os processamentos necessários para que o acesso ocorra. Desenvolvido pela *Apache Software Foundation* (ASF) (ASF, 2022), este é um software de código aberto reconhecido pelo desempenho e estabilidade, sendo que 31,7% de todos os sites no mundo fazem uso desta ferramenta (W3TECHS, 2021). O Motivo de sua adoção é pela sua facilidade de suportar a linguagem PHP e o banco de dados MariaDB, que é a combinação a ser utilizada na ferramenta computacional.

Figura 18 – Ferramenta Computacional - Softwares Livres



Fonte: (ASF, 2022; PHP, 2022; MARIADB, 2022)

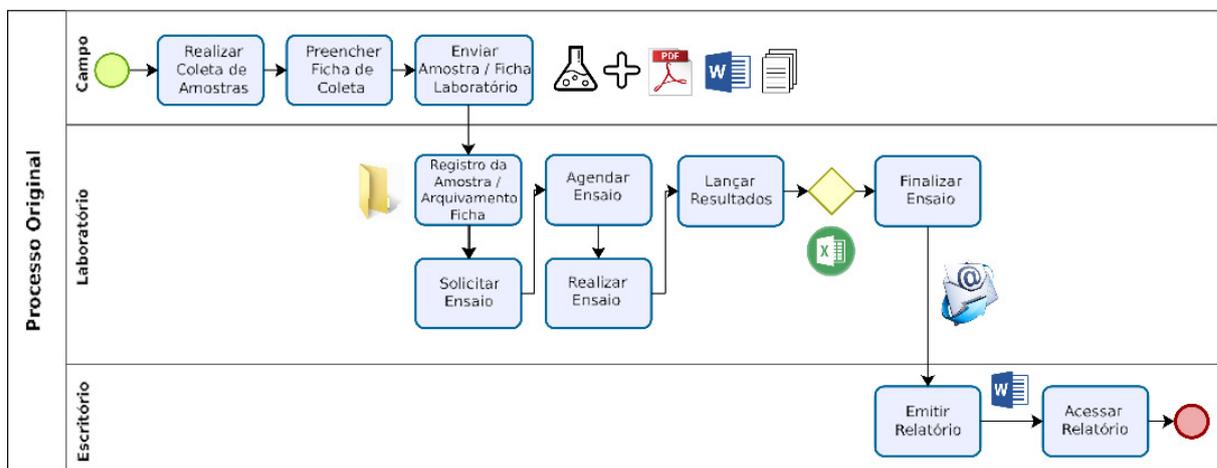
Cabe salientar que a ferramenta computacional foi totalmente desenvolvida utilizando softwares livres. A vantagem de um software livre é que qualquer usuário, além de poder utilizá-lo gratuitamente, tem a liberdade de estudar seu código-fonte e fazer alterações (FSF, 2022). Normalmente, quem mantêm os projetos são as comunidades de desenvolvedores que buscam melhorá-los continuamente. Além das ferramentas apresentadas nesta seção, outros softwares livres que também foram utilizados neste projeto: o Eclipse (ECLIPSE, 2022), como *Integrated Development Environment* (IDE) de Desenvolvimento; o R (CRAN, 2022) e RStudio (RSTUDIO, 2022), para apoio estatístico; o Meld (MELD,

2022), como comparador de arquivos; o *Engauge Digitizer* (MITCHELL, 2022), para recuperar dados a partir de arquivos de imagem; o QGIS (OSGEO, 2022), como sistema de informações geográficas (SIG) e o libreOffice (LIBREOFFICE, 2022), como suíte de escritório.

#### 4.2.2 Processo de Hidrossedimentologia Original

Para que a ferramenta computacional pudesse ser desenvolvida, foi necessário realizar um mapeamento do processo de hidrossedimentologia da empresa Eletrobras Furnas e realizar alguns ajustes. A Figura 19 ajuda entender como este processo estava estruturado, originalmente.

Figura 19 – Hidrossedimentologia Furnas - Processo Original



Neste processo, pôde-se perceber papéis bem definidos:

- **Campo**, equipe responsável por se deslocar pelas estações de todo o parque hidrogerador de Furnas, colhendo amostras de sedimentos e preenchendo as fichas de coletas, de acordo com cronograma definido anualmente pela empresa. As principais variáveis anotadas manualmente nas fichas de coletas são: metodologia de coleta, tipo e bico do amostrador, temperatura da água, vazão, área da seção transversal, distância entre as margens, além da data e hora da atividade. Depois de realizadas essas anotações, as amostras são enviadas para ensaios em laboratório.
- **Laboratório**, equipe responsável pela recepção das amostras e pelo registro e arquivamento das fichas de coleta. A partir deste momento, os ensaios de laboratório para as amostras são solicitados, agendados e realizados conforme Furnas (2022a). Ao término desta fase, os resultados são disponibilizados e a equipe de escritório é notificada para iniciar a elaboração do relatório final.
- **Escritório**, de posse dos dados de laboratório e das informações de campo, esta equipe emite o relatório final conforme demanda do órgão regulador, neste caso

ANEEL. Os cálculos da descarga sólida total são baseados no Método Modificado de Einstein (USBR, 1955) e no Método Simplificado de Colby (COLBY, 1957), utilizando a planilha eletrônica Einstein.xls e o aplicativo COLBY\_W.exe, respectivamente. Ambas as soluções são disponibilizadas por Carvalho (2008), via CD-ROM em sua obra.

Durante todo o mapeamento do processo de hidrossedimentologia de Furnas, observou-se que não havia padrões bem definidos para registros dos mesmos tipos de informações, por exemplo, foram encontrados formulários em formatos PDF, XLS, DOC ou até em folhas impressas para documentos semelhantes. Essa despadronização e o fato dos dados não estarem estruturados em um Sistema de Gerenciamento de Banco de Dados (SGBD) ainda dificulta os cálculos para emissão do relatório final.

Com base nestas observações, definiu-se que para, efetivamente, agregar valor a empresa, a ferramenta computacional deveria otimizar esse processo, inclusive realizando, automaticamente, cálculos hidrossedimentológicos, em especial o da descarga sólida total.

#### 4.2.3 Variáveis Hidrossedimentométricas

Para se ter elementos de avaliação do assoreamento e da vida útil do reservatório, é preciso reunir uma série de variáveis sedimentológicas e hidrológicas. Para processamento dos cálculos no simulador da ferramenta computacional, seguem, em sequência, as variáveis necessárias:

1. Volume do reservatório

O Volume do reservatório ( $V_{res}$ ) é considerado uma constante e a ferramenta deverá armazenar essa informação em  $\text{hm}^3$ .

2. Vazão Média Afluente Anual

Para determinar a Vazão Média Afluente Anual, a ferramenta computacional deverá estruturar uma tabela com todo o histórico de vazões. A partir desses valores, será possível calcular a vazão média afluente anual, em  $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ , de todos os ciclos reunidos.

3. Volume Médio Afluente Anual

Para determinar Volume Médio Afluente Anual, em  $\text{hm}^3$ , a ferramenta computacional deverá multiplicar a variável Vazão Média Afluente Anual em  $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$  por 31.536.000 s. Este número é calculado multiplicando: número de dias do ano não bissexto (365) x número de horas em um dia (24) x número de minutos do dia (60) x número de segundos em um minuto (60). Depois, o resultado será dividido por 1.000.000 para transformar  $\text{m}^3$  em  $\text{hm}^3$ .

#### 4. Descarga Sólida Total Média Afluente

Para determinar a Descarga Sólida Total Média Afluente ( $Q_{st}$ ), em  $\text{td}^{-1}$ , será necessário traçar a curva-chave de Sedimentos que envolve  $Q_{st}$  x Vazão de cada reservatório, a partir de dados das amostras e de laboratório registradas na ferramenta computacional.

#### 5. Argila, Silte e Areia

Os percentuais de argila, silte e areia serão determinados, em %, calculando as médias da granulometria de todas as amostras dos reservatórios registrados na ferramenta computacional.

#### 6. Eficiência de Retenção

Para a ferramenta computacional, somente será implementada a metodologia de Brune (1953), uma vez que, para Furnas, todos seus reservatórios são considerados médios ou grandes.

Para a representação da curva de Brune na ferramenta computacional, serão utilizadas as equações 4.1, 4.2 e 4.3, apresentadas por Gill (1979):

Para sedimentos grossos:

$$E_r = \frac{\left(\frac{C}{I}\right)^2}{0,994701 \cdot \left(\frac{C}{I}\right)^2 + 0,006297 \cdot \left(\frac{C}{I}\right) + 0,3 \cdot 10^{-5}} \quad (4.1)$$

Para sedimentos médios:

$$E_r = \frac{\left(\frac{C}{I}\right)}{\left[0,012 + 1,02 \cdot \left(\frac{C}{I}\right)\right]} \quad (4.2)$$

Para sedimentos finos:

$$E_r = \frac{\left(\frac{C}{I}\right)^3}{\left[1,02655 \cdot \left(\frac{C}{I}\right)^3 + 0,02621 \cdot \left(\frac{C}{I}\right)^2 - 0,133 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{C}{I}\right) + 0,1 \cdot 10^{-5}\right]} \quad (4.3)$$

Onde:

$E_r$  = eficiência de retenção do sedimento afluente ao reservatório, adimensional;

C = capacidade do reservatório, em  $\text{m}^3$ ;

I = volume médio anual afluente em  $\text{m}^3$ .

## 7. Peso Específico Aparente Inicial

Para implementação do código para cálculo do peso específico aparente inicial na ferramenta computacional será utilizada a equação 4.4, conforme Carvalho (2008).

$$\gamma_{ap} = W_c \cdot p_c + W_m \cdot p_m + W_s \cdot p_s \quad (4.4)$$

Onde:

$\gamma_{ap}$  = peso específico aparente do depósito, em  $t d^{-1}$ ;

$W_c, W_m, W_s$  = coeficientes de compactação, ou seja, pesos específicos iniciais de argila, silte e areia, respectivamente, obtidos segundo o tipo de operação do reservatório<sup>4</sup>, conforme Tabela 3, em  $t d^{-1}$ ;

$p_c, p_m, p_s$  = frações de quantidades de argila, silte e areia contidas no sedimento afluyente;

Tabela 3 – Constantes W e K para Cálculo do Peso Específico Aparente em Função do Tipo de Operação do Reservatório

Tipo de Operação de Reservatório	Argila		Silte		Areia	
	$W_c$	$K_c$	$W_m$	$K_m$	$W_s$	$K_s$
1	0,416	0,2563	1,121	0,0913	1,554	0,0
2	0,561	0,1346	1,137	0,0288	1,554	0,0
3	0,641	0,0	1,153	0,0	1,554	0,0
4	0,961	0,0	1,169	0,0	1,554	0,0

Fonte: (USBR, 1974)

### 4.2.4 Cálculo da Descarga Sólida Total

A ferramenta computacional deverá realizar os cálculos de descarga sólida total utilizando o método simplificado de Colby (1957), que foi, inicialmente, escolhido como metodologia padrão de cálculo. O método simplificado de Colby é baseado no método modificado de Einstein (USBR, 1955), porém seus cálculos são mais simples e exigem menos variáveis de entrada, o que vem ao encontro da realidade da maioria dos postos de medições do país que possuem a escassez de dados de transporte de sólidos como fator comum (POLETO, 2018).

A descarga sólida total será calculada pela Equação 4.5 (CARVALHO, 2008).

$$Q_{st} = Q_{sm} + Q_{nm} \quad (4.5)$$

<sup>4</sup> Para Furnas, é adotado 1 para o tipo de operação de reservatório, ou seja, sedimento sempre ou quase sempre submerso.

Onde:

$Q_{st}$  = descarga sólida total, em  $t d^{-1}$ ;

$Q_{sm}$  = descarga sólida medida, em  $t d^{-1}$ ;

$Q_{nm}$  = descarga sólida não medida, em  $t d^{-1}$ ;

A descarga sólida medida ( $Q_{sm}$ ) está em função dos valores de vazão no momento da coleta da amostra e concentração medida em laboratório, conforme Equação 4.6.

$$Q_{sm} = 0,0864 \cdot Q \cdot C'_s \quad (4.6)$$

Onde:

$Q_{sm}$  = descarga sólida medida, em  $t d^{-1}$ ;

$Q$  = vazão, em  $m^3 s^{-1}$ ;

$C'_s$  = concentração, em ppm;

A descarga sólida não medida ( $Q_{nm}$ ) corresponde à descarga de arrasto somada à descarga não-amostrada, conforme Equação 4.7.

$$Q_{nm} = q'_{nm} \cdot k \cdot L \quad (4.7)$$

Onde:

$Q_{nm}$  = descarga sólida não medida, em  $t d^{-1}$ ;

$q'_{nm}$  = descarga sólida não-medida aproximada por metro de largura, em  $t d^{-1} m^{-1}$ ;

$k$  = fator de correção, adimensional;

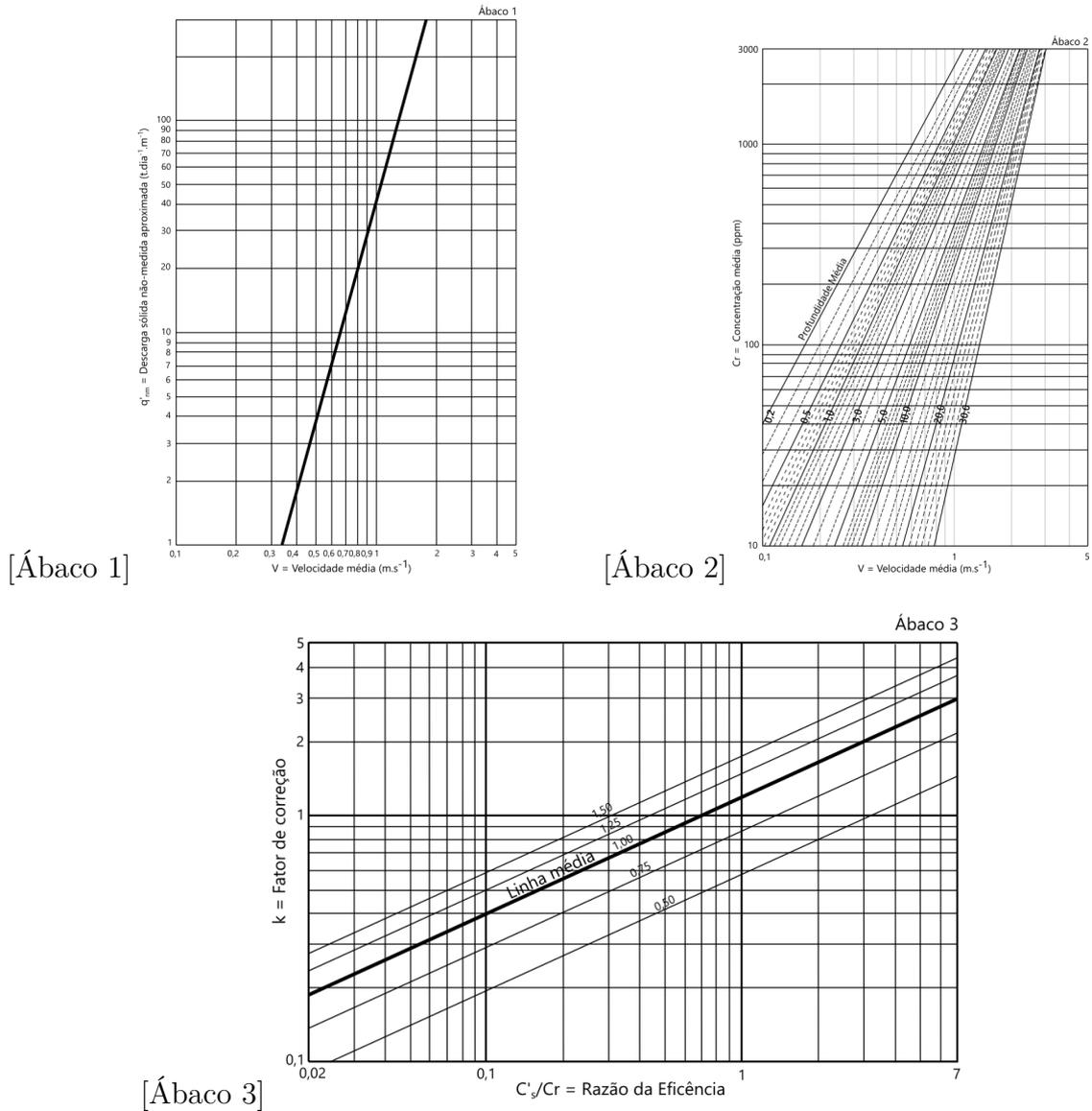
$L$  = largura do rio, em m;

Para realização de seus cálculos, o método simplificado de Colby utiliza 3 ábacos<sup>5</sup>, apresentados em versões reduzidas na Figura 20 (as versões ampliadas estão disponíveis nos anexos B, C e D). Por questões técnicas computacionais, optou-se por transformar esses ábacos em equações que serão apresentadas ao longo do texto.

