

ESTUDO HIDROSEDIMENTOLÓGICO DO LAGO GUAÍBA
CONTRATO Nº 22/2018

PRODUTO 01 (P 01) – PLANO DE TRABALHO

REALIZAÇÃO:



GOVERNO DO ESTADO
RIO GRANDE DO SUL
SECRETARIA DO AMBIENTE E
DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

EXECUÇÃO:

RHA
RECURSOS HÍDRICOS E AMBIENTAIS
ENGENHARIA

CURITIBA, PR

2018

ESTUDO HIDROSSEDIMENTOLÓGICO DO LAGO GUAÍBA
CONTRATO Nº 22/2018

Emissão						
Rev.	Data	Elaborado por	Verificado por	Autorizado por	CREA Responsável Técnico	CE
0	01/11/2018	LMC; CSG; RMS; KRB; TM; JEG	LMC; CSG	CSG	67059-D	AE
1	07/11/2018	LMC; CSG; RMS; KRB; TM; JEG	LMC; CSG	CSG	67059-D	AE

CE – Códigos de emissão

AE Aprovado para emissão **AF** Aprovação final **VS** Versão preliminar **CD** Cancelado

**GOVERNO DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL
SECRETARIA DO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL (SEMA/RS)**

Av. Borges de Medeiros, nº 261, 14º andar
Centro Histórico, Porto Alegre – RS – Brasil

Secretária de Estado do Ambiente e Desenvolvimento Sustentável
Ana Maria Pellini

Fiscal titular de acompanhamento e execução do contrato
Amanda Wajnberg Fadel

Fiscal suplente de acompanhamento e execução do contrato
Fernando Comerlato Scotta

RHA ENGENHARIA E CONSULTORIA SS LTDA

Rua Voluntários da Pátria, 400 – 14º andar
CEP 80020-000 - Centro - Curitiba - PR - Brasil
Tel./Fax +55 41 3232 0732 - www.rhaengenharia.com.br

REPRESENTANTE LEGAL

Candice Schauffert Garcia – RHA ENGENHARIA E CONSULTORIA
Engenheira Civil
Mestre em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental
csgarcia@rhaengenharia.com.br

EQUIPE PERMANENTE

Coordenador Geral, Técnico e Administrativo

Eng.ª Civil, M.Sc., Candice Schauffert Garcia

Engenheiro de Recursos Hídricos 1

Eng.º Civil, M.Sc., Laertes Munhoz da Cunha

Engenheiro de Recursos Hídricos 2

Eng.ª Civil, M.Sc., Márian da Costa Rohn

Técnica em Sistemas de Informações Geográficas

Geógrafa Karine Krunn

Auxiliar administrativo

Veridiana Dias da Cruz

EQUIPE COMPLEMENTAR

Geógrafo, Dr., Rodrigo Marcos Souza

Eng.ª Sanitarista e Ambiental Kássia Regina Bazzo

Oceanógrafa, M.Sc, Tábata Miranda

Físico, Dr., José Eduardo Gonçalves

Eng.ª Ambiental, Esp., Andréia Pedroso

Eng.ª Civil, M.Sc., Karina Thomé Ramalho

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 - ZONAS DE AMOSTRAGENS, MEDIDA E NÃO MEDIDA, EM UMA VERTICAL DE MEDIÇÃO (SANTOS <i>et al.</i> 2001)	15
FIGURA 2 – LOCALIZAÇÃO DA REGIÃO HIDROGRÁFICA DO GUAÍBA	17
FIGURA 3–SEGMENTAÇÃO DO LAGO GUAÍBA EM SETE TIPO REGIÕES COM BASE NO PADRÃO DE CIRCULAÇÃO DA ÁGUA (PAZ <i>et al.</i> 2005)....	19
FIGURA 4 - AGRUPAMENTO DA DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DE ACORDO COM A ENERGIA DEPOSICIONAL DO SISTEMA (adaptado de PBH – LAGO GUAIBA, 2016; BACHI <i>et al.</i> 2000).....	20
FIGURA 5 -DEFINIÇÃO DO NÍVEL DA ÁGUA (ζ), PROFUNDIDADE (h) E PROFUNDIDADE TOTAL (H) (HYDRAULICS, 2014).....	26
FIGURA 6 - EXEMPLO DE UMA GRADE EM COORDENADAS σ (HYDRAULICS, 2014).....	27
FIGURA 7 – FLUXOGRAMA DA MODELAGEM HIDROSSEDIMENTOLÓGICA NO SWAT.....	32
FIGURA 8 – LOCALIZAÇÃO DAS ESTAÇÕES HIDROSSEDIMENTOMÉTRICAS	36
FIGURA 9 – FLUXOGRAMA DA MODELAGEM HIDRODINÂMICA NO DELFT3D ...	39
FIGURA 10 - LOCALIZAÇÃO DOS CONTORNOS DO MODELO DO BAIXO JACUÍ. .	43
FIGURA 11- LOCALIZAÇÃO DOS CONTORNOS DO MODELO DO LAGO GUAÍBA. .	44
FIGURA 12 - MAPA DE LOCALIZAÇÃO DAS AMOSTRAS DE SEDIMENTOS COLETADOS NO LAGO GUAÍBA (ANDRADE, 2018).....	45
FIGURA 13- LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE COLETA DE SEDIMENTO DE FUNDO (ANDRADE, 2018).....	46
FIGURA 14 – FLUXOGRAMA SIMPLIFICADO DAS ATIVIDADES PREVISTAS NA ETAPA DE CENARIZAÇÃO	52
FIGURA 15 – ETAPAS PARA ELABORAÇÃO DOS PRODUTOS	59
FIGURA 16 – CRONOGRAMA FÍSICO.....	61

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1 – ESTAÇÕES HIDROSSEDIMENTOMÉTRICAS COM DADOS DISPONÍVEIS NA REGIÃO HIDROGRÁFICA DO GUAÍBA	35
TABELA 2 - ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS	42
TABELA 3 – ESTAÇÕES PARA CONTROLE DO BAIXO JACUÍ E LAGO GUAÍBA. ...	49
TABELA 4 – CONDIÇÕES DA SIMULAÇÃO DOS MÓDULOS I, II E III.....	50
TABELA 5 – CENÁRIOS E CONDIÇÕES DO ESTUDO	52
TABELA 6 - PROPOSIÇÃO DE DATAS PARA ENTREGA DOS PRODUTOS	56
TABELA 7– CARIMBO DE CONTROLE DE ALTERAÇÕES DE DOCUMENTOS.....	59