O Ábaco 1 da Figura 28 do Anexo B é utilizado para obter  $q'_{nm}$  a partir da velocidade média do rio no momento da coleta da amostra. Este ábaco é uma referência antiga e durante esta pesquisa não foram encontrados os valores que o originou, somente um arquivo com sua imagem. Como não estava previsto que a ferramenta computacional tivesse recursos para fazer a leitura dos dados diretamente de uma imagem, foi utilizado o

<sup>5</sup> Gráficos que permitem resolução de problemas, substituindo cálculos numéricos por cálculos gráficos.

Figura 20 – Cálculos Hidrossedimentológicos - Ábacos



Fonte: (USBR, 1955; CARVALHO, 2008)

software *Engauge Digitizer* para extrair os dados diretamente do gráfico e assim obter a Equação 4.8 que o representa e será codificada na ferramenta.

$$\log q'_{nm} = 3,340 \cdot \log V + 1,617 \quad (4.8)$$

Onde:

$q'_{nm}$  = descarga sólida não-medida aproximada por metro de largura, em  $t d^{-1} m^{-1}$ ;

$V$  = velocidade média, em  $m s^{-1}$ ;

Depois de determinar o valor de  $q'_{nm}$ , é preciso determinar o fator de correção  $k$ . A princípio, para realizar este cálculo, é preciso extrair, a partir do Ábaco 2 (Figura 29)

do Anexo C, o valor da concentração relativa ( $C_r$ ), a partir da velocidade média e da profundidade média do rio. Em detrimento ao Ábaco 2, será utilizada a Equação 4.9, apresentada em Paiva (1988), para codificação na ferramenta computacional.

$$\log C_r = A \cdot \log V + B \quad (4.9)$$

Onde:

$C_r$  = Concentração relativa, em ppm = mg L<sup>-1</sup>;

A e B = Valores em função da profundidade definidos conforme Tabela 9 do Anexo A;

V = velocidade média, em m s<sup>-1</sup>;

A partir do valor de  $C_r$ , calcula-se a razão de eficiência ( $R_e$ ) que é o resultado da divisão  $C'_s/C_r$ . Depois, teoricamente, por meio do Ábaco 3 (Figura 30) do Anexo D, obtêm-se o fator de correção k. Na prática, utilizou-se novamente o software *Engauge Digitizer* para obter a Equação 4.10 para ser codificada na ferramenta computacional, a partir da linha média do Ábaco 3.

$$\log k = 0,4819 \cdot \log R_e + 0,0739 \quad (4.10)$$

Onde:

k = fator de correção [adimensional];

$R_e$  = razão da eficiência [adimensional];

Por fim, calcula-se a descarga sólida não medida ( $Q_{nm}$ ) por meio da Equação 4.7 e posteriormente a descarga sólida total pela Equação 4.5.

A ferramenta computacional deverá realizar esses cálculos automaticamente, a partir das informações de cada reservatório cadastrado em seu banco de dados, porém, ao mesmo tempo, deverá permitir que estas informações sejam fornecidas manualmente em seu simulador.

#### 4.2.5 Simulador de Dados Sedimentométricos

Conforme Carvalho (2008), a equação 4.11 será utilizada para cálculo preliminar anual de assoreamento em reservatórios:

$$S = \frac{D_{st} \cdot E_r}{\gamma_{ap}} = \frac{365 \cdot Q_{st} \cdot E_r}{\gamma_{ap}} \quad (4.11)$$

Onde:

$S$  = volume de sedimento retido no reservatório, em  $m^3$ /ano;

$D_{st}$  = deflúvio sólido total médio anual afluyente ao reservatório, em t/ano;

$E_r$  = eficiência de retenção do sedimento afluyente ao reservatório, adimensional;

$\gamma_{ap}$  = peso específico aparente médio dos depósitos, em t/dia;

$Q_{st}$  = descarga sólida total média afluyente ao reservatório, em t/dia;

Para calcular o tempo de assoreamento de um reservatório, utiliza-se a equação 4.12:

$$T = \frac{V_{res}}{S} \quad (4.12)$$

Onde:

$T$  = tempo de assoreamento de um determinado volume, em anos;

$V_{res}$  = volume do reservatório, total, volume morto ou outro, em  $m^3$ ;

$S$  = volume de sedimento retido no reservatório, em  $m^3$ /ano;

### 4.3 Calibração do SWAT

Até o início deste projeto, o SWAT foi utilizado para simulações envolvendo o reservatório da UHE Itumbiara, porém até então, a maior parte dos resultados obtidos não era satisfatória, pois se percebia que os cálculos de aporte de sedimentos estavam, na maioria das vezes, superestimados, o que era evidente pois a ferramenta ainda demandava calibração.

Para calibrar o SWAT e o promover efetivamente como uma ferramenta quantitativa de análise do aporte de sedimentos para UHE Itumbiara, foi utilizada a base de dados da ferramenta computacional construída neste trabalho que dispõe do histórico de vazões registrados e os valores de descarga sólida total, de 2012 a 2021, conforme Tabela 7 do Apêndice B. Metade da base foi utilizada para calibração, enquanto a outra metade para validação do modelo. A modelagem foi realizada com saídas de dados mensais, em detrimento das saídas diárias. Esse parâmetro foi definido para que o tempo de processamento não fosse muito prolongado, já que esse tipo de simulação, dependendo da configuração do hardware empregado no modelo, pode demorar semanas.

Após a aquisição e inserção dos dados de vazão e sedimentos medidos pelas estações de Furnas dentro do software SWAT, foi realizada a análise de sensibilidade do modelo, a qual segundo Neitsch *et al.* (2011) mede quais dos parâmetros possuem maior impacto sobre as simulações hidrossedimentológicas. Depois da análise de sensibilidade foi realizada a calibração e validação dos dados. Para avaliar a eficiência da calibração utiliza-se o Coeficiente de *Nash-Sutcliffe* (COE), podendo este variar de menos infinito até 1, sendo

que valores acima de 0,7 são consideradas aceitáveis enquanto 1 é o valor indicativo de simulação perfeita do evento simulado. O COE é calculado pela Equação 4.13:

$$COE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_i^{Obs} - Q_i^{Sim})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_i^{Obs} - Q)^2} \quad (4.13)$$

Onde:

$Q_i^{Obs}$  = vazão observada;

$Q_i^{Sim}$  = vazão simulada;

$Q$  = média da vazão observada;

$n$  = número de eventos;



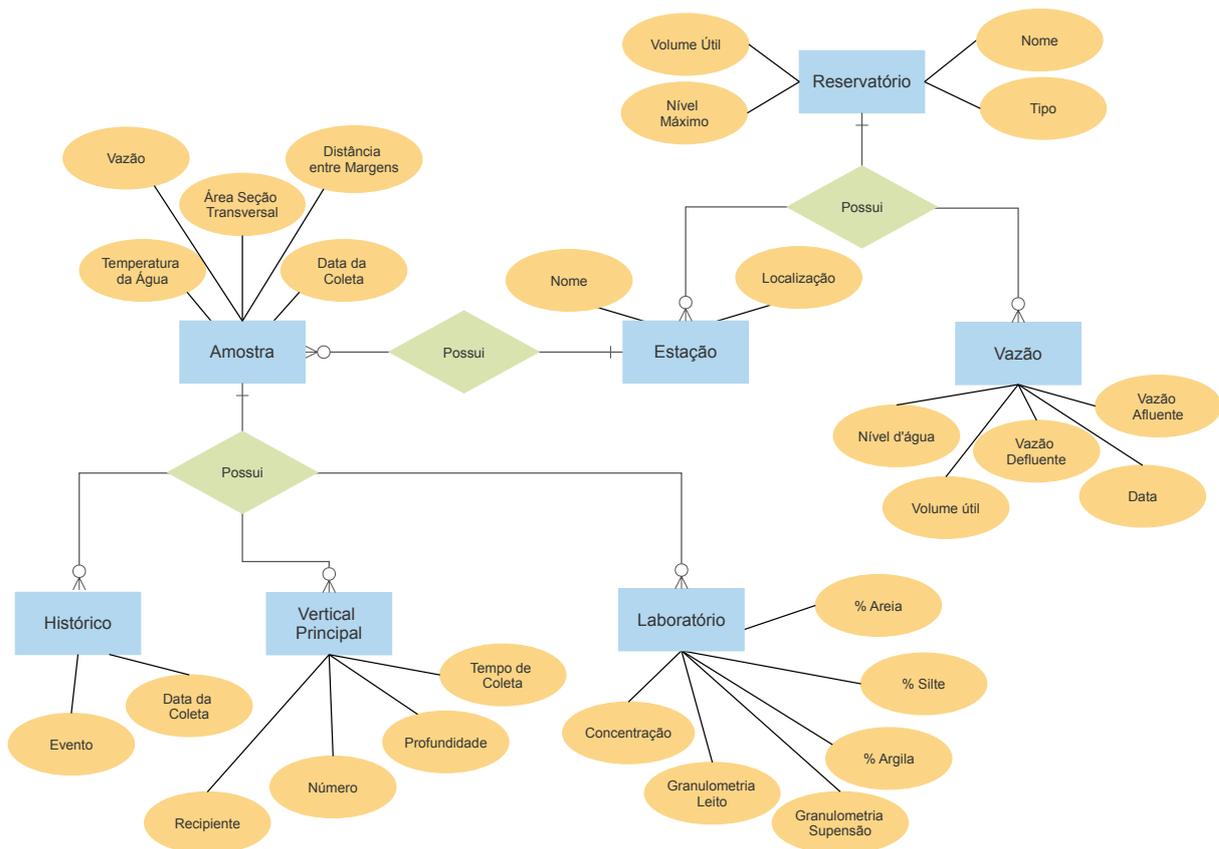
### 5.1.1 Identidade Visual

Para dar uma identidade visual ao SISED e destacá-lo em sua apresentação, foi criada uma logomarca, conforme (Figura 21), onde a inspiração foi o próprio símbolo da empresa Eletrobras, recriado a partir de uma nuvem de palavras, onde se destacam variáveis essenciais utilizadas em todo o processo de desenvolvimento da ferramenta computacional.

### 5.1.2 Banco de Dados

A estrutura de dados do SISED foi projetada para armazenar informações de reservatórios de todas as usinas hidrelétricas de Furnas, conforme Diagrama de Entidade Relacionamento (DER) (Figura 22). As principais entidades deste diagrama são *Reservatório*, *Estação*, *Amostra*, *Laboratório* e *Vazão*. Os dados da UHE Itumbiara foram utilizados como piloto para alimentar o banco de dados da ferramenta.

Figura 22 – Ferramenta Computacional SISED - Diagrama Entidade Relacionamento

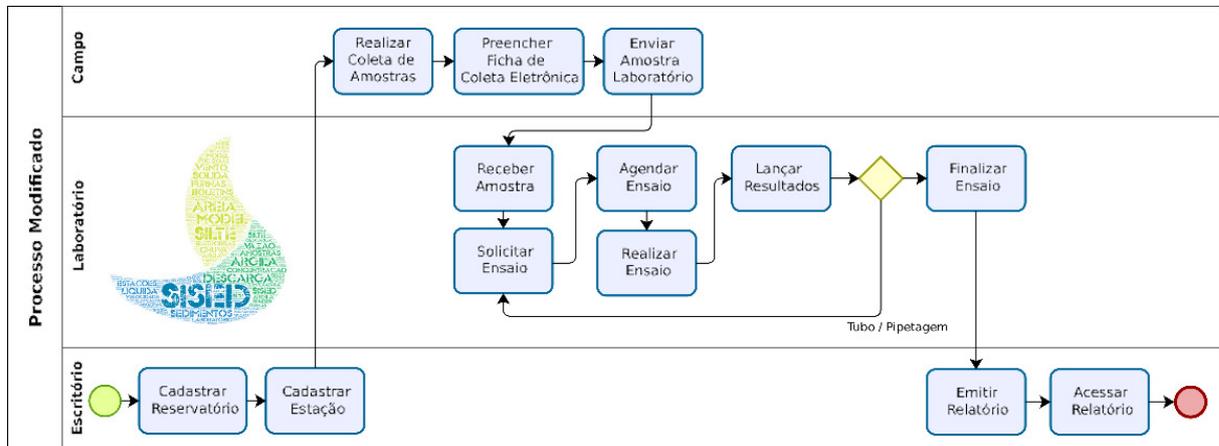


### 5.1.3 Processo de Hidrossedimentologia Novo

Foram necessários alguns ajustes na hidrossedimentologia de Furnas para que o SISED pudesse obter êxito em sua implantação. Neste novo cenário, as atividades foram incorporadas pela ferramenta computacional em um ambiente que integra todos os atores e dados do processo. Na prática, as atividades continuaram a ser realizadas como antes,

porém o diferencial foram as informações que passaram a ser registradas na nova ferramenta, ficando acessíveis a qualquer tempo. A Figura 23 mostra como ficou o processo com as adaptações realizadas.