SUMÁRIO

1 CONTEXTUALIZAÇÃO	9
1.1 OBJETIVOS	9
1.2 PRODUÇÃO E TRANSPORTE DE SEDIMENTOS	10
1.2.1 MEDIÇÃO DOS SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO E NO LEITO	14
1.3 A REGIÃO HIDROGRÁFICA DO GUAÍBA.....	16
1.3.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO LAGO GUAÍBA.....	18
1.4 MODELO HIDROLÓGICO SWAT	21
1.5 MODELO HIDRODINÂMICO DELFT3D.....	24
1.5.1 DELFT3D – FLOW.....	25
1.5.2 DELFT3D – SED	28
2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	31
2.1 MODELAGEM DE APORTE DE SÓLIDOS E LÍQUIDOS – MÓDULO I.....	31
2.1.1 IMPLEMENTAÇÃO DO SWAT	32
2.2 MODELAGEM HIDRODINÂMICA DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS DO BAIXO JACUÍ E DO LAGO GUAÍBA – MÓDULOS II E III	38
2.2.1 IMPLEMENTAÇÃO DO DELFT3D	39
2.2.2 CALIBRAÇÃO DO DELFT3D	46
2.2.3 VALIDAÇÃO DO DELFT3D	48
2.3 CENÁRIOS	50
2.3.1 CONDIÇÕES	50
2.3.2 CENÁRIOS	51
2.4 PROPOSIÇÃO DE REDE DE MONITORAMENTO	53
2.5 PROPOSIÇÃO DE CRITÉRIOS PARA A MINERAÇÃO DE AREIA	55
3 ATIVIDADES PREVISTAS.....	56
3.1 PRODUTOS	56
3.1.1 REUNIÕES DE ACOMPANHAMENTO	56
3.1.2 APRESENTAÇÃO DOS PRODUTOS	57
3.2 CONTROLE DE QUALIDADE	57

3.3 CRONOGRAMA FÍSICO.....	60
REFERÊNCIAS	62
4 ANEXOS	65

1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Devido a diversidade do seu substrato geológico, abacia hidrográfica do Lago Guaíba, apresenta um potencial mineral significativo (PBH – LAGO GUAIBA, 2016). Em relação à mineração de areia, dentre os anos de 2004 e 2014 houve um aumento de aproximadamente 90% da quantidade de requerimentos para pesquisa e outorga de lavras, possivelmente associado ao aumento das demandas do mercado da construção civil (PBH – LAGO GUAIBA, 2016).

Para avaliar o impacto da atividade de mineração de areia no Lago Guaíba e permitir o seu licenciamento ambiental seguro, o estudo hidrossedimentológico da bacia hidrográfica do Lago Guaíba visa a obtenção do conhecimento da dinâmica e transporte de sedimentos desde a eclusa de Amarópolis até Itapuã, considerando as previsões de variações climáticas e do uso do solo até 2050. Com base nos resultados obtidos serão estabelecidos critérios e orientações operacionais sobre os volumes e locais mais adequados para a atividade de mineração de areia, delimitando-se os limiares com o objetivo da sustentabilidade desta atividade.

1.1 OBJETIVOS

Com base no termo de referência, o objetivo principal do presente trabalho é realizar o estudo hidrossedimentológico da bacia hidrográfica do Lago Guaíba e da dinâmica do transporte de sedimentos desde a eclusa de Amarópolis até Itapuã, através de modelagem computacional que permita a avaliação da atividade de mineração de areia no Lago Guaíba, considerando as previsões de variações climáticas e do uso do solo até 2050.

Como objetivos secundários, tem-se:

- a) Quantificar a descarga sólida e líquida ingressante no Lago Guaíba em valores médios mensais até 2050, considerando cenários de variação climática, uso do solo e avanço da mineração;

- b) Quantificar a descarga sólida e líquida afluyente à Laguna dos Patos em valores médios mensais até 2050, considerando cenários de variação climática, uso do solo e avanço da mineração;
- c) Mapear a distribuição dos sedimentos de fundo do Baixo Jacuí e Lago Guaíba para diferentes cenários de uso do solo e exploração de areia, conforme o tamanho, a maturidade textural e a composição da fração arenosa;
- d) Estabelecer o padrão de escoamento e transporte de sedimentos no Lago Guaíba, superficial e de coluna, para diferentes situações de contorno para parâmetros como descarga líquida afluyente, regime de ventos, oscilação da maré e alterações provocadas pela mineração e pela dragagem para manutenção da hidrovia;
- e) Identificar pontos ótimos de monitoramento para aprimoramento da modelagem, e controle e fiscalização para a atividade de mineração de areia no Lago Guaíba, com frequência ótima de amostragem, parâmetros a serem avaliados e forma de avaliação (direta ou indireta);
- f) Estabelecer critérios operacionais para o licenciamento ambiental da atividade de mineração.

1.2 PRODUÇÃO E TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

Sedimentos são materiais erodidos e suscetíveis de transporte e deposição. Conceitua-se como sedimentação os processos que contemplam a erosão, transporte realizado pelos rios e a deposição do sedimento (CARVALHO, 1994; SANTOS *et al.* 2001).

A erosão é um processo natural de desgaste das rochas e solos, com desagregação, deslocamento ou arrastamento das partículas por ação da água e de outros agentes. Ela ocorre em rios, solos, formações geológicas, ou seja, é um processo responsável pela dinâmica da paisagem. Dado a existência de erosão, há material disponível para os processos de transporte e deposição. Entre os problemas causados por processos erosivos indicados por Carvalho (1994), destacam-se:

- Erosão nas cabeceiras de rios causa a destruição de nascentes;
- Aumento do risco de desertificação;
- Empobrecimento do solo devido a remoção da camada fértil;
- Alteração das condições de escoamento da água na superfície e nas calhas dos rios;
- Assoreamento de canais e reservatórios.

As estimativas de perdas de solo por erosão podem ser realizadas por meio de equações, como a Equação Universal de Perdas de Solo (USLE), apresentada na equação abaixo. Por conta da simplicidade dos parâmetros envolvidos e da facilidade de implantação distribuídas, a USLE é bastante utilizada. Entretanto, é importante ressaltar que ela é um modelo empírico, e como todo modelo deste tipo, apresenta dificuldades em generalizar os resultados, o que inviabiliza a utilização em determinadas regiões (SANTOS *et al.* 2001).

$$A = R.K.LS.C.P$$

Onde:

A → perda de solo calculada por unidade de área (t/ha.ano);

R → índice de erosividade da chuva;

K → fator de erodibilidade do solo;

LS → fator topográfico;

C → fator de uso e manejo;

P → fator de prática conservacionista.

Devido às limitações da USLE, outras equações para estimativa da produção de sedimentos foram desenvolvidas. Destaca-se aqui a Equação Universal da Perda de Solos Modificada (MUSLE). Nesta equação, o índice de erosividade da chuva é substituído por informações do hidrograma de uma chuva isolada. O resultado é o aporte de sedimentos no exutório da bacia para cada evento de chuva (SANTOS *et al.* 2001).

A concentração de sedimentos em suspensão apresenta alta variabilidade temporal devido as variações de descarga líquida e aporte de sedimentos, que normalmente apresentam valores maiores conforme os períodos de cheias (ANDRADE NETO *et al.* 2012).