Figura 23 – Hidrossedimentologia Furnas - Processo Modificado pelo SISED



- **Escritório - início**, a equipe de escritório passou a figurar no início do processo definindo quais reservatórios serão implantados no SISED. Como pode ser verificado no DER da Figura 22, a tabela que registra estas informações é a *Reservatório* e suas principais variáveis são: Nome do Reservatório, Tipo, Volume útil e Nível Máximo. Após efetuar esse primeiro registro, a equipe de escritório deve proceder ao cadastro das estações hidrossedimentométricas referentes àquele reservatório na tabela *Estação*. Basicamente, os campos dessa tabela são Nome e a Localização Geográfica da estação. A partir das informações registradas nestas duas tabelas do SISED, as equipes de campo já ficam aptas para iniciar suas rotinas de coleta de amostras.
- **Campo**, continuam realizando as coletas de amostras de acordo com estações cadastradas pela equipe de escritório, porém as informações, que antes eram registradas manualmente, passam a ser digitadas também nas fichas de coletas eletrônicas do SISED, conforme tabela *Amostra* do DER da Figura 22.
- **Laboratório**, toda a rotina desta etapa foi mantida, porém os resultados dos ensaios passaram a ser registrados também na tabela *Laboratório*, conforme DER da Figura 22, onde seus principais campos são Concentração, Granulometria de Leito e Suspensão, além da Porcentagem de Areia, Silte e Argila. Todos esses dados são utilizados para elaboração do relatório final.
- **Escritório - final**, Com a facilidade de ter todas as informações, desde a coleta até os ensaios de laboratórios, reunidos em um mesmo banco de dados e disponível pela mesma interface, os relatórios continuaram a ser emitidos conforme a metodologia

adotada por Carvalho (2008) para depois também serem lançados no SISED, encerrando todo o processo. Os cálculos da descarga sólida total passaram a ser realizados pela própria ferramenta computacional baseados apenas no Método Simplificado de Colby<sup>2</sup>, descartando o uso de outras ferramentas de terceiros.

#### 5.1.4 Simulador da Ferramenta Computacional

Para processamento de dados hidrossedimentológicos é preciso que algumas variáveis estejam lançadas ou calculadas no SISED<sup>3</sup>, conforme Figura 24:

Figura 24 – Ferramenta Computacional SISED - Simulador de Dados Sedimentométricos

SIMULADOR DE DADOS SEDIMENTOMÉTRICOS			
RESERVATÓRIO UHE ITUMBIARA			
Calcular		Voltar	
<b>DADOS DO RESERVATÓRIO</b>			
1. Volume do Reservatório (Vres)	2. Vazão Média Afluente Anual	3. Volume Médio Afluente Anual	4. Descarga Sólida Total Média Afluente (Qst)
12.455,21 hm <sup>3</sup>	1.007,51 m <sup>3</sup> /s	31.772,89 hm <sup>3</sup>	13.315,93 t/d
<b>DADOS DE GRANULOMETRIA</b>			
5. Argila (%)	5. Silte (%)	5. Areia (%)	
26,50	55,57	17,93	
<b>OUTROS PARÂMETROS</b>			
6. Eficiência de Retenção (%) - Curva de Brune	7. Peso Específico Aparente Inicial - (t/m <sup>3</sup> )	Peso Específico Aparente em T anos - (t/m <sup>3</sup> )	
0,95	1,01	0,00	
<b>SIMULAÇÃO</b>			
8. Volume de Sedimento Médio Retido (hm <sup>3</sup> /ano)	9. Tempo para Assoreamento (anos)		
4,57	2.724,14		

#### 1. Volume do reservatório

O Volume do reservatório ( $V_{res}$ ), item 1 da Figura 24, é considerado constante para o SISED e a ferramenta busca essa informação no banco de dados, de acordo com DER (Figura 22), tabela *Reservatório*, campo *Volume útil*, em  $\text{hm}^3$ . No caso específico da UHE Itumbiara, este é o valor do volume útil de projeto da usina que entrou em operação em 1980, lançado na ordem de  $12.455,21 \text{ hm}^3$ .

#### 2. Vazão Média Afluente Anual

Para determinar a Vazão Média Afluente Anual, item 2 da Figura 24, o SISED analisa em seu banco de dados todo o histórico de vazões registrados desde 2012 a 2021, conforme Tabela 7 do Apêndice B. Estes dados estão arquivados na tabela *Vazão*, campo *Vazão Afluente*, conforme DER (Figura 22). A partir desses valores, é possível calcular a vazão média afluente anual, em  $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$ , de todos os ciclos reunidos. Para a UHE Itumbiara, o valor calculado é de  $1.007,51 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ .

<sup>2</sup> O método simplificado de Colby foi implementado na ferramenta computacional em formato de função modular para facilitar sua manutenção e possibilitar que, futuramente, outras metodologias também possam integrar a ferramenta, possibilitando até mesmo a comparação de valores entre elas.

<sup>3</sup> Dados referentes ao reservatório específico da UHE Itumbiara

### 3. Volume Médio Afluente Anual

Para determinar Volume Médio Afluente Anual, item 3 da Figura 24, em  $\text{hm}^3$ , o SISED multiplica a variável Vazão Média Afluente Anual, em  $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ , por 31.536.000s. Então, o resultado é dividido por  $10^6$  para transformação de  $\text{m}^3$  em  $\text{hm}^3$ . No caso específico da UHE Itumbiara, o valor calculado de volume médio afluente anual é de 31.772,89  $\text{hm}^3$ .

### 4. Descarga Sólida Total Média Afluente

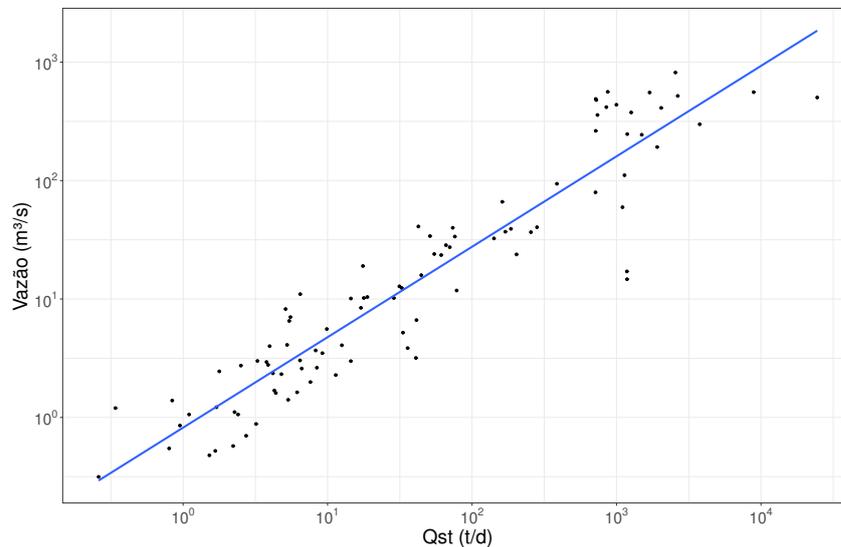
Para determinar a Descarga Sólida Total Média Afluente ( $Q_{st}$ ), item 4 da Figura 24, em  $\text{t d}^{-1}$ , foi necessário traçar a curva-chave de Sedimentos que envolve  $Q_{st}$  x Vazão do reservatório, a partir de dados das amostras e de laboratório registradas no banco de dados do SISED. Para a primeira simulação, foram processadas todas as 158 amostras das estações hidrossedimentométricas da UHE Itumbiara, coletadas e ensaiadas entre 2012 e 2022, conforme Tabela 6 do Apêndice A. O próprio SISED permite a exportação destes dados para que o programa RStudio possa projetar a curva-chave de sedimentos, uma vez que a ferramenta computacional não possui esta funcionalidade nativa.

No caso específico da UHE Itumbiara, para a geração do gráfico da curva-chave de sedimentos, algumas análises foram realizadas nas 158 amostras disponíveis no banco de dados, sendo necessárias algumas eliminações:

- **$Q \leq 0 \text{ m}^3 \text{s}^{-1}$  ou  $Q_{st} \leq 0 \text{ t/d}$** , 13 amostras nestas condições foram removidas do modelo por apresentarem valores de vazão ou descarga sólida menores ou iguais a zero. Isso se deve ao fato de que algumas coletas foram feitas em momentos quando o rio havia formado uma área de remanso nos arredores da estação e o seu fluxo ficou invertido com velocidades negativas. Esse tipo de situação inviabiliza os cálculos de descarga sólida.
- **$Q \geq 100 \text{ m}^3 \text{s}^{-1}$  e  $Q_{st} \leq 600 \text{ t/d}$** , 45 amostras nestas condições foram removidas do modelo por apresentarem altos valores de vazão e, ao mesmo tempo, valores de descarga sólida muito baixos. Possivelmente, ocorreram falhas na coleta das amostras ou durante a realização de ensaios de laboratório, dada a grande sensibilidade dos dois processos.
- **$Q \geq 600 \text{ m}^3 \text{s}^{-1}$  e  $Q_{st} \leq 1500 \text{ t/d}$** , 5 amostras nestas condições foram removidas do modelo pelos mesmos motivos do item anterior.
- **$Q \leq 100 \text{ m}^3 \text{s}^{-1}$  e  $Q_{st} \geq 10000 \text{ t/d}$** , 1 amostra nesta condição foi removida do modelo por ter apresentado uma vazão pequena, porém uma descarga sólida muito alta. Provavelmente, a coleta da amostra deve ter sido realizada em um momento de perturbação excepcional do rio a montante da estação.

Após os ajustes necessários, 94 resultados foram considerados aptos para geração da curva chave de sedimentos, conforme figura 25, gerada em escala logarítmica, onde  $Q_{st}$  está em  $m^3 s^{-1}$ , e  $Q_{st}$  em  $t d^{-1}$ .

Figura 25 – UHE Itumbiara - Curva-chave Sedimentos - Estações Sedimentométricas



Com os mesmos dados utilizados para gerar a Curva-chave de Sedimentos foi possível, através da composição dos comandos *lm* e *summary* no ambiente do software RStudio (Figura 26), aproximar-se da equação 5.1<sup>4</sup>, em uma percepção que a curva-chave  $Q_{st}$  x Vazão da UHE Itumbiara se aproxima de uma regressão logarítmica. O que reforça essa ideia, é o R-quadrado dessa regressão ser de 0,8464, considerado como satisfatório. É importante salientar que esta equação é dinâmica e deve ser ajustada a cada nova amostra que é ensaiada em laboratório.

Figura 26 – Cálculos para Geração da Equação da Curva-chave

```
> summary(modelo)

Call:
lm(formula = log(Qst) ~ log(Vazão), data = bd)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-1.9719 -0.6467 -0.1839  0.5677  4.4197

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  0.68567    0.17309   3.961 0.000149 ***
log(Vazão)   1.13779    0.05075  22.419 < 2e-16 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 1.046 on 90 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.8481,    Adjusted R-squared:  0.8464
F-statistic: 502.6 on 1 and 90 DF,  p-value: < 2.2e-16
```

<sup>4</sup> A representação da função ln se dá através da função log no ambiente do RStudio.

$$\ln(Q_{st}) = 0,68567 + 1,13779 \cdot \ln(Vazao) \quad (5.1)$$

Aplicando a equação 5.1 na Tabela 7 do Apêndice B na coluna Vazão, é possível calcular  $Q_{st}$ , em  $t d^{-1}$ . Para a UHE Itumbiara, o valor calculado de descarga sólida total média afluyente está, por enquanto, na ordem de 13.315,93  $t d^{-1}$ .

#### 5. Argila, Silte e Areia

Os percentuais de argila, silte e areia, item 5 da Figura 24, foram determinados, em %, calculando as médias da granulometria de todas as amostras utilizadas na modelagem da UHE Itumbiara registradas no banco de dados, de acordo com DER (Figura 22), tabela *Laboratório*, campos *Areia*, *Silte* e *Argila*. No caso específico da UHE Itumbiara, os valores calculados para percentual de Argila, Silte e Areia são de 26,50%, 55,57% e 17,93%, respectivamente, ou seja, percebe-se uma predominância de material médio em relação a materiais grossos e finos para as amostras analisadas.

#### 6. Eficiência de Retenção

Os cálculos dessa grandeza estão diretamente relacionados com a granulometria média dos sedimentos e o tamanho do reservatório. Como a UHE Itumbiara possui a maior parte de sedimentos médios e um volume útil de 12.455  $hm^3$ , ela está enquadrada na categoria de grande reservatório, portanto a metodologia de Brune foi adotada. O valor encontrado de eficiência de retenção para UHE Itumbiara foi da ordem de 0,95%.

#### 7. Peso Específico Aparente Inicial

Pelas características dos reservatórios do sistema Furnas, no que se refere a operação do reservatório, adotou-se a opção 1 da Tabela 3 para realizar este cálculo. Assim, com auxílio da granulometria dos sedimentos, chegou-se, para UHE Itumbiara, um valor de 1,01  $t d^{-1}$ .

#### 8. Volume de Sedimento Médio Retido

A partir do processamento das variáveis citadas anteriormente, o SISED estimou o Volume de Sedimento Médio Retido em  $hm^3$ /ano para o reservatório da UHE Itumbiara por meio da Equação 4.11. No caso da UHE Itumbiara, considerando  $Q_{st}=13.315,93 t d^{-1}$ , o volume de sedimento médio retido é estimado em, aproximadamente, 4,57  $hm^3$ /ano, conforme Item 8 da Figura 24.

#### 9. Tempo para Assoreamento

O tempo para assoreamento do reservatório é calculado em anos, a partir da equação 4.12. No caso da UHE Itumbiara, este valor está em torno de 2.724 anos, conforme Item 9 da Figura 24.

Ao analisar estes números, é preciso reiterar a erosão como um fenômeno dinâmico, estando sujeito à mudanças devido à diversos fatores, sendo a ação humana o que mais exerce influência neste processo. Os valores utilizados neste processamento fazem parte de uma série histórica, portanto engloba dados passados e qualquer alteração na intensidade do uso do solo, pode elevar a produção de sedimentos. Além disso, a posição geográfica de muitas estações de monitoramento, a montante do barramento, não capta o volume de sedimentos que é produzida nas bordas do reservatório. Tudo isso, associado as incertezas naturais da metodologia, embutem imprecisões que precisam ser consideradas, mesmo assim esses números são um grande indicador do comportamento do reservatório.

## 5.2 SISED - Resultados da UHE Itumbiara Comparados com Outros Reservatórios

Os resultados obtidos com as simulações do SISED para UHE Itumbiara são comparados com resultados de mais dois cenários: UHE Itaipu e UHE LCB Carvalho, conforme Tabela 4.