Conforme Carvalho (1994), o conhecimento sobre transporte de sedimentos é de fundamental importância para estudos ambientais em bacias hidrográficas. Os sedimentos que chegam aos canais fluviais têm granulometria diversa, o que resulta em transportes variados de acordo com as condições locais e do escoamento. Para Santos *et. al* (2001), no processo de transporte de sedimentos, pode-se distinguir três tipos de cargas: dissolvida, em suspensão e do leito.

A carga dissolvida é composta por material intemperizado de rochas e solos, transportado em solução química. Em geral, o escoamento subterrâneo possui maior contribuição no transporte. Entretanto, em determinadas situações, a exemplo de carreamento de fertilizantes, o escoamento superficial apresenta considerável contribuição. Neste contexto, a quantidade de material em solução depende das contribuições da água subterrânea e do escoamento superficial na descarga líquida do rio (SANTOS *et. al*, 2001).

Dada a relação entre o tipo de escoamento e a carga dissolvida, nota-se uma relação inversa entre descarga líquida e carga dissolvida. Nas cheias, as vazões são compostas por parcela significativa de escoamento superficial, que possui carga dissolvida menor por unidade de volume. Na ocorrência de vazões baixas, a contribuição subterrânea, que apresenta maior concentração de sais dissolvidos, é a única a existir (SANTOS *et. al*, 2001).

Para Santos *et. al* (2001), a carga em suspensão é formada por partículas como silte, argila e pequenas areias, que são pequenas o suficiente para que sejam transportadas pelo fluxo turbulento em conjunto com a água na forma de uma solução heterogênea. Importante ressaltar que a distinção entre a carga em suspensão e carga do leito fundamenta-se mais no mecanismo de transporte do que no tamanho da partícula. O transporte de carga em suspensão só é possível porque as forças da turbulência do fluido superam a ação da gravidade, o que impede a deposição das partículas. Caso a velocidade do fluxo seja reduzida, não há mais energia para manutenção das partículas em suspensão e elas serão depositadas, geralmente em águas calmas, planícies, lagos, etc. Neste contexto, ocorre uma boa correlação direta entre valor da descarga líquida e concentração de material em suspensão quando os dados são obtidos na mesma seção transversal.

A carga do leito de um rio é composta por partículas de granulometria maior, como areias e cascalhos. Essas partículas permanecem no fundo do canal e são transportadas através

de saltação e arraste. Dado o volume e densidade das partículas e velocidade do fluxo menor junto ao fundo, a velocidade de transporte da carga do leito é mais lenta que a do fluxo (SANTOS *et. al*, 2001).

As partículas em saltação estão próximas ao leito, formando uma espécie de camada adjacente, configurando-se como uma camada de transição entre a carga do leito que está sempre em contato com o fundo do canal e as partículas transportadas em suspensão (SANTOS *et. al*, 2001).

Segundo Santos *et. al* (2001), o transporte por arraste ocorre com o deslizamento/rolamento de partículas maiores ao longo do leito, em sentido jusante, sempre em contato com o leito.

A estimativa da quantidade de material transportado como carga do leito com base somente na descarga sólida em suspensão não apresenta bons resultados, dado que a relação varia em função de condições locais do fluxo e da quantidade e natureza dos sedimentos. Em geral, em rios que transportam, em sua maioria, areais e cascalhos, a carga do leito pode corresponder a aproximadamente metade do volume total transportado (SANTOS *et. al*, 2001).

Ainda em relação ao transporte de sedimentos, Carvalho (1994) aponta diversas consequências, com destaque para:

- As partículas em suspensão comprometem usos consuntivos da água, causando aumento no custo de tratamento. Os sedimentos também podem comprometer a água destinada a diversos usos, sejam eles consuntivos ou não consuntivos;
- O aumento da turbidez dificulta a penetração de luz e calor, reduzindo a fotossíntese, o que compromete a vida aquática e a salubridade dos corpos hídricos;
- Os sedimentos podem carregar outros poluentes, como nutrientes químicos, inseticidas, herbicidas e metais pesados.

O depósito de sedimentos pode ocorrer próximo ou distante do local de erosão. Os depósitos podem ocorrer em locais planos, canais, planícies de inundação, reservatórios, deltas, estuários e no oceano. Carvalho (1994) aponta alguns problemas, a saber:

- Depósitos em reservatórios podem provocar assoreamento, reduzindo o volume de água, a regularização do canal fluvial e a vida útil do reservatório;
- Canais fluviais podem ser assoreados, prejudicando a navegação e aumentando o risco de enchente pela redução da capacidade do canal;
- Em canais assoreados, a água em nível mais elevado pode provocar erosão das margens, contribuindo para o aumento de sedimento disponível;
- O depósito de sedimentos em áreas produtivas compromete o desenvolvimento da agricultura;
- Os diques naturais localizados nas margens de rios costumam apresentar material fino na base, o que diminui a permeabilidade do solo e favorece a formação de áreas saturadas na zona de várzea.

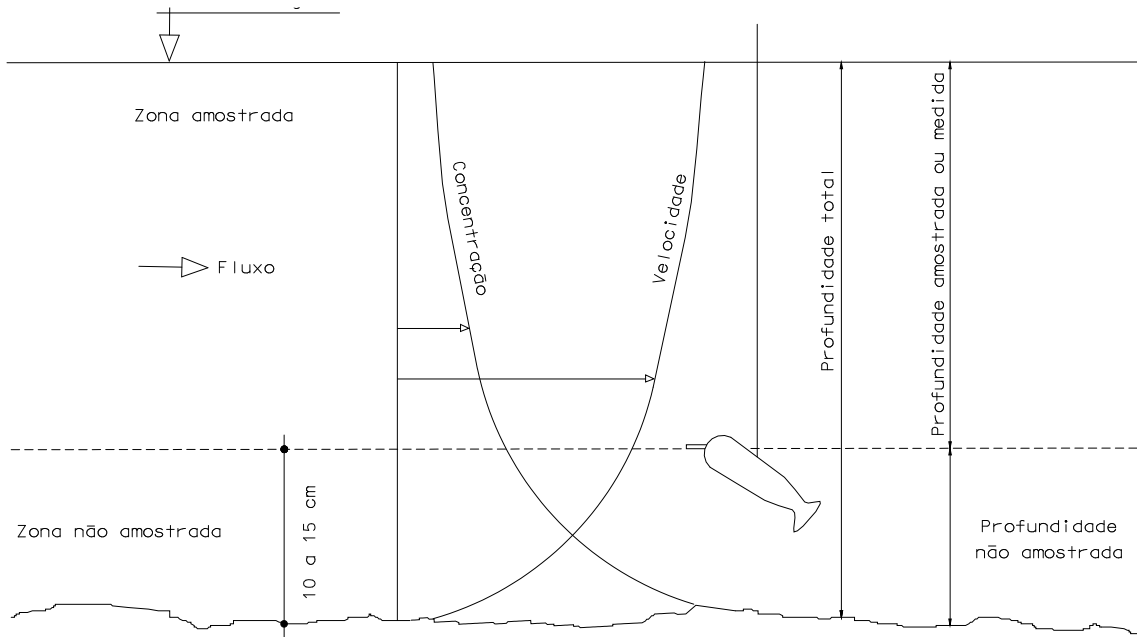
1.2.1 MEDIÇÃO DOS SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO E NO LEITO

A descarga sólida total é considerada como sendo composta de duas parcelas distintas: descarga sólida em suspensão e descarga sólida do leito (t/dia). A medição da descarga em suspensão e da descarga no leito são feitas separadamente porque estas partículas estão sujeitas a forças de resistência ao seu movimento enquanto aquelas estão livres no meio líquido (CARVALHO *et al.* 2000). Enquanto a descarga sólida em suspensão apresenta maiores quantidades de partículas finas, como argilas e siltes, na carga sólida do leito encontra-se o material grosso, como areias e pedregulhos.