Tabela 4 – Simulação SISED para UHE Itumbiara em Comparação a Outros Reservatórios

	<b>UHE Itumbiara</b>	<b>UHE Itaipu</b>	<b>UHE LCB Carvalho</b>
Volume Útil do Reservatório [hm <sup>3</sup> ]	12.455	29.000	178
Vazão Média Afluente Anual [m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ]	1.007	9.945	657
Volume Médio Afluente Anual [hm <sup>3</sup> ]	31.772	313.625	20.731
Descarga Sólida Total Média Afluente [t d <sup>-1</sup> ]	13.315	72.644	8.186
Argila [%]	26,50	40,00	26,50
Silte [%]	55,57	50,00	55,57
Areia [%]	17,93	10,00	17,93
Eficiência de Retenção [%]	95	86	41
Peso Específico Aparente Inicial [t m <sup>-3</sup> ]	1,010	1,010	0,990
Volume de Sedimento Médio Retido [hm <sup>3</sup> /ano]	4,57	22,76	1,25
Tempo para Assoreamento [anos]	2.724	1.260	142

Fonte: SISED; Adaptado de Carvalho (2008)

O reservatório da Usina de Itumbiara possui um grande reservatório, com volume útil de 12.455 hm<sup>3</sup> e vazão média afluente anual de 1.007 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>. A sua descarga sólida total média afluente, baseada em sua curva-chave de sedimentos, é da ordem de 13.315 t d<sup>-1</sup>. Com esses valores, associado a granulometria dos sedimentos, a simulação do SISED para volume de sedimento médio retido é de 4,57 hm<sup>3</sup>/ano e tempo estimado de vida útil de 2.724 anos. Por sua vez, a UHE Itaipu possui um reservatório com volume útil de 29.000hm<sup>3</sup>, ou seja, mais que o dobro de Itumbiara, e vazão média afluente anual é 9.945 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>, ou seja, quase 10 vezes maior que a de Itumbiara, e isso, conseqüentemente,

implica em uma descarga sólida total média e volume de sedimento retido bem superiores, 72.644 t d<sup>-1</sup> e 22,76 hm<sup>3</sup>/ano, respectivamente. Desta forma, mesmo com um reservatório maior, Itaipu possui um tempo de assoreamento menor, 1.260 anos aproximadamente. Por fim, chama a atenção que a UHE LCB Carvalho, uma usina a fio d'água, com um pequeno reservatório de apenas 178hm<sup>3</sup> e vazão média afluyente anual de 657 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>, tem descarga sólida total média afluyente (baseada em sua curva-chave de sedimentos de Itumbiara) de 8.186 t d<sup>-1</sup>. O processamento desses valores produz resultados de volume de sedimentos médio retido de 1,25 hm<sup>3</sup>/ano e tempo de assoreamento 142 anos, o que, em teoria, demandaria ainda mais cuidados com esse empreendimento. Ressalta-se, mais uma vez, o resultado como qualitativo, uma vez que a curva chave de sedimentos foi adotada de outro empreendimento.

### 5.3 SISED - Resultados da UHE Itumbiara Simulados em Diferentes Cenários

O SISED foi parametrizado para testar diferentes cenários para UHE Itumbiara. Conforme 4.1.3, os cenários propostos foram: Cenários seco, Cenário úmido, Cenário ano mais seco e Cenário ano mais úmido. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Simulação SISED para Diferentes Cenários na UHE Itumbiara

	<b>Cenário Normal</b>	<b>Período Seco</b>	<b>Período Úmido</b>	<b>Ano mais Seco</b>	<b>Ano mais Úmido</b>
Vazão Média Afluyente Anual [m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ]	1.007	872	1.143	711	1.389
		15,4% ↓	13,5% ↑	41,6% ↓	37,9% ↑
Volume Médio Afluyente Anual [hm <sup>3</sup> ]	31.772	27.500	36.045	22.436	43.815
		15,5% ↓	13,4% ↑	41,6% ↓	37,9% ↑
Descarga Sólida Total Média Afluyente [t d <sup>-1</sup> ]	13.315	11.285	15.389	12.501	26.966
		17,9% ↓	15,5% ↑	6,5% ↓	102,5% ↑
Volume de Sedimento Médio Retido [hm <sup>3</sup> /ano]	4,57	3,89	5,26	4,33	9,16
		17,4% ↓	15,0% ↑	5,5% ↓	100,0% ↑
Tempo para Assoreamento [anos]	2.724	3.201	2.366	2.876	1.360
		17,5% ↑	15,1% ↓	5,5% ↑	100,2% ↓

Fonte: SISED

Analisando a Tabela 5, é possível fazer as seguintes considerações:

Para o cenário "período seco", onde apenas os meses mais secos são simulados, percebeu-se que as variáveis vazão média afluyente anual, volume médio afluyente anual, descarga sólida total e volume de sedimento médio retido diminuíram, 15,4%, 15,5%, 17,9% e 17,4% respectivamente. Por sua vez, neste cenário, o tempo para assoreamento aumentaria 17,5%.

Para o cenário "período úmido", onde apenas os meses mais úmidos são simulados, percebeu-se que as variáveis vazão média afluyente anual, volume médio afluyente anual, descarga sólida total e volume de sedimento médio retido aumentaram, 13,5%, 13,4%, 15,5% e 15,0% respectivamente. Por sua vez, neste cenário, o tempo para assoareamento diminuiria 15,1%.

Para o cenário "Ano mais seco", onde o ano de 2017 foi replicado para toda série histórica, percebeu-se que as variáveis vazão média afluyente anual, volume médio afluyente anual, descarga sólida total e volume de sedimento médio retido diminuíram, 41,6%, 41,6%, 6,5% e 5,5% respectivamente. Por sua vez, neste cenário, o tempo para assoareamento aumentaria 5,5%.

Por fim, o cenário "Ano mais úmido", onde o ano de 2012 foi replicado para toda série histórica, percebeu-se que as variáveis vazão média afluyente anual, volume médio afluyente anual, descarga sólida total e volume de sedimento médio retido aumentaram, 37,9%, 37,9%, 102,5% e 100% respectivamente. Por sua vez, neste cenário, o tempo para assoareamento diminuiria 100,2%.

Em função destes resultados, fica evidente a preocupação com as mudanças climáticas locais que sinalizam para ocorrência de eventos extremos, como secas prolongadas ou uma maior concentração de chuvas em determinados períodos, por exemplo.

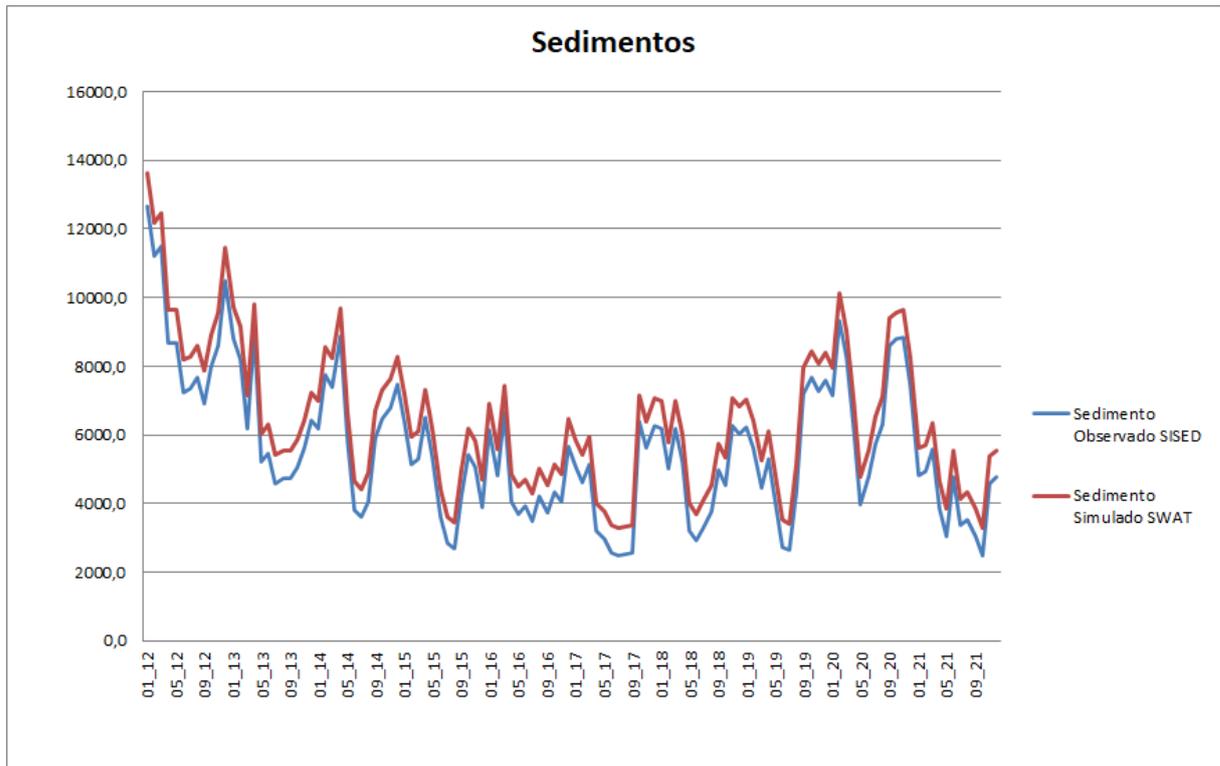
#### **5.4 SISED - Resultados da UHE Itumbiara para Calibrar o SWAT**

A calibração do SWAT utilizando os resultados do SISED, embora não fosse o foco principal desta pesquisa, foi providencial para que esse modelo pudesse estar habilitado a colaborar com as simulações da dinâmica do reservatório de Itumbiara, além de servir como um cenário de comparação de resultados. O SISED, por sua vez, cumpriu com o papel de preenchimento adequado da série histórica de entrada do modelo.

Ao final da calibração, o que se percebeu é que o SWAT apresentou uma tendência de superestimativa dos dados de sedimentos, porém ainda sim, é possível constatar uma grande proximidade entre os dados observados do SISED e os dados simulados pelo SWAT, como pode ser analisado no gráfico da Figura 27.

Como o coeficiente de *Nash-Sutcliffe* (COE) desta simulação foi de 0,789, pode-se considerar os resultados como satisfatórios, o que comprova que os parâmetros foram devidamente ajustados para o SWAT, pois de acordo com Marchioro (2008), 'um COE acima de 0,7 demonstra que a calibração foi satisfatória, comprovando sua grande flexibilidade e robustez, mesmo para modelagem da bacia tão peculiar com a do rio Paranaíba.

Figura 27 – Modelo SWAT calibrado com dados SISED



## 6 CONCLUSÃO

Para o manejo eficiente de reservatórios de UHEs e o prolongamento da vida útil dos empreendimentos são necessários esforços em várias frentes. Uma delas é o controle do aporte de sedimentos, entretanto, essa não é uma tarefa simples, já que envolve escassez de dados, enquanto as técnicas e metodologias são sensíveis de se associar.

No Brasil, a maioria dos grandes reservatórios são muito novos e ainda não começaram a sofrer problemas significativos relacionados ao aporte de sedimentos, sendo que essa adversidade produz efeitos mais impactantes em reservatórios de menor porte. Entretanto, com o passar dos anos, grandes reservatórios também podem vir a sofrer as influências destes depósitos em suas operações, exigindo, desde já, uma maior atenção quanto ao monitoramento dos seus parâmetros hidrossedimentológicos.

Assim, ferramentas computacionais, como o SISED, podem auxiliar os gestores na avaliação das alterações das características físicas dos reservatórios, aumentando o embasamento para tomada de decisões. Além disso, ela também poderá ajudar na escolha das melhores medidas para prevenção ou minimização de parte dos problemas causados pelos sedimentos nos reservatórios. No caso específico do reservatório da UHE Itumbiara, foi possível observar pelos resultados da ferramenta que o aporte de sedimentos, monitorados a montante do reservatório, ainda não provocou alterações significativas no volume do reservatório e no seu tempo de vida útil. Isso ocorre em função de:

- grande volume útil do reservatório e, proporcionalmente, pequena vazão média afluente anual que está diretamente relacionada com a descarga sólida total média afluente.

- a localização da UHE Itumbiara está a jusante de outros reservatórios nos principais tributários do rio Paranaíba. Neste caso, os reservatórios de Corumbá I, no rio Corumbá, Miranda e Nova Ponte, ambas no rio Araguaí, além de Emborcação, no próprio rio Paranaíba. É sabido que uma usina a montante funciona como uma espécie de filtro de sedimentos para as usinas da cascata, causando uma expressiva redução da velocidade do fluxo de água que está diretamente relacionada com a energia que move as partículas ao longo do curso d'água. Isso foi experimentalmente observado durante o desenvolvimento deste projeto, quando mesmo em épocas de muita chuva na região, o laboratório de Furnas, que realiza os ensaios de sedimentos, recebeu amostras de água, praticamente, límpida proveniente de estações hidrossedimentológicas do rio Paranaíba.

- a UHE Itumbiara se encontra em uma região de topografia muito plana o que diminui os impactos do assoreamento. Outros reservatórios nem sempre estão em condições tão favoráveis como esta.

É preciso reiterar a erosão como um fenômeno dinâmico, estando sujeito a mudanças

devido à diversos fatores, sendo a ação humana o que mais exerce influência neste processo. Os valores apresentados nesta pesquisa foram gerados a partir de processamento de dados passados e qualquer alteração na intensidade no uso do solo no futuro, pode elevar a produção de sedimentos.

Outra variável que merece consideração é o volume de chuvas na área da bacia hidrográfica, pois é fator que causa alteração da dinâmica de vazões afluentes e isso, por sua vez, reflete consideravelmente no volume de sedimentos médio retidos e no tempo de vida do empreendimento. Chama muita atenção a simulação do SISED para no cenário "Ano mais úmido", onde os resultados seriam completamente diferentes daqueles alcançados com dados reais.

Também, vale ressaltar que as amostras trabalhadas neste projeto estão compreendidas em um período entre 2012 e 2022. O ideal seria a ampliação dessa série histórica de dados, assim seria possível obter uma análise ainda mais próxima da realidade do empreendimento. Infelizmente, o monitoramento dos nossos rios é um ônus apenas das empresas concessionárias de energia, porém o recurso natural é explorado por vários agentes da sociedade. Seria mais adequado que houvesse uma maior distribuição da responsabilidade pelo monitoramento dos sedimentos, possibilitando, melhorar a qualidade dos bancos de informações para cada empreendimento.

Verificou-se que o SISED apresentou valores de tempo de vida útil para UHE Itumbiara condizentes aos resultados exibidos pelo relatório de batimetria IT-CAV-RT-R02 (SÁ, 2021), realizado em 2018, no reservatório da usina. Este relatório, em especial, teve bastante relevância para este projeto, pois foi um parâmetro para demonstrar a coerência dos dados que foram calculados pela ferramenta computacional. Cabe ressaltar que ambos métodos, a se manter o índice de perda de volume do reservatório observado nos primeiros 38 anos de operação da usina, apresentaram tempo de assoreamento total do reservatório avaliado em mais de 1000 anos (SISED: 2724 anos; Batimetria: 1833 anos), o que, segundo Carvalho *et al.* (2000a), é normal e demonstra uma grande virtude desse tipo de empreendimento. Vale ressaltar que apenas um relatório de batimetria foi emitido, o que agrega imprecisão a respeito dessa estimativa. Enfim, o que deve ser considerado é que os dois métodos, por enquanto, apontam para pouca alteração de volume do reservatório.