A medida direta do transporte de sedimentos em cursos de água pode ser feita de várias formas, sendo mais comum o emprego de técnicas de amostragem que permitem, a partir de sua análise, o cálculo do volume transportado. A amostragem de sedimentos é feita com o objetivo de se obter amostras representativas na seção transversal do curso de água, com amostradores padronizados e usando técnicas apropriadas (CARVALHO *et al.* 2000).

A finalidade da amostragem é definir a tipologia e a concentração do material que é transportado no momento da medição do transporte de sedimentos. Devido às diferenças nas características de transporte do sedimento em suspensão e de fundo, resultando em medições distintas, os equipamentos, bem como as técnicas de amostragem são também diferentes. A FIGURA 1 ilustra a região amostrada, que corresponde ao transporte de sedimentos em suspensão, e não amostrada, correspondente ao transporte de sedimentos de fundo, em uma vertical de medição. A **descarga sólida em suspensão** medida é, por definição, o produto da concentração de sedimentos em suspensão pela descarga líquida medida no momento da amostragem.

FIGURA 1 - ZONAS DE AMOSTRAGENS, MEDIDA E NÃO MEDIDA, EM UMA VERTICAL DE MEDIÇÃO (SANTOS *et al.* 2001)



A **descarga sólida do leito** pode ser obtida a partir de dados medidos diretamente ou calculada de forma indireta. No cálculo indireto da descarga sólida são utilizadas diversas equações semi-empíricas que usam informações auxiliares, como: concentração e granulometria do material em suspensão, natureza e granulometria do material de fundo e informações relativas às condições de escoamento na seção de medição.

As dificuldades operacionais nas medições diretas de descarga sólida do leito fizeram com que as pesquisas no campo teórico e experimental evoluíssem bastante. Para a determinação indireta da descarga sólida de leito existem diversas equações, com distintas exigências de informações complementares para aplicação. Dentre eles, tem-se o Método de Engelund & Hansen (1967), Método de Yang (1973), o Método de Ackers & White (1973), dentre outros. Todos estes métodos necessitam da granulometria do material do leito para a estimativa indireta da descarga sólida do leito. No Brasil, estas informações não são monitoradas, o que limita a utilização destes métodos na modelagem hidrossedimentológica, na qual é necessária a estimativa das séries históricas de descarga sólida através de curvas de descargas sólidas, para a calibração e validação dos modelos.

O Método Simplificado de Colby (1957) utiliza ábacos e dados de descarga líquida, velocidade média, profundidade média, largura da seção e concentração medida de sedimentos em suspensão. No contexto nacional, este método torna-se interessante devido ao monitoramento sistemático e disponibilização destas informações no portal *HIDROWEB*, da Agência Nacional de Águas. O levantamento das informações é realizado em campanhas de campo que ocorrem em média 3 vezes por ano, possibilitando, portanto, o conhecimento da descarga sólida nas diferentes condições de sazonalidade, nos períodos de cheias e períodos de secas.

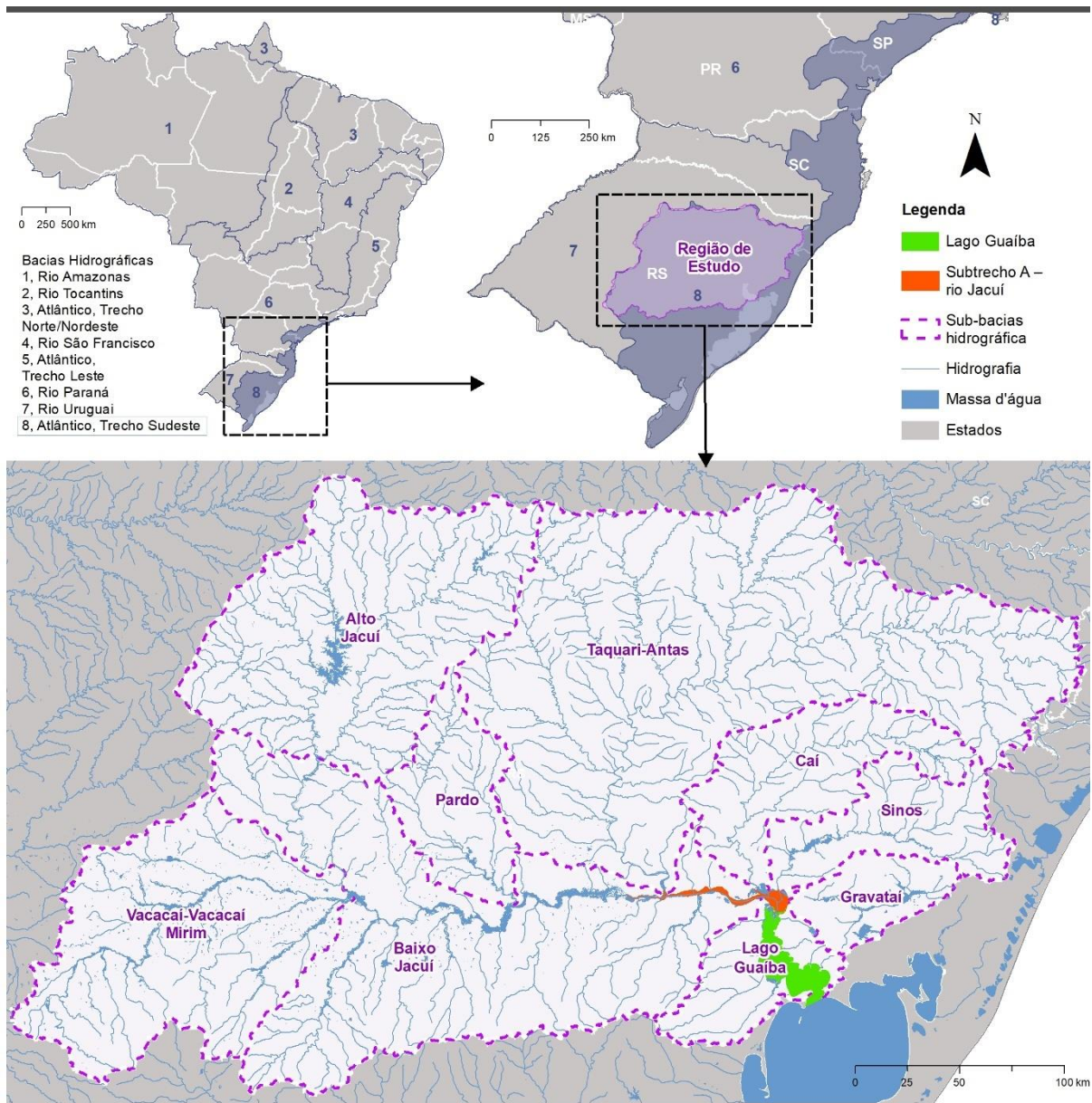
1.3 A REGIÃO HIDROGRÁFICA DO GUAÍBA

O Estado do Rio Grande do Sul é dividido em três grandes regiões hidrográficas (Lei Estadual nº 10.350, de 1994), sendo uma delas a Região Hidrográfica do Guaíba. A Região Hidrográfica do Guaíba é localizada na porção central do Estado, com área de 84.555 km², e é integrada por nove bacias hidrográficas: Gravataí, Sinos, Caí, Taquari-Antas, Pardo, Alto Jacuí, Vacacaí-Vacacaí Mirim, Baixo Jacuí e Lago Guaíba (PERH, 2006). A FIGURA 2 apresenta a localização da região hidrográfica do Guaíba.

A Bacia Hidrográfica do Lago Guaíba, situada na região leste do Estado, possui área total de 2.973,1 km² e abrange total ou parcialmente 14 municípios, dentre eles o município de Porto Alegre, que concentra a maior densidade demográfica do Estado, com cerca de 2.511,27hab/km² (PBH – LAGO GUAIBA, 2016). O Lago constitui um corpo d'água de

fundamental importância para o Estado do Rio Grande do Sul, sendo manancial de abastecimento para quase 1,5 milhões de pessoas, além de servir como área de mineração de areia, diluição de efluentes domésticos, agrícolas, industriais, área de lazer, dentre outros (PAZ, *et al.* 2005).

FIGURA 2 – LOCALIZAÇÃO DA REGIÃO HIDROGRÁFICA DO GUAÍBA



1.3.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO LAGO GUAÍBA

A bacia hidrográfica do Lago Guaíba é constituída predominantemente por rochas cristalinas do Escudo Sul-Riograndense e as formações sedimentares associadas à evolução sedimentar da Planície Costeira Interna (PBH – LAGO GUAIBA, 2016). As rochas do Escudo Cristalino são representadas por granitos, gnaisses graníticos, diques riolíticos e litotipos metamórficos e as formações sedimentares são constituídas por sedimentos arenosos, aluviões e coluviões nas encostas dos morros e baixadas, e rochas proterozóicas nas regiões mais elevadas da bacia (PBH – LAGO GUAIBA, 2016).

Os parâmetros climáticos, composição mineralógica e de relevo na região do Guaíba propiciam condições favoráveis a intemperização e erosão das rochas, o que fornece volumes expressivos de sedimentos que são transportados para o Guaíba, sendo a deposição destes sedimentos condicionada principalmente pelo nível de energia das correntes e de ondas do Lago (BACHI *et al.* 2004).

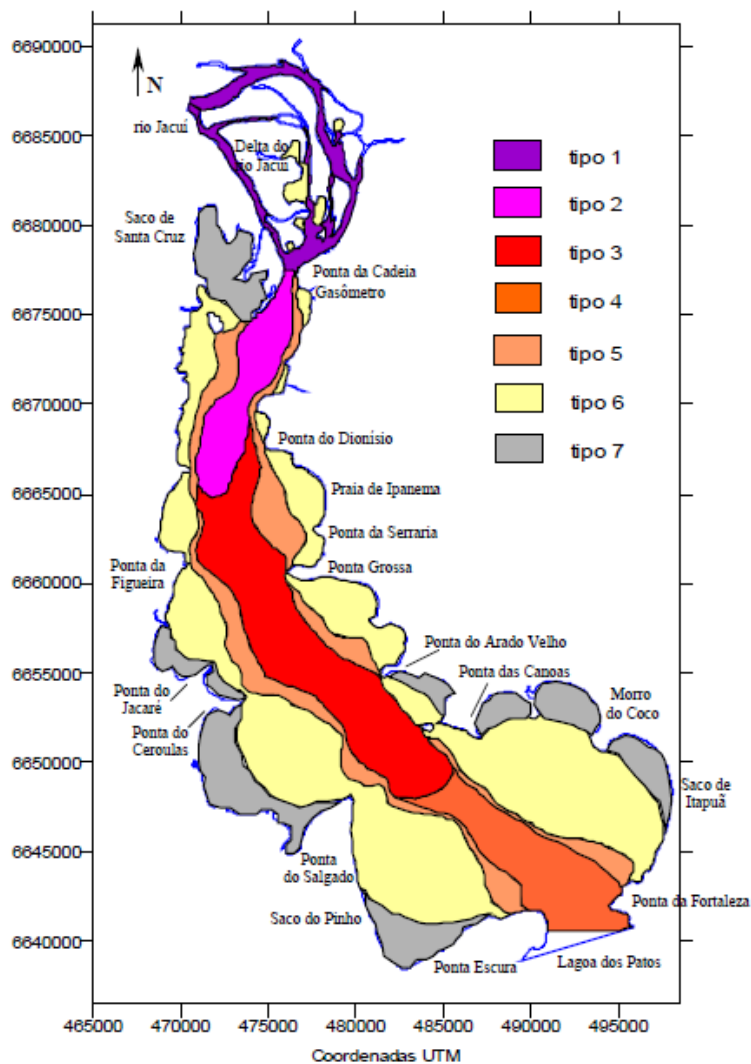
Neste item são apresentados os resultados de alguns estudos realizados na Bacia Hidrográfica do Lago Guaíba que servirão para consolidar o conhecimento da hidrologia e dos sedimentos da região. A calibração e validação do modelo hidrossedimentológico SWAT e do modelo hidrodinâmico Delft3D dependem de séries históricas representativas. Os dados de granulometria dos sedimentos dos estudos secundários e dos processos de licenciamento, disponibilizados pela contratante, são pontuais, não sendo possível a obtenção de séries históricas representativas. As amostragens realizadas nestes estudos serão utilizadas, portanto, para complementar a verificação dos modelos e cenários e comparar os resultados obtidos pontualmente.