Não obstante, resultados da simulação do SISED para UHE Itumbiara foram utilizados para calibrar o modelo SWAT trazendo resultados bastante satisfatórios, onde o coeficiente de *Nash-Sutcliffe*' (COE) desta simulação foi de 0,789, comprovando que o modelo é bastante coerente com as outras metodologias utilizadas para monitorar o assoreamento do reservatório da usina. Essa comprovação, inclusive, abre possibilidades para simulação de diferentes cenários para a bacia do rio Paranaíba em estudos futuros, a baixíssimos custos. Cabe destacar que estudos para o aperfeiçoamento e refinamento de modelagem computacional através do software SWAT para UHE Itumbiara continuam

em andamento no projeto de P&D+I “Modelagem em Diversas Escalas da Geração de Sedimentos em Erosões e o Aporte em Reservatórios de UHEs” - PD.0394-1705/2017.

Por fim, é fato que um melhor monitoramento das bacias hidrográficas proporciona um maior conhecimento sobre as dinâmicas dos reservatórios, logo é possível gerir de forma mais adequada sob o aspecto ambiental, garantindo assim mais segurança energética para o país, visto que está é a principal bateria do sistema de geração no Brasil.

Como recomendações para trabalhos futuros que possam complementar esse estudo, sugere-se:

- Continuar com cronograma de levantamentos batimétricos e hidrossedimentológicos no Reservatório da UHE Itumbiara para acompanhamento destes parâmetros e análise das consequências na operação do reservatório;
- Ajustar a calibração do SWAT para que ele possa fazer o monitoramento do reservatório de forma mais aproximada, rapidamente e economicamente;
- Utilizar a estrutura do SISED para os demais reservatórios da empresa Eletrobras Furnas, prioritariamente, para as usinas com reservatórios de menores volumes úteis.

## REFERÊNCIAS

- ABRACE. **Estimativa de Encargos de Serviço do Sistema - Março 2022**. 2022. Acessado em: 08/06/2022. Disponível em: <https://abrace.org.br/noticia/estimativa-de-encargos-de-servico-do-sistema-marco-2022/>.
- ANA. **Catálogo de Metadados - Cota x Área x Volume dos Reservatórios de Usinas Hidrelétricas**. 2022. Acessado em: 08/06/2022. Disponível em: <http://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/por/catalog.search#/home>.
- ANA/ANEEL. **Resolução Conjunta ANA/ANEEL nº 3/2010**. Brasília, DF, 2010. Disponível em: [http://arquivos.ana.gov.br/infohidrologicas/cadastro/ResolucaoConjunta\\_n\\_003-2010.pdf](http://arquivos.ana.gov.br/infohidrologicas/cadastro/ResolucaoConjunta_n_003-2010.pdf).
- ANEEL. **Infográfico sobre Hidrelétricas no Brasil**. 2021. Acessado em: 09/06/2022. Disponível em: [https://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao-2/-/asset\\_publisher/zXQREz8EVIZ6/content/no-dia-mundial-da-agua-aneel-publica-infografico-sobre-hidreletricas-no-brasil/656877](https://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao-2/-/asset_publisher/zXQREz8EVIZ6/content/no-dia-mundial-da-agua-aneel-publica-infografico-sobre-hidreletricas-no-brasil/656877).
- ANEEL. **Site Institucional**. 2022. Acessado em: 21/01/2022. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/a-aneel>.
- ANJINHO, P. da S.; BARBOSA, M. A. G. A.; COSTA, C. W.; MAUAD, F. F. Environmental fragility analysis in reservoir drainage basin land use planning: A brazilian basin case study. **Land Use Policy**, v. 100, p. 104946, 2021. ISSN 0264-8377. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264837718317915>.
- ASF. **Apache Software Foundation**. 2022. Acessado em: 09/06/2022. Disponível em: <http://apache.org>.
- BARBOSA, K. P. **Educação Ambiental como Parte da Solução para Mitigar Processos Erosivos em Margem de Reservatórios de Hidrelétricas**. 2022. 111 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção - MEPROS) — PUC GO - Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Goiânia, 2022.
- 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: . [S.l.: s.n.]*: Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH), 2014. p. 1–13. ISBN 2359-2141.
- BESKOW, S.; MELLO, C.; NORTON, L.; CURI, N.; VIOLA, M.; AVANZI, J. Soil erosion prediction in the grande river basin, brazil using distributed modeling. **CATENA**, v. 79, n. 1, p. 49–59, 2009. ISSN 0341-8162. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0341816209001088>.
- BINACIONAL, I. **Itaipu Binacional**. 2022. Acessado em: 28/08/2022. Disponível em: <https://www.itaipu.gov.br/>.
- BISPO, D. F. A.; BATISTA, P. V. G.; GUIMARÃES, D. V.; SILVA, M. L. N.; CURI, N.; QUINTON, J. N. Monitoring land use impacts on sediment production: a case study of

the pilot catchment from the Brazilian program of payment for environmental services. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, sciELO, v. 44, 2020. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-06832020000100517&lang=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832020000100517&lang=pt).

BRANDI, P. **Memória da Eletricidade - Furnas Centrais Elétricas Completa 64 Anos**. 2021. Acessado em: 09/06/2022. Disponível em: <http://memoriadaeletricidade.com.br/artigos/40211/furnas-centrais-eletricas-completa-64-anos>.

BRUNE, G. M. Trap efficiency of reservoirs. **Eos, Transactions American Geophysical Union**, v. 34, n. 3, p. 407–418, 1953. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/TR034i003p00407>.

BUONO, W. B. M. **Modelagem Hidrossedimentológica de Diferentes Cenários de Cobertura do Solo na UHE Itumbiara**. 2021. 65 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção - MEPROS) — PUC GO - Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Goiânia, 2021.

CARVALHO, G. A.; SOUZA, A. P. de; ALMEIDA, F. T. de; MORGANULIANA, E.; ZOLIN, C. A.; NOGUEIRA, H.; WINTER, M. H.; SANTOS, R. de Jesus dos; LIMA, F. do A.; KRAESKI, A.; ALVES, M. A. B.; BORELLA, D. R.; SIMIONI, C. F.; SIMÕES, J. M.; SIRQUEIRA, E. S. Instalação e calibração de turbidímetro em bacia hidrográfica piloto. *In: . [S.l.: s.n.]: Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH), 2020. p. 1–8. ISBN 2359-2141.*

CARVALHO, N. de O. **Hidrossedimentologia Prática**. 2. ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2008.

CARVALHO, N. de O. Uma visão sobre medições (diretas e indiretas) da carga de sedimentos fluviais. *In: . São Carlos: Departamento de Hidráulica e Estatística (EESC-USP), 2017. Disponível em: <http://www.shs.eesc.usp.br/ii-congresso-internacional-de-hidrossedimentologia/>.*

CARVALHO, N. de O.; JÚNIOR, N. P. F.; SANTOS, P. M. C. dos; LIMA, J. E. F. W. **Guia de Avaliação de Assoreamento de Reservatórios**. 1. ed. Brasília: ANEEL, 2000.

CARVALHO, N. de O.; JÚNIOR, N. P. F.; SANTOS, P. M. C. dos; LIMA, J. E. F. W. **Guia de Práticas Sedimentométricas**: Aneel, superintendência de estudos e informações hidrológicas. Brasília-DF, 2000. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/monitoramento-e-eventos-criticos/monitoramento-hidrologico/orientacoes-manuais/entidades/guia-praticas-sedimentometricas-aneel-2000.pdf/view>. Acesso em: 10/06/2022.

CARVALHO, N. de O.; MENDES, A. B. Proteção e controle de sedimentos em reservatórios de barragens devido ao assoreamento. *In: . Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH), 2018. Disponível em: <https://www.abrh.org.br/xiienes>.*

CHAMOUN, S.; CESARE, G. D.; SCHLEISS, A. J. Managing reservoir sedimentation by venting turbidity currents: A review. **International Journal of Sediment Research**, v. 31, n. 3, p. 195–204, 2016. ISSN 1001-6279. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1001627916300385>.

CHEETRI, R.; BOWONDER, B. Siltation in nizamsagar reservoir: environmental management issues. **Applied Geography**, v. 3, n. 3, p. 193–204, 1983. ISSN 0143-6228. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0143622883900267>.

COLBY, B. Relationship of unmeasured sediment discharge to mean velocity. **Eos, Transactions American Geophysical Union**, v. 38, n. 5, p. 708–717, 1957. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/TR038i005p00708>.

COSTA, L. F. da. **Análise de Sensibilidade dos Parâmetros Utilizados na Determinação de Taxas de Assoreamento de Reservatórios**. 2012. 136 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — COPPE UFRJ - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

CRAN. **The Comprehensive R Archive Network**. 2022. Acessado em: 09/06/2022. Disponível em: <https://cran.r-project.org/>.

CRUZ, P. T.; MATERÓN, B.; FREITAS, M. **Barragens de Enrocamento Com Face de Concreto**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2014.

DARAMOLA, J.; EKHWAN, T.; MOKHTAR, J.; LAM, K.; ADEOGUN, G. Estimating sediment yield at kaduna watershed, nigeria using soil and water assessment tool (swat) model. **Heliyon**, v. 5, n. 7, p. e02106, 2019. ISSN 2405-8440. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844019357664>.

DELTARES. **Delft3D - 4 - Open Source Community**. 2022. Acessado em: 09/06/2022. Disponível em: <http://oss.deltares.nl/web/delft3d>.

ECLIPSE. **Eclipse Foundation**. 2022. Acessado em: 09/06/2022. Disponível em: <http://eclipse.org>.

ELETOBRAS. **Crítérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas**: Manuais para estudos e projetos de geração de energia. Brasília-DF, 2003. Disponível em: <https://eletrobras.com/pt/Paginas/Manuais-e-Diretrizes-para-Estudios-e-Projetos.aspx>. Acesso em: 09/06/2022.

ENERGIA, J. **Jirau Energia - Usina de Jirau**. 2022. Acessado em: 02/11/2022. Disponível em: <https://www.jirauenergia.com.br/conheca-a-uhe/>.

ENERGIA, N. **Norte Energia - Usina Hidrelétrica de Belo Monte**. 2022. Acessado em: 02/11/2022. Disponível em: <https://www.norteenergiasa.com.br/pt-br/uhe-belo-monte/a-usina>.

ENERGIA, S. A. **Santo Antônio Energia - Usina de Santo Antônio**. 2022. Acessado em: 02/11/2022. Disponível em: <https://www.santoantonioenergia.com.br/>.

EPE. **Dados Abertos - Dados do Anuário Estatístico de Energia Elétrica**. 2022. Acessado em: 08/06/2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/dados-abertos/dados-do-anuario-estatistico-de-energia-eletrica>.

ESTIGONI, M. V.; MATOS, A. J. S.; PIOLTINE, V.; ALBERTIN, L. L.; MAUAD, F. F. Comparação de diferentes batimetrias do reservatório da usina hidroelétrica do lobo. *In: . [S.l.: s.n.]*: Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH), 2009. p. 1–12.

ESTIGONI, M. V.; SANCHEZ, N. P. R.; MIRANDA, R. B. D.; KUWAJIMA, J. I.; MAUAD, F. F. Comparison of methods to assess reservoir volume and sedimentation based on bathymetric surveys. *In: . [S.l.: s.n.]: International Association for Hydro-Environment Engineering and Research (IAHR), 2014. p. 1–11. ISBN 978-989-96479-2-3.*

FSF. **Free Software Foundation**. 2022. Acessado em: 09/06/2022. Disponível em: <http://fsf.org>.

FURNAS. **IT.QA.001 - Sedimentologia - Análise Sedimetométrica**: Instrução de trabalho, norma interna da empresa. Aparecida de Goiânia-GO, 2022. Acesso em: 10/06/2022.

FURNAS. **Site Institucional**. 2022. Acessado em: 09/06/2022. Disponível em: <https://www.furnas.com.br/Index?culture=pt>.

FURNAS. **Usina de Itumbiara**. 2022. Acessado em: 09/06/2022. Disponível em: <https://www.furnas.com.br/subsecao/121/usina-de-itumbiara---2082-mw>.

FURNAS. **Usina de Luiz Carlos Barreto de Carvalho**. 2022. Acessado em: 28/08/2022. Disponível em: <https://www.furnas.com.br/subsecao/123/usina-luiz-carlos-barreto-de-carvalho>.

GILL, M. A. Sedimentation and useful life of reservoirs. **Journal of Hydrology**, v. 44, n. 1, p. 89–95, 1979. ISSN 0022-1694. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0022169479901483>.

GOV.BR. **Lei 14.182-2021**. 2021. Acessado em: 21/06/2022. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/lei-n-14.182-de-12-de-julho-de-2021-331549377>.

GOV.BR. **ANA e ANEEL aprovam normativo sobre procedimentos de operação de estações hidrológicas pelas Usinas Hidrelétricas**. 2022. Acessado em: 25/08/2022. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/noticias-e-eventos/noticias/>.

GOV.BR. **Capitalização da Eletrobras**. 2022. Acessado em: 21/06/2022. Disponível em: <https://www.gov.br/pt-br/noticias>.

HASSAN, R.; AL-ANSARI, N.; ALI, A. A.; ALI, S. S.; KNUTSSON, S. Bathymetry and siltation rate for dokan reservoir, iraq. **Lakes & Reservoirs: Science, Policy and Management for Sustainable Use**, v. 22, n. 2, p. 179–189, 2017. ISSN 1440-1770. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/lre.12173>.

IBGE. **Atlas do Espaço Rural Brasileiro**. 2. ed. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2020.

IJAZ, M. A.; ASHRAF, M.; HAMID, S.; NIAZ, Y.; WAQAS, M. M.; TARIQ, M. A. U. R.; SAIFULLAH, M.; BHATTI, M. T.; TAHIR, A. A.; IKRAM, K.; SHAFEEQUE, M.; NG, A. W. M. Prediction of sediment yield in a data-scarce river catchment at the sub-basin scale using gridded precipitation datasets. **Water**, v. 14, n. 9, 2022. ISSN 2073-4441. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4441/14/9/1480>.

JUNCOSA, R.; CEREIJO, J. L.; VAZQUEZ, R. Physicochemical parameters in the generation of turbidity episodes in a water supply distribution system. **Water**, v. 14, n. 21, 2022. ISSN 2073-4441. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4441/14/21/3383>.

KUWAJIMA, J. I.; ARANTES, D. M.; ESTIGONI, M. V.; MAUAD, F. F. Proposta da aplicação do modelo swat como ferramenta complementar de gerenciamento de recursos hídricos e estimativa de assoreamento em reservatórios. *In: IWRA World Water Congress*. [S.l.: s.n.]: IWRA, 2011.