A simulação hidrodinâmica bidimensional do Lago Guaíba, realizado por PAZ *et al.* (2005), possibilitou a identificação de padrões de circulação da água e a segmentação do Lago em sete regiões que apresentam comportamento hidrodinâmico semelhante, conforme a FIGURA 3. Estas regiões são descritas conforme:

- **Região 1:** apresenta velocidades do escoamento em torno de 0,1 m/s;
- **Região 2:** apresenta as velocidades do escoamento mais elevadas em todo o Lago Guaíba;

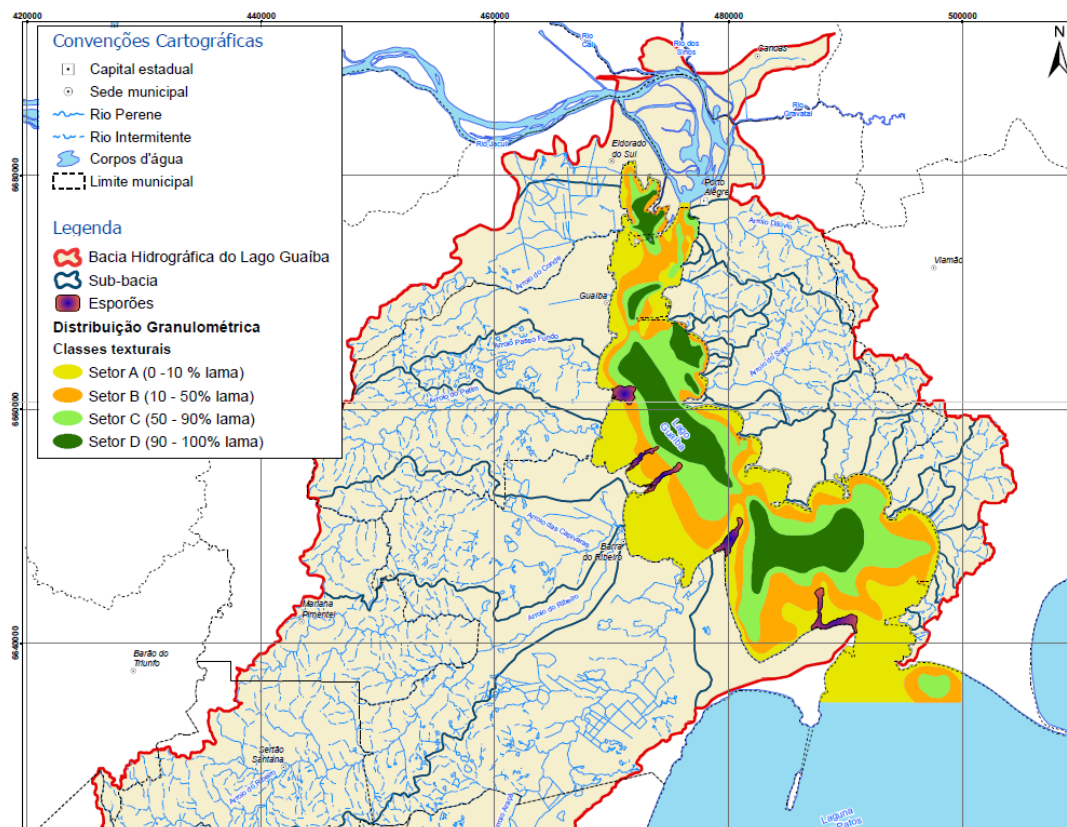
- **Região 3:** velocidades altas, porém inferiores às da região 2;
- **Região 4:** velocidades de escoamento inferiores a região 3;
- **Região 5:** área estreita nas laterais do canal de navegação onde há uma mudança significativa na velocidade do escoamento em relação ao canal;
- **Região 6:** zonas de velocidades baixas (cerca de 0,03 m/s) que ocupam a maior área do lago.
- **Região 7:** zonas onde há praticamente estagnação do fluxo, com velocidades inferiores de 0,01 m/s.

FIGURA 3–SEGMENTAÇÃO DO LAGO GUAÍBA EM SETE TIPO REGIÕES COM BASE NO PADRÃO DE CIRCULAÇÃO DA ÁGUA (PAZ *et al.* 2005).



O estudo realizado por Bachi *et al.* (BACHI *et al.* 2004) permitiu o zoneamento dos sedimentos do leito do Lago em quatro setores, A, B, C e D, tendo o conteúdo de areia contido para cada setor em: 90 a 100%; 50 a 90%, 10 a 50% e 0 a 10%, respectivamente. Este zoneamento está apresentado na FIGURA 4, adaptado do Plano de Bacia Hidrográfica do Lago Guaíba (PBH – LAGO GUAIBA, 2016). Segundo o estudo, há uma maior deposição de silte, argila e matéria orgânica a partir da isóbota de 3 metros, sendo o fundo arenoso na linha costeira. Os sedimentos finos nas áreas mais rasas são constantemente ressuspensos pela turbulência das ondas causadas pela ação dos ventos (BACHI *et al.* 2004; NICOLODI, 2007).

FIGURA 4 - AGRUPAMENTO DA DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DE ACORDO COM A ENERGIA DEPOSICIONAL DO SISTEMA (adaptado de PBH – LAGO GUAIBA, 2016; BACHI *et al.* 2000).



No estudo realizado por ANDRADE NETO *et al.* (2012) os resultados demonstraram a maior contribuição da descarga de sólidos suspensos ocorre em condições de descargas líquidas moderadas (1.000 e 3.000 m³/s), diferentemente de outros sistemas fluviais, na qual

os eventos de alta descarga são responsáveis pela maior parte da descarga de sólidos anuais. Os autores concluíram que os maiores valores de descarga obtidas nos últimos meses do período chuvoso não correspondem aos maiores picos de descarga sólida suspensa devido ao processo de exaustão, na qual no início da temporada de chuvas os sedimentos das encostas são mais facilmente erodidos pelo escoamento e os sedimentos que são transportados pelo fluxo passam a ser oriundos do retrabalhamento das margens e do leito (LADANZA, 2006, apud ANDRADE NETO et al., 2012). O valor médio de descarga sólida transportada para a Laguna dos Patos entre 2003 e 2006 foi da ordem de $1,1 \times 10^6$ toneladas por ano, representando uma exportação de cerca de 2.650 kg/m^3 de sedimentos para os sistemas deposicionais lagunares.

O estudo realizado por Andrade (2018) avaliou a poluição dos sedimentos superficiais do Lago Guaíba através da amostragem de 12 pontos localizados na margem esquerda do Lago, dentre as cidades de Porto Alegre e Viamão. Em relação a granulometria, todas as amostras apresentaram tamanho de partícula predominante de areia. Em relação à poluição, as amostras que apresentaram maiores concentrações de metais pesados, carbono, nitrogênio e fósforo estão localizadas próximo a foz dos rios urbanos poluídos, indicando poluição pontual (ANDRADE, 2018).

O relatório de monitoramento hidrossedimentométricos do rio Jacuí do ano de 2017, com nº do processo 5028_16-9, apresentou medições de descarga líquidas, sólidas em suspensão e sólidas de arrasto ao longo do rio Jacuí. As maiores descargas sólidas totais foram observadas no mês de agosto de 2017, com média de 12.720,60 toneladas por dia, sendo a proporção média de 99,2% de sedimentos em suspensão e 0,8% de sedimentos do leito. Já as menores descargas sólidas foram observadas no mês de novembro de 2017, com média de 1.510,81 toneladas por dia, sendo 100% dos sedimentos em suspensão (nº processo 5028_16-9, 2017).