LEMONDS, P. J.; KASCH, M. Comparison of the autocalibration tools available within swat2005 and manual calibration. *In: . St. Joseph, MI: American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2007*. Disponível em: <https://doi.org/10.13031/2013.22422>.

LIBREOFFICE. **The Document Foundation**. 2022. Acessado em: 09/06/2022. Disponível em: <http://pt-br.libreoffice.org>.

MAPA. **Programas e Orientações**. 2022. Acessado em: 09/06/2022. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sustentabilidade/plano-abc/programas-e-orientacoes>.

MARCHIORO, E. **Modelagem hidrossedimentológica na bacia do córrego Santa Maria: Subsídios à aplicação de práticas de conservação de água e solo no noroeste fluminense**. 2008. 197 p. Tese (Doutorado) — UFRJ RJ, Programa de Pós Graduação em Geografia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008. Doutorado em Geografia.

MARIADB. **MariaDB Foundation**. 2022. Acessado em: 09/06/2022. Disponível em: <http://mariadb.com>.

MELD. **Visual Diff and Merge Tool**. 2022. Acessado em: 09/06/2022. Disponível em: <http://meldmerge.org>.

MITCHELL, M. **Engauge Digitizer**. 2022. Acessado em: 09/06/2022. Disponível em: <http://markumitchell.github.io/engauge-digitizer/>.

NEITSCH, S.; ARNOLD, J.; KINIRY, J.R. WILLIAMS, J. **Soil and Water Assessment Tool: Theoretical documentation version 2009**. Texas-US, 2011. Disponível em: <http://swat.tamu.edu/media/99192/swat2009-theory.pdf>. Acesso em: 09/06/2022.

OLIVEIRA, W. N. de. **Avaliação da Qualidade Ambiental da Paisagem da Bacia Hidrográfica e do Reservatório do Ribeirão João Leite**. 2013. 179 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Meio Ambiente - EEC) — UFG GO - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2013.

OLIVEIRA, W. N. de. **Modelagem em Diversas Escalas da Geração de Sedimentos em Erosões e o Aporte em Reservatórios de UHEs**. Goiânia, GO, 2021.

ONS. **Capacidade Instalada no SIN (Sistema Integrado Nacional) - 2022/2026 - O Sistema em Números**. 2022. Acessado em: 21/01/2022. Disponível em: <http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-sistema-em-numeros>.

ONS. **Dados Abertos - Capacidade de Geração**. 2022. Acessado em: 31/07/2022. Disponível em: <https://dados.ons.org.br/dataset/capacidade-geracao/resource/515cc325-6976-4c32-b3bf-48d035b70277>.

OSGEO. **QGIS Geographic Information System**. 2022. Acessado em: 09/06/2022. Disponível em: <http://qgis.org/>.

- PAIVA, J. B. D. de. **Avaliação dos Modelos Matemáticos de Cálculo do Transporte de Sedimentos em Rios**. 1988. 315 p. Tese (Doutorado) — USP SP, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1988. Doutorado em Hidráulica e Saneamento.
- PELLEGRINI, A.; KOCHER, M. L.; SCHAEFER, G. L.; ALVAREZ, J. W. R.; SANTOS, D. R. dos; MINELLA, J. P. G.; ALBUGERI, F. E.; GUBIANI, E. Calibração de turbidímetro para estimativa da concentração de sedimentos em suspensão em uma pequena bacia hidrográfica. *In: . [S.l.: s.n.]*: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo (SBSC), 2010. p. 1–4.
- PEREIRA, G. M. **Projeto de Usinas Hidrelétricas - Passo a Passo**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.
- PHP. **Site Institucional**. 2022. Acessado em: 09/06/2022. Disponível em: <http://php.net>.
- PIRES, H. T. **Usina Hidrelétrica de Teles Pires**. 2022. Acessado em: 02/11/2022. Disponível em: <https://www.uhetelespires.com.br/site/>.
- POLETO, C. **Sedimentologia Fluvial**. 2. ed. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2018.
- POMÁZI, F.; BARANYA, S. Comparative assessment of fluvial suspended sediment concentration analysis methods. **Water**, v. 12, n. 3, 2020. ISSN 2073-4441. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4441/12/3/873>.
- PRADO, A. do; OLIVEIRA, E. de; MENDONÇA, L. S. T.; ALVES, F. V.; CRUZ, H. P.; LOPES, W. T. A. **Orientações para Atualização das Curvas Cota x Área x Volume**: Ana - relatório técnico. Brasília-DF, 2013. Disponível em: [https://arquivos.ana.gov.br/inf hidrologicas/cadastro/OrientacoesParaAtualizacaoDasCurvas\\_Cota\\_Area\\_Volume\\_Versao\\_Dez2013.pdf](https://arquivos.ana.gov.br/inf hidrologicas/cadastro/OrientacoesParaAtualizacaoDasCurvas_Cota_Area_Volume_Versao_Dez2013.pdf). Acesso em: 09/06/2022.
- RSTUDIO. **Site Institucional**. 2022. Acessado em: 09/06/2022. Disponível em: <https://www.rstudio.com/>.
- SÁ, L. A. de. **Relatório Técnico - Atualização das Curvas Cota x Área x Volume - UHE Itumbiara**. Brasília, DF, 2021.
- SALES, M. M.; CARVALHO, J. C. de; MASCARENHA, M. M. dos A.; LUZ, M. P. da; SOUZA, N. M. de; ANGELIM, R. R. **Erosão em Borda de Reservatório**. 1. ed. Goiânia: GECON - UFG, 2017.
- SÁNCHEZ-CANALES, M.; LÓPEZ-BENITO, A.; ACUÑA, V.; ZIV, G.; HAMEL, P.; CHAPLIN-KRAMER, R.; ELORZA, F. Sensitivity analysis of a sediment dynamics model applied in a mediterranean river basin: Global change and management implications. **Science of The Total Environment**, v. 502, p. 602–610, 2015. ISSN 0048-9697. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969714013965>.
- SANDRONI, S. S.; GUIDICINI, G. **Barragens de Terra e Enrocamento**. 1. ed. Rio de Janeiro: Oficina de Textos, 2022.
- SENAR. **PRADAM - Programa de Recuperação de Áreas Degradadas na Amazônia**. 2017. Acessado em: 10/06/2022. Disponível em: <https://senar.org.br/abcsenar/pradam>.

SINGH, A.; IMTIYAZ, M.; ISAAC, R.; DENIS, D. Comparison of soil and water assessment tool (swat) and multilayer perceptron (mlp) artificial neural network for predicting sediment yield in the nagwa agricultural watershed in jharkhand, india. **Agricultural Water Management**, v. 104, p. 113–120, 2012. ISSN 0378-3774. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378377411003295>.

SWAT. **Site Institucional**. 2022. Acessado em: 09/06/2022. Disponível em: <http://swat.tamu.edu>.

UFRGS. **MGB - Modelo de Grandes Bacias**. 2022. Acessado em: 09/06/2022. Disponível em: <https://www.ufrgs.br/hge/mgb/>.

USACE. **U.S. Army Corps of Engineers - Hydrologic Engineering Center**. 2022. Acessado em: 09/06/2022. Disponível em: <http://hec.usace.army.mil/software/hec-ras/>.

USBR. **Step Method for Computing Total Sediment Load by The Modified Einstein Procedure**: Project investigations division bureau of reclamation. Washington-DC, 1955. Disponível em: [http://ponce.sdsu.edu/mep\\_step\\_method.pdf](http://ponce.sdsu.edu/mep_step_method.pdf). Acesso em: 09/06/2022.

USBR. **Design of Small Dams**. 2. ed. Washington DC: United States Department of the Interior - Bureau of Reclamation, 1974.

VERSTRAETEN, G.; BAZZOFFI, P.; LAJCZAK, A.; RĂDOANE, M.; REY, F.; POESEN, J.; VENTE, J. de. Reservoir and pond sedimentation in europe. *In: \_\_\_\_\_*. **Soil Erosion in Europe**. John Wiley and Sons, Ltd, 2006. cap. 54, p. 757–774. ISBN 9780470859209. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/0470859202.ch54>.

W3TECHS. **Web Technology Surveys - Usage Statistics of Web Servers**. 2021. Acessado em: 23/11/2021. Disponível em: <http://ww3techs.com>.

WANG, G.; WU, B.; WANG, Z. Sedimentation problems and management strategies of sanmenxia reservoir, yellow river, china. **Water Resources Research**, v. 41, 09 2005.

YU, Z.; CHEN, X.; WU, J. Calibrating a hydrological model in an ungauged mountain basin with the budyko framework. **Water**, v. 14, n. 19, 2022. ISSN 2073-4441. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4441/14/19/3112>.

## APÊNDICES

## APÊNDICE A – DADOS PARA CURVA-CHAVE DE SEDIMENTOS DA UHE ITUMBIARA

A Tabela 6 contém dados de campo e laboratório para o reservatório da UHE Itumbiara, coletadas entre 2012 e 2020, onde:

N = número de identificação da amostra; Estação = nome de identificação do posto de coleta; Data = data da coleta da amostra no formato AA-MM-DD; Vazão = vazão no momento da coleta em  $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ;  $Q_{st}$  = descarga sólida total calculada em laboratório pelo método simplificado de Colby.

Tabela 6 – UHE Itumbiara - Dados para Curva-Chave de Sedimentos

N	Estação	Data	Vazão	Qst	N	Estação	Data	Vazão	Qst
1	EDS001	12-06-03	0,00	0,00	80	EDS005	15-11-14	10,10	14,49
2	EDS001	12-12-14	1,99	7,60	81	EDS005	16-02-20	40,40	281,69
3	EDS001	13-05-09	2,01	0,00	82	EDS005	16-08-08	7,03	5,53
4	EDS001	13-12-18	3,18	40,86	83	EDS005	17-01-21	59,60	1100,44
5	EDS001	14-05-24	1,11	2,27	84	EDS005	17-05-20	27,40	70,07
6	EDS001	14-10-29	0,32	0,26	85	EDS005	17-10-04	6,53	5,42
7	EDS001	15-03-26	14,70	1183,08	86	EDS005	18-04-23	42,70	11812,34
8	EDS001	15-07-04	1,63	6,15	87	EDS005	18-07-20	15,90	44,54
9	EDS001	15-11-13	0,52	1,67	88	EDS005	19-02-11	23,80	203,14
10	EDS001	16-02-18	3,85	35,83	89	EDS005	19-08-28	8,43	17,01
11	EDS001	16-08-09	0,55	0,80	90	PB007	12-06-02	829,00	701,93
12	EDS001	17-01-25	2,28	11,39	91	PB007	12-12-13	750,96	687,76
13	EDS001	17-05-19	0,88	3,20	92	PB007	13-05-08	322,00	0,00
14	EDS001	17-10-06	0,57	2,22	93	PB007	13-12-17	192,00	1912,69
15	EDS001	18-04-24	1,69	4,28	94	PB007	14-05-21	507,00	188,36
16	EDS001	18-07-24	0,70	2,73	95	PB007	14-10-30	801,00	359,87
17	EDS001	19-01-31	1,61	4,38	96	PB007	15-03-25	166,00	407,32
18	EDS001	19-08-27	0,48	1,52	97	PB007	15-07-06	165,00	202,44
19	EDS002	12-06-04	0,00	0,00	98	PB007	15-11-10	184,00	74,72
20	EDS002	12-12-14	32,50	141,80	99	PB007	16-02-17	186,00	498,18
21	EDS002	13-05-10	46,90	0,00	100	PB007	16-08-05	257,00	266,46
22	EDS002	13-12-18	111,00	0,00	101	PB007	17-01-24	170,00	550,80
23	EDS002	14-05-24	41,00	42,51	102	PB007	17-05-17	168,00	179,99
24	EDS002	14-10-29	24,00	54,74	103	PB007	17-10-05	489,00	718,24
25	EDS002	15-03-26	101,00	384,83	104	PB007	18-04-24	162,00	207,15

Continua na próxima página...

Tabela 6 – Continuação da página anterior

N	Estação	Data	Vazão	Qst	N	Estação	Data	Vazão	Qst
26	EDS002	15-07-04	4,00	3,97	105	PB007	18-07-23	158,00	259,04
27	EDS002	15-11-13	3,00	3,27	106	PB007	19-02-04	159,00	157,36
28	EDS002	16-02-18	37,00	170,07	107	PB007	19-08-22	628,00	751,79
29	EDS002	16-08-09	11,00	6,46	108	PB009	12-05-31	0,00	0,00
30	EDS002	17-01-25	94,00	386,59	109	PB009	12-12-12	10,20	28,73
31	EDS002	17-05-19	34,00	51,11	110	PB009	13-05-07	7,57	0,00
32	EDS002	17-10-06	19,00	17,57	111	PB009	13-12-16	11,80	78,20
33	EDS002	18-04-25	66,20	161,87	112	PB009	14-05-21	3,49	9,20
34	EDS002	18-07-24	10,40	18,84	113	PB009	14-10-28	2,32	4,79
35	EDS002	19-02-01	28,50	65,93	114	PB009	15-03-25	12,80	31,41
36	EDS002	19-08-27	12,40	32,61	115	PB009	15-07-05	3,68	8,27
37	EDS003	12-06-01	0,00	0,00	116	PB009	15-11-12	3,03	6,44
38	EDS003	12-12-12	2,59	6,62	117	PB009	16-02-15	10,20	17,80
39	EDS003	13-05-07	3,15	0,00	118	PB009	16-08-04	2,94	3,78
40	EDS003	13-12-17	2,78	3,87	119	PB009	17-01-24	5,58	9,88
41	EDS003	14-05-23	1,20	0,34	120	PB021	13-05-23	342,46	201,20
42	EDS003	14-10-28	0,85	0,95	121	PB021	12-06-06	0,00	0,00
43	EDS003	15-03-27	5,20	33,25	122	PB021	14-10-31	299,00	3766,54
44	EDS003	15-07-05	2,36	4,18	123	PB021	12-12-16	518,81	2653,65
45	EDS003	15-11-11	1,22	1,70	124	PB021	13-12-19	349,65	353,45
46	EDS003	16-02-15	4,10	5,24	125	PB021	14-05-26	158,42	73,91
47	EDS003	16-08-05	1,39	0,84	126	PB021	15-03-24	263,00	718,05
48	EDS003	17-01-26	17,10	1180,33	127	PB021	15-07-03	188,00	105,58
49	EDS003	17-05-18	2,74	2,51	128	PB021	15-11-12	131,00	263,72
50	EDS003	17-10-10	1,06	1,10	129	PB021	16-02-16	562,00	869,17
51	EDS003	18-04-26	2,45	1,78	130	PB021	16-08-06	265,00	125,93
52	EDS003	18-07-19	1,41	5,33	131	PB021	17-01-20	244,00	0,00
53	EDS003	19-02-05	2,63	8,43	132	PB021	17-05-16	175,00	148,18
54	EDS003	19-08-26	1,06	2,40	133	PB021	17-10-03	376,00	1263,72
55	EDS004	13-01-04	149,45	0,00	134	PB021	18-04-25	457,04	106,62
56	EDS004	13-05-11	402,00	0,00	135	PB021	18-10-02	150,76	282,51
57	EDS004	13-12-20	417,00	850,28	136	PB021	19-02-06	247,00	1187,29
58	EDS004	14-10-20	245,00	179,93	137	PB021	19-08-23	358,00	738,00
59	EDS004	14-05-28	558,09	8901,24	138	PNB040	12-12-15	818,12	2558,82
60	EDS004	15-03-23	479,00	724,25	139	PNB040	13-05-23	350,98	203,17
61	EDS004	15-07-07	281,00	191,80	140	PNB040	13-12-19	303,04	295,86

Continua na próxima página...

Tabela 6 – Continuação da página anterior

N	Estação	Data	Vazão	Qst	N	Estação	Data	Vazão	Qst
62	EDS004	15-11-09	609,00	289,40	141	PNB040	14-05-25	232,45	0,00
63	EDS004	16-02-19	609,00	552,48	142	PNB040	14-12-01	554,36	1695,56
64	EDS004	16-08-10	342,00	301,40	143	PNB040	15-04-15	323,99	585,05
65	EDS004	17-01-19	211,00	260,69	144	PNB040	15-07-13	-19,08	-6,27
66	EDS004	17-05-22	172,00	144,15	145	PNB040	16-04-01	-83,22	-61,83
67	EDS004	17-10-09	214,00	197,84	146	PNB040	16-07-27	341,87	389,89
68	EDS004	18-04-27	300,00	217,73	147	PNB040	16-07-27	341,87	389,89
69	EDS004	18-08-14	437,00	998,64	148	PNB040	17-02-04	200,55	194,07
70	EDS004	19-02-13	481,00	590,05	149	PNB040	17-07-01	134,83	55,92
71	EDS004	19-08-29	411,00	2039,07	150	PNB040	17-10-24	651,11	1181,38
72	EDS005	12-06-16	39,94	73,50	151	PNB040	18-04-25	150,37	50,67
73	EDS005	12-12-17	23,50	61,12	152	PNB040	18-10-01	613,46	413,12
74	EDS005	13-05-12	47,30	0,00	153	PNB040	19-04-04	340,60	184,85
75	EDS005	13-12-26	36,70	255,57	154	PNB040	19-07-30	121,99	31,62
76	EDS005	14-10-27	8,23	5,12	155	PNB040	19-10-30	760,70	957,68
77	EDS005	15-03-27	79,60	715,25	156	PNB040	20-02-17	503,00	24530,34
78	EDS005	14-05-28	33,70	75,99	157	PNB040	21-11-18	291,32	579,98
79	EDS005	15-07-02	0,00	0,00	158	PNB040	22-03-30	-172,62	0,00

## APÊNDICE B – VAZÃO E DESCARGA SÓLIDA TOTAL - UHE ITUMBIARA

A Tabela 7 contém dados de vazão e descarga sólida total da UHE Itumbiara entre os anos de 2012 e 2021, onde:

Vazão = vazão no momento da coleta em  $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ;  $Q_{st}$  = descarga sólida total estimada pela da equação da curva chave, Equação 5.1, em  $\text{t d}^{-1}$ .

Tabela 7 – UHE Itumbiara - Amostras com Respectivas Vazões e Descargas Sólidas

Mês	2012		2013		2014		2015		2016	
	Vazão	Qst								
Jan	2069	21020	1503	14561	1107	10248	1132	10514	1095	10128
Fev	1847	18275	1412	13357	1347	12646	939	8360	888	7882
Mar	1902	19086	1106	10246	1295	12278	966	8768	1172	10944
Abr	1487	14314	1517	14644	1518	14664	1156	10721	764	6662
Mai	1488	14402	955	8648	1056	9715	980	8911	705	6111
Jun	1270	11947	993	9010	729	6311	695	5978	743	6451
Jul	1285	12166	853	7597	690	5963	560	4686	671	5771
Ago	1333	12695	876	7840	767	6728	535	4449	796	7022
Set	1221	11417	878	7816	1063	9738	787	6901	712	6151
Out	1385	13254	927	8364	1152	10728	981	8920	813	7197
Nov	1478	14217	986	8934	1203	11229	927	8327	767	6693
Dez	1756	17415	1143	10639	1300	12334	742	6474	1023	9369
Avg	1544	21644	1093	14557	1100	14662	866	11137	847	10861
	2017		2018		2019		2020		2021	
Jan	934	8436	1129	10490	1112	10305	1259	11880	885	7929
Fev	858	7540	922	8184	1020	9190	1592	15403	906	8028
Mar	941	8512	1106	10238	833	7392	1420	13641	1009	9221
Abr	625	5295	956	8619	968	8750	1129	10439	732	6349
Mai	586	4939	627	5340	762	6680	756	6613	601	5083
Jun	517	4261	574	4798	542	4498	879	7825	680	5830
Jul	508	4189	641	5472	526	4364	1036	9502	650	5565
Ago	505	4168	716	6213	809	7151	1125	10446	679	5852
Set	745	6479	912	8172	1262	11860	1479	14224	598	5028
Out	1135	10548	846	7528	1345	12817	1505	14589	503	4144
Nov	1015	9236	1119	10331	1278	12029	1516	14635	686	5885
Dez	1114	10329	1081	9978	1320	12549	1299	12318	745	6504

Continua na próxima página...

Tabela 7 – Continuação da página anterior

Mês	2012		2013		2014		2015		2016	
	Vazão	Qst	Vazão	Qst	Vazão	Qst	Vazão	Qst	Vazão	Qst
Avg	791	10034	885	11427	981	12852	1248	16947	722	9040

## APÊNDICE C – DICIONÁRIO DE DADOS

Tabela 8 – Ferramenta Computacional SISED - Dicionário de Dados

<b>Atributo</b>	<b>Tipo</b>	<b>Descrição</b>
<b>Tabela hidro_reservatorios (Registros dos Reservatórios)</b>		
hidroRes_id	inteiro	Número Identificador do Reservatório
hidroRes_nome	texto	Nome do Reservatório
hidroRes_obs	longtext	Observações do Reservatório
hidroRes_barragem_tipo	inteiro	Código do Tipo de Barragem
hidroRes_barragem_AltMax	decimal	Altura Máxima da Barragem
hidroRes_barragem_VolConcreto	decimal	Volume de Concreto da Barragem
hidroRes_barragem_VolArgila	decimal	Volume de Argila da Barragem
hidroRes_nivelNormal	decimal	Nível Normal do Reservatório
hidroRes_nivelMaximo	decimal	Nível Máximo do Reservatório
hidroRes_nivelDesapropriacao	decimal	Nível de Desapropriação do Reservatório
hidroRes_nivelMinimo	decimal	Nível Mínimo do Reservatório
hidroRes_areaInundada	decimal	Área Inundada do Reservatório
hidroRes_volTotal	decimal	Volume Total do Reservatório
hidroRes_volUtil	decimal	Volume Útil do Reservatório
hidroRes_capacidade	decimal	Capacidade do Reservatório
hidroRes_status	inteiro	Status do Reservatório
<b>Tabela hidro_estacoes (Registros das Estações Hidrossedimentológicas)</b>		
hidroEst_num	Inteiro	Número Identificador da Estação
hidroEst_hidroRes_id	Inteiro	Chave Estrangeira do Reservatório
hidroEst_codFLU	texto	Código FLU da Estação
hidroEst_nome	texto	Nome da Estação
hidroEst_rio	Inteiro	Código do Rio
hidroEst_bacia	Inteiro	Código da Bacia Hidrográfica
hidroEst_latITUDE_grau	Inteiro	Localização: Latitude Graus
hidroEst_latITUDE_minuto	Inteiro	Localização: Latitude Minutos
hidroEst_latITUDE_segundo	Inteiro	Localização: Latitude Segundos
hidroEst_longitude_grau	Inteiro	Localização: Longitude Graus
hidroEst_longitude_minuto	Inteiro	Localização: Longitude Minutos
hidroEst_longitude_segundo	Inteiro	Localização: Longitude Segundos
hidroEst_status	Inteiro	Status da Estação
hidroEst_area_drenagem	Inteiro	Área de Drenagem

Continua na próxima página...

Tabela 8 – Continuação da página anterior

<b>Atributo</b>	<b>Tipo</b>	<b>Descrição</b>
hidroEst_tipo	Inteiro	Tipo da Estação
hidroEst_proprietaria	Inteiro	Código da Proprietária da Estação
hidroEst_operadora	Inteiro	Código da operadora da Estação
hidroEst_municipio	texto	Município da Estação
hidroEst_UF	Inteiro	Estado da Estação
hidroEst_fpes_id	Inteiro	Responsável pelo Cadastro da Estação
hidroEst_data	data	Data de Cadastro da Estação
hidroEst_obs	texto	Observações da Estação
hidroEst_roteiro	texto	Roteiro da Equipe de Coleta
<b>Tabela hidro_estacoes_amostras (Registros das Amostras Coletadas)</b>		
hidroEstAmo_id	inteiro	Número Identificador da Amostra
hidroEstAmo_hidroEst_num	inteiro	Chave Estrangeira da Estação
hidroEstAmo_tpAmostrador	Inteiro	Tipo do Amostrador da Coleta
hidroEstAmo_bico	inteiro	Bico do Amostrador da Coleta
hidroEstAmo_metodo	inteiro	Código do Método de Coleta
hidroEstAmo_vazao	decimal	Vazão do Rio na Hora de Coleta
hidroEstAmo_temp	decimal	Temperatura do Rio na Hora de Coleta
hidroEstAmo_dist_MD_ME	decimal	Distância Entre as Margens
hidroEstAmo_status	inteiro	Status da Amostra
hidroEstAmo_fpes_id	inteiro	Código da Pessoa que Cadastrou Amostra
hidroEstAmo_fpes_id_visita	inteiro	Código da Pessoa que Coletou Amostra
hidroEstAmo_data	data	Data de Coleta da Amostra
hidroEstAmo_obs	texto	Observações da Amostra
hidroEstAmo_hidroEstAmoVert	inteiro	Vertical Principal da Coleta
hidroEstAmo_vp_vm	decimal	Velocidade Média na Vertical Principal
hidroEstAmo_ntravessias	inteiro	Número de Travessias para Coleta
hidroEstAmo_hora_ini	hora	Hora de Início da Coleta
hidroEstAmo_hora_fim	hora	Hora de Término da Coleta
hidroEstAmo_cota	decimal	Cota do Rio no Momento da Coleta
hidroEstAmo_area	decimal	Área de Drenagem em km <sup>2</sup>
<b>Tabela hidro_estacoes_amostras_historico (Movimentações das Amostras)</b>		
hidroEstAmoHist_id	inteiro	Identificador da Movimentação da Amostra
hidroEstAmoHist_hidroEstAmo_id	inteiro	Chave Estrangeira da Amostra
hidroEstAmoHist_desc	inteiro	Descrição da Movimentação da Amostra
hidroEstAmoHist_data	data	Data da Movimentação da Amostra

Continua na próxima página...

Tabela 8 – Continuação da página anterior

<b>Atributo</b>	<b>Tipo</b>	<b>Descrição</b>
hidroEstAmoHist_fpes_id	inteiro	Responsável pela Movimentação da Amostra
hidroEstAmoHist_status	inteiro	Status da Movimentação da da Amostra
<b>Tabela dctweb_servicos_tab_resultados_sedimentologia_resumo (Ensaios)</b>		
dres_sedres_hidroEstAmo_id	inteiro	Identificador do Resultado
dres_sedres_metanal_evaporacao	decimal	Concentração de Sedimentos pelo Método de Evaporação
dres_sedres_metanal_tubo	decimal	Concentração de Sedimentos pelo Método de Tubo
dres_sedres_metanal_pipetagem	decimal	Concentração de Sedimentos pelo Método de Pipetagem
dres_sedres_pen_areia	decimal	Percentual de Material - Areia
dres_sedres_pen_silte	decimal	Percentual de Material - Silte
dres_sedres_pen_argila	decimal	Percentual de Material - Argila
dres_sedres_granul_0_00156	decimal	Distr. Granulométrica Susp. - 0,0156
dres_sedres_granul_00156_00625	decimal	Distr. Granulométrica Susp. - 0,0625
dres_sedres_granul_00625_0125	decimal	Distr. Granulométrica Susp. - 0,125
dres_sedres_granul_0125_025	decimal	Distr. Granulométrica Susp. - 0,25
dres_sedres_granul_025_05	decimal	Distr. Granulométrica Susp. - 0,5
dres_sedres_granul_05_1	decimal	Distr. Granulométrica Susp. - 1
dres_sedres_granul_1_2	decimal	Distr. Granulométrica Susp. - 2
dres_sedres_granul_2_4	decimal	Distr. Granulométrica Susp. - 4
dres_sedres_leito_uni_65	decimal	Coefficiente de Uniformidade - D65
dres_sedres_leito_uni_35	decimal	Coefficiente de Uniformidade - D35
dres_sedres_leito_mat_cascalho	decimal	Percentual de Material AGU - Cascalho
dres_sedres_leito_mat_areia	decimal	Percentual de Material AGU - Areia
dres_sedres_leito_mat_silte	decimal	Percentual de Material AGU - Silte
dres_sedres_leito_mat_argila	decimal	Percentual de Material AGU - Argila
dres_sedres_leito_gran_0_0016	decimal	Granulometria de Leito - Peneira 0,016
dres_sedres_leito_gran_0016_0062	decimal	Granulometria de Leito - Peneira 0,062
dres_sedres_leito_gran_0062_0125	decimal	Granulometria de Leito - Peneira 0,125
dres_sedres_leito_gran_0125_025	decimal	Granulometria de Leito - Peneira 0,25
dres_sedres_leito_gran_025_05	decimal	Granulometria de Leito - Peneira 0,5
dres_sedres_leito_gran_05_1	decimal	Granulometria de Leito - Peneira 1
dres_sedres_leito_gran_1_2	decimal	Granulometria de Leito - Peneira 2
dres_sedres_leito_gran_2_4	decimal	Granulometria de Leito - Peneira 4

Continua na próxima página...