1.4 MODELO HIDROLÓGICO SWAT

Os processos hidrossedimentológicos ocorrem devido a complexa interação de variáveis do ciclo hidrológico e da paisagem. Monitorar de forma adequada todos os

processos envolvidos e realizar avaliações detalhadas das respostas do sistema são tarefas que, na prática, mostram-se praticamente impossíveis de se realizar.

Neste contexto, a representação dos processos hidrossedimentológicos por ferramentas, como a modelagem hidrossedimentológica, auxilia no entendimento do comportamento de variáveis do ciclo hidrológico e da dinâmica da paisagem.

Conforme Tucci (2005), modelo hidrológico é uma das ferramentas que a ciência desenvolveu, com o objetivo de melhorar o entendimento e representação do comportamento da bacia hidrográfica e prever condições diferentes das atuais, ou seja, simular cenários.

O SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) é um modelo matemático de domínio público desenvolvido a partir de 1996 nos EUA pelo *Agricultural Research Service* e pela *Texas A&M University* e incorpora grande parte dos avanços obtidos em modelos anteriores.

Conforme NEITSCH *et al.* (2002), o SWAT em seu desenvolvimento foi incorporando várias características contidas em modelos anteriores. O modelo tem por objetivo prever o efeito das ações de uso e manejo do solo sobre os recursos hídricos, produção de sedimentos, produção de nutrientes e pesticidas, sendo aplicado em pequenas e grandes bacias. É distribuído, ou seja, tem as suas variáveis e parâmetros dependendo do espaço e do tempo. A modelagem pode ser efetuada em intervalos de tempo sub-diários, diários, mensais e anuais.

Para alcançar os objetivos propostos pelo modelo, de acordo com NEITSCH *et al.* (2002), o SWAT tem as seguintes características:

- É fisicamente baseado, ao invés de utilizar equações de regressão para descrever as relações entre as variáveis de entrada e saída, o modelo requer informações específicas sobre clima, propriedades dos solos, topografia, vegetação, e práticas de manejo na bacia. Os processos físicos associados com a dinâmica da água e dos sedimentos, crescimento da vegetação, ciclo de nutrientes, etc., são modelados a partir da utilização dos dados de entrada. Pode-se questionar esta classificação, pois modelos fisicamente baseados não necessitam de calibragem. Portanto, entende-se aqui o SWAT como um modelo que também tem características de conceitual;

- É computacionalmente eficiente. As simulações de grandes bacias ou a variedade de estratégias de manejo podem ser realizadas sem muito custo de tempo e recursos, e;
- Permite o estudo de impactos ambientais que são visíveis somente através de uma avaliação realizada em um longo período de tempo;
- É distribuído, ou seja, permite a divisão da bacia hidrográfica em diversas sub-bacias ou unidades de resposta hidrológica (HRU). As HRU's são produtos da combinação da declividade, tipo de solo e uso do solo.

Em relação aos sedimentos, modelagem distribuída da produção e transporte de sedimentos é importante em estudos ambientais, dado que permite localizar espacialmente áreas com processos erosivos mais acentuados, favorecendo a tomada de decisões. A modelagem também permite estimar quantitativamente a variação na carga de sedimentos provocada por alterações no uso do solo, prevendo assim impactos das modificações na bacia.

Dada as inúmeras equações que são utilizadas pelo modelo SWAT nas simulações de vazões e sedimentos, optou-se por apresentar as equações de produção de água e de sedimentos.

A produção de água no SWAT é representada pela equação do balanço hídrico de Neitsch *et al.* (2002), conforme:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - w_{seep} - Q_{gw})$$

Onde:

SW_t → a umidade final do solo

SW_0 → umidade inicial do solo em mm

t → tempo em dias

R_{day} → precipitação diária em mm

Q_{surf} → o escoamento superficial em mm

E_a → evapotranspiração diária em mm

w_{seep} → a percolação em mm

Q_{gw} → escoamento de retorno em mm

i → o passo de tempo em dia.

O modelo SWAT calcula a erosão com uso da MUSLE, onde o fator de erosividade da chuva da USLE foi substituído pelo fator de escoamento superficial. A produção de sedimento é dada pela seguinte equação.

$$sed = 11,8 \cdot (Q_{surf} \cdot q_{peak} \cdot area_{hru})^{0,56} \cdot K_{USLE} \cdot C_{USLE} \cdot P_{USLE} \cdot LS_{USLE} \cdot CFRG$$

Onde:

sed → produção de sedimento diária (t/dia)

Q_{surf} → escoamento superficial (mm/ha)

q_{peak} → taxa de escoamento de pico (m³/s)

$area_{hru}$ → área de drenagem da sub-bacia ou da unidade de resposta hidrológica (ha)

K_{USLE} → fator de erodibilidade do solo

C_{USLE} → fator de uso e manejo do solo

P_{USLE} → fator de práticas conservacionistas

LS_{USLE} → fator topográfico

$CFRG$ → fator ligado a rugosidade da superfície inversamente proporcional a pedregosidade do solo

Desta forma, a aplicação do modelo para avaliar o aporte de sedimentos da região hidrográfica do Guaíba, pretende ofertar à sociedade subsídios para o entendimento da dinâmica hidrossedimentológica da região e contribuir para o Zoneamento Ambiental do Lago Guaíba.

1.5 MODELO HIDRODINÂMICO DELFT3D

O modelo hidrodinâmico Delft3D, desenvolvido pela WL-Delft Hydraulics, instituto de pesquisa holandês, é composto por um conjunto de programas (módulos), com capacidade de simulação de escoamentos de massas de águas superficiais. Possui uma estrutura flexível que simula fluxos em duas ou três dimensões, assim como ondas, qualidade da água, ecologia, transporte de sedimento e morfologia do fundo, com a capacidade de interação entre estes processos.

Os módulos que compõem o Delft3D são: FLOW (Hidrodinâmico); WAVE (Ondas); SED (transporte de sedimentos); MOR (Morfodinâmica); WAQ (Qualidade de água); PART

(Traçadores); ECO (Ecologia) e CHEM (Química), estes módulos possuem ferramentas de pré-processamento, processamento e pós-processamento, o que facilita o trabalho de implementação de modelos para uma região específica (HYDRAULICS, 2014).

Para o propósito deste estudo serão utilizados os módulos FLOW e SED, com o intuito de analisar o comportamento da hidrodinâmica e o transporte de sedimentos nos locais de interesse. Durante a etapa de calibração, testes serão realizados para analisar a ação das ondas na hidrodinâmica e no transporte de sedimentos nas áreas de interesse. Caso seja comprovada a necessidade de se considerar esta forçante nos modelos, o módulo WAVE também será utilizado, e descrito em detalhes no relatório referente a modelagem hidrodinâmica e transporte de sedimentos.

1.5.1 DELFT3D – FLOW

O Delft3D-FLOW foi desenvolvido para uma série de aplicações, podendo ser utilizado para: estudos de correntes geradas por marés (forçante barotrópica) e/ou ventos; gradientes horizontais de densidade gerados pelo balanço entre as águas doces dos rios e salgadas do oceano; transporte de materiais dissolvidos e poluentes, além de circulações em regiões costeiras, permitindo a simulação com barreiras físicas, como ilhas e obras costeiras.