Tabela 8 – Continuação da página anterior

<b>Atributo</b>	<b>Tipo</b>	<b>Descrição</b>
dres_sedres_leito_gran_4_8	decimal	Granulometria de Leito - Peneira 8
dres_sedres_leito_gran_8_32	decimal	Granulometria de Leito - Peneira 32
dres_sedres_data	data	Data do Ensaio
dres_sedres_status	inteiro	Status do Ensaio
dres_sedres_situacao	inteiro	Situação do Ensaio
dres_sedres_obs	texto	Comentários sobre o Ensaio
dres_sedres_fpes_id	inteiro	Responsável pelo Ensaio
<b>Tabela hidro_vazoes (Registros das Vazões nos Reservatórios)</b>		
hidroVaz_id	inteiro	Número Identificador da Vazão
hidrovaz_hidroRes_id	inteiro	Chave Estrangeira do Reservatório
USIT-NR24	decimal	Nível Água Reservatório às 24:00
USIT-VU24	decimal	Volume Útil Reservatório às 24:00
USIT-PV24	decimal	Percentual Volume Útil às 24:00
USIT-GERD	decimal	Geração da Usina Diária às 24:00
USIT-PROD	decimal	Produtividade Média Diária
USIT-VAMD	decimal	Vazão Afluente Média Diária
USIT-VDMD	decimal	Vazão Defluente Média Diária
USIT-VTMD	decimal	Vazão Turbinada Média Diária
USIT-VVMD	decimal	Vazão Vertida Média Diária
USIT-VTVD	decimal	Vazão Turbinada em Vazio Média Diária
hidroVaz_data	data	Data do Registro de Vazão

## **ANEXOS**

**ANEXO A – TABELA AUXILIAR PARA CÁLCULO DE CONCENTRAÇÃO  
RELATIVA**

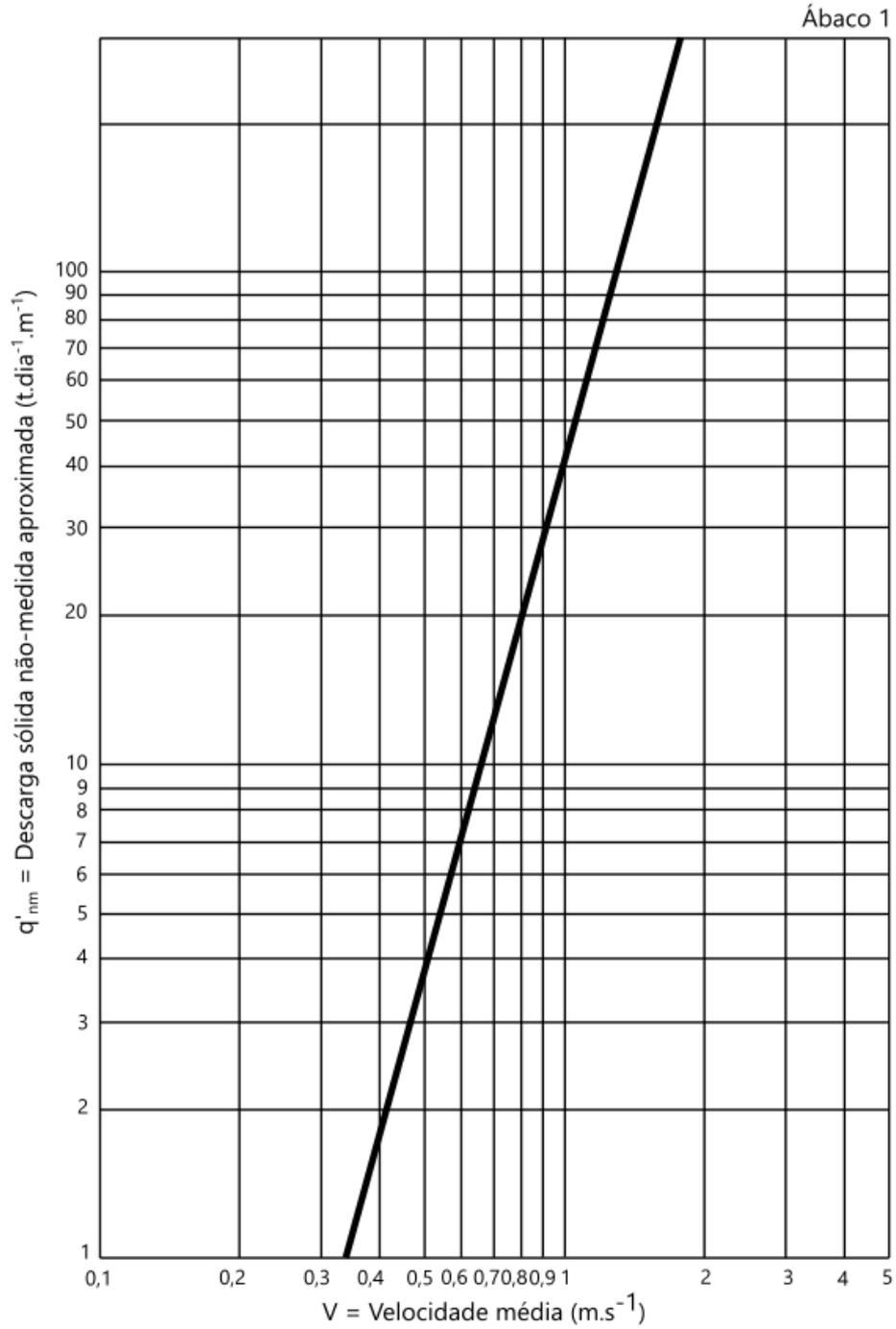
Tabela 9 – Valores Estimados de A e B para o Cálculo de Concentração Relativa em Função da Profundidade

<b>Profundidade (p)</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>Profundidade (p)</b>	<b>A</b>	<b>B</b>
< 0,35	1,8066	3,2627	5,50 a 6,50	2,5727	2,4914
0,35 a 0,45	1,8365	3,1760	6,50 a 7,50	2,6859	2,4651
0,45 a 0,55	1,9111	3,1139	7,50 a 8,50	2,6674	2,3979
0,55 a 0,65	1,9512	3,0881	8,50 a 9,50	2,7665	2,3696
0,65 a 0,75	1,9730	3,0512	9,50 a 11	2,8102	2,3224
0,75 a 0,85	1,9897	3,0212	11 a 13	2,9199	2,2304
0,85 a 0,95	1,8213	2,9289	13 a 15	3,0768	2,1303
0,95 a 1,10	2,0388	2,9692	15 a 17	3,1964	2,0414
1,10 a 1,30	1,9069	2,9002	17 a 19	3,3046	1,9590
1,30 a 1,50	2,1377	2,9031	19 a 21	3,4190	1,8554
1,50 a 1,70	2,1772	2,8642	21 a 23	3,5844	1,7661
1,70 a 1,90	2,1865	2,8243	23 a 25	3,5913	1,6532
1,90 a 2,50	2,2393	2,7782	25 a 27	3,5476	1,5341
2,50 a 3,50	2,2319	2,6990	27 a 29	3,9694	1,4639
3,50 a 4,30	2,4540	2,6236	29 a 31	4,1821	1,3441
4,50 a 5,50	2,5129	2,5446			

Fonte: Adaptado de Paiva (1988)

**ANEXO B – (ÁBACO 1) DESCARGA SÓLIDA NÃO-MEDIDA ( $q'_{nm}$ ) A PARTIR DA VELOCIDADE MÉDIA**

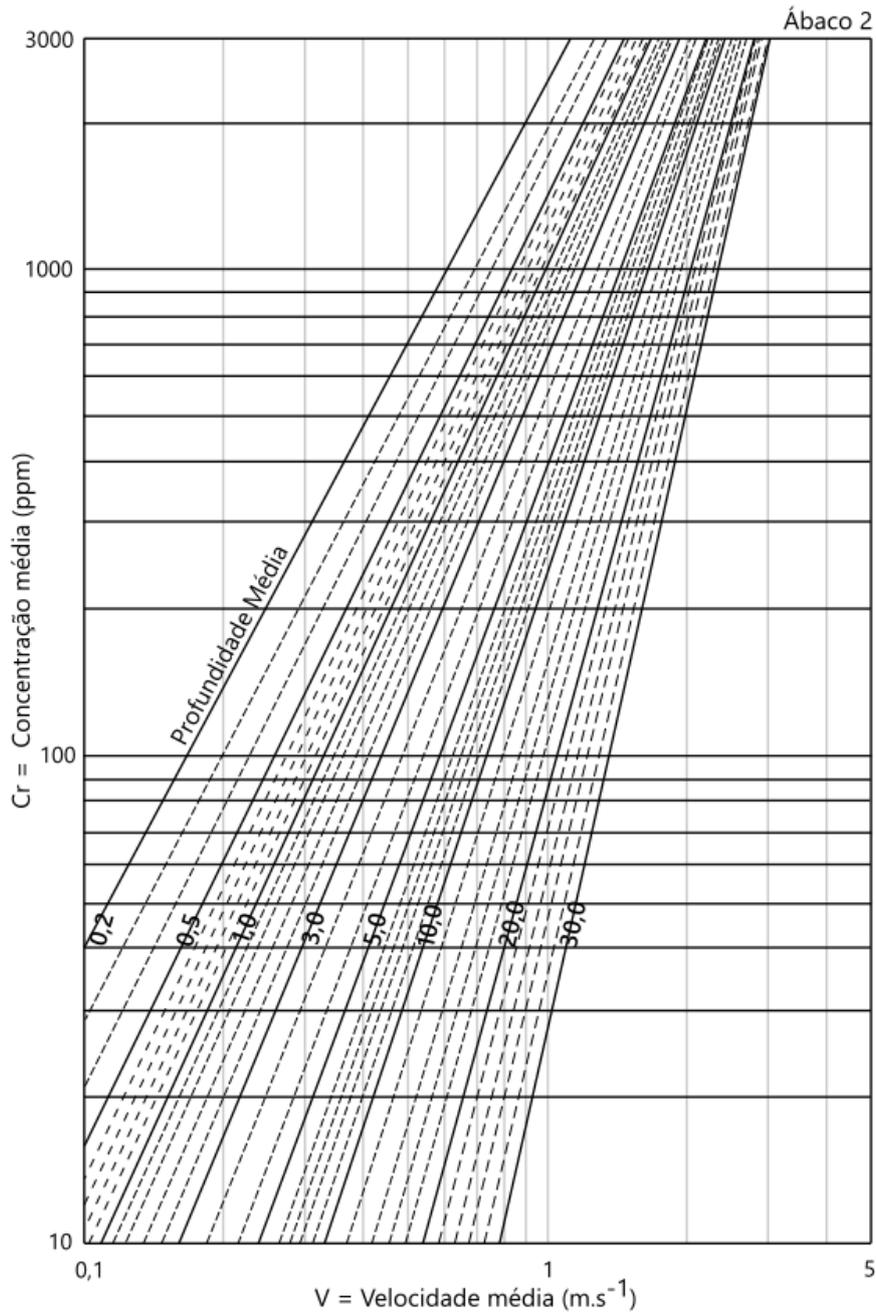
Figura 28 – (Ábaco 1) Obtenção de  $q'_{nm}$



Fonte: (USBR, 1955)

## ANEXO C – (ÁBACO 2) CONCENTRAÇÃO RELATIVA ( $C_r$ ), A PARTIR DA VELOCIDADE MÉDIA

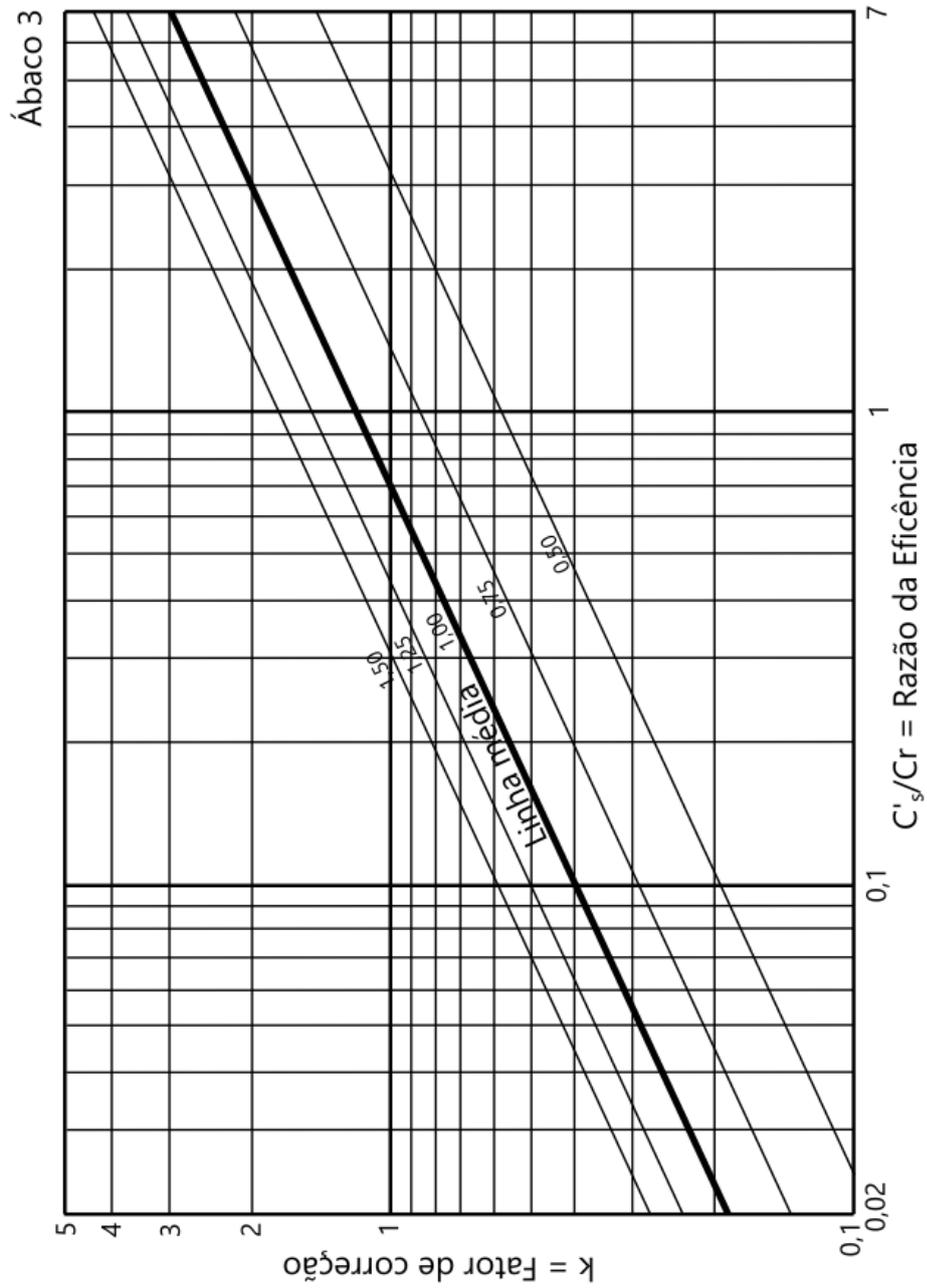
Figura 29 – (Ábaco 2) Obtenção da Concentração Relativa ( $C_r$ )



Fonte: (CARVALHO, 2008)

## ANEXO D – (ÁBACO 3) FATOR DE CORREÇÃO, A PARTIR DA RAZÃO DE EFICIÊNCIA

Figura 30 – (Ábaco 3) Obtenção do Fator de Correção



Fonte: (CARVALHO, 2008)