1.5.1.1 EQUAÇÕES HIDRODINÂMICAS DO DELFT3D – FLOW

O Delft3D-FLOW simula processos hidrodinâmicos resolvendo as equações de Navier-Stokes e da conservação da massa para fluidos incompressíveis além da equação do transporte de massa para cada constituinte de qualidade da água ou de processos nos sedimentos.

O módulo hidrodinâmico (FLOW), é capaz de realizar simulações em duas (2D) ou três (3D) dimensões de fluxos instáveis, sendo usado para prever fluxos em áreas costeiras, estuários, rios, lagoas e lagos. Se o fluido é verticalmente homogêneo, é utilizado um modelo 2D, onde é considerada apenas uma camada do fluido. Já nas situações em que os campos de fluxos mostram variações significativas na vertical é utilizado um modelo 3D (HYDRAULICS, 2014). Para análise da dispersão dos sedimentos na coluna d'água, um dos objetivos deste estudo, as simulações serão realizadas em três dimensões (3D).

O Delft3D aplica a chamada transformação da coordenada σ ou profundidade adimensional, de modo a tornar a dimensão vertical independente da profundidade, e desta forma evitar que os elementos de grades interceptam a topografia do fundo (MIRANDA *et al.* 2002;). A coordenada σ é definida como:

$$\sigma = \frac{z - \zeta}{d + \zeta} = \frac{z - \zeta}{H}$$

Onde:

$z \rightarrow$ Coordenada vertical no espaço físico (m);

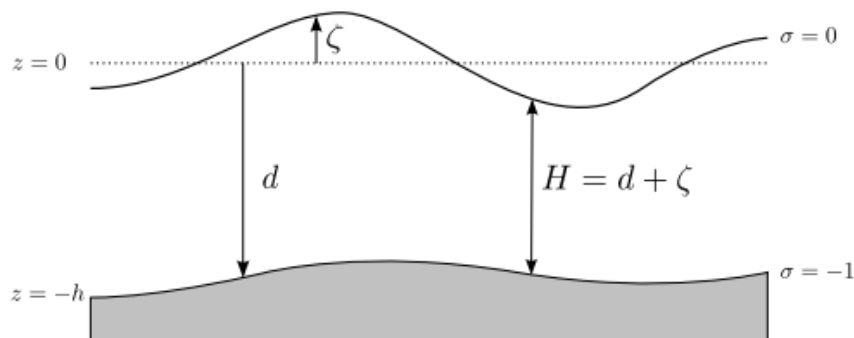
$\zeta \rightarrow$ Elevação da superfície livre acima do plano de referência (m);

$d \rightarrow$ Profundidade da coluna d'água abaixo do plano de referência (m);

$H \rightarrow$ Profundidade total da coluna d'água (m).

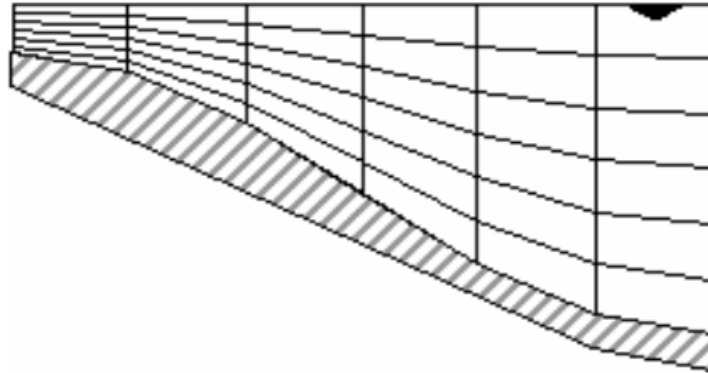
Sendo considerado no fundo $\sigma = -1; z = -h$ e na superfície livre $\sigma = z = 0$ (FIGURA 5).

FIGURA 5 -DEFINIÇÃO DO NÍVEL DA ÁGUA (ζ), PROFUNDIDADE (h) E PROFUNDIDADE TOTAL (H) (HYDRAULICS, 2014).



No sistema de coordenadas σ o número de camadas no plano horizontal é o mesmo em todos os locais (FIGURA 6) e para cada camada um conjunto de equações de conservação é resolvido.

FIGURA 6 - EXEMPLO DE UMA GRADE EM COORDENADAS σ (HYDRAULICS, 2014).



As equações governantes para um fluido incompressível de superfície livre são relacionadas com as leis de conservação da física: Conservação da massa e conservação de momentum. Como já citado, as equações são derivadas do sistema de equações de Navier-Stokes para um fluido incompressível de superfície livre. As equações do movimento e da continuidade, integradas na vertical, são resolvidas levando em conta as aproximações para águas rasas de Boussinesq. E os campos de velocidade e de elevação da superfície são obtidos pela solução da equação de Navier-Stokes abaixo e da continuidade (HYDRAULICS, 2014; BERNARDO, 2013; LOPES, 2010).

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} - fv = g \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu H \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\nu_v \frac{\partial u}{\partial z} \right]$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} + fu = g \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \nu_H \left[\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\nu_v \frac{\partial v}{\partial z} \right]$$

$$\frac{\partial P}{\partial z} = \rho(x, y, z)g$$

Onde:

x, y, z → Coordenadas espaciais.

u, v, w → Componentes de velocidade nas direções x, y e z (m.s-1);

t → Tempo (s);

f → Parâmetro de Coriolis $f = 2\Omega \text{seno}\Theta$, onde Ω é a taxa de rotação e Θ a latitude;

g → Aceleração da gravidade (m/s²);

H → Altura da coluna d'água (m);

ρ → Densidade do fluido (kg.m-3);

P → Pressão hidrostática (N.m-1);

ν_H e ν_V → Viscosidade turbulenta na horizontal e na vertical, respectivamente.

1.5.2 DELFT3D – SED

Para os cálculos de transporte de sedimentos, o modelo numérico analisa as características do leito, assim como a concentração de sedimentos em suspensão. Estes sedimentos podem ser coesivos, não-coesivos, ou a combinação de ambos.

1.5.2.1 EQUAÇÕES HIDRODINÂMICAS DO DELFT3D – SED

A equação da advecção-difusão (balanço de massa), empregada no transporte de sedimentos, é representado no modelo pela equação abaixo (DELTARES, 2012).

$$\frac{\partial(d+\zeta)c}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G\xi\xi}\sqrt{G\eta\eta}} \left\{ \frac{\partial[\sqrt{G\eta\eta}(d+\zeta)uc]}{\partial \xi} + \frac{\partial[\sqrt{G\xi\xi}(d+\zeta)vc]}{\partial \eta} \right\} + \frac{\partial wc}{\partial \sigma} = \frac{(d+\zeta)}{\sqrt{G\xi\xi}\sqrt{G\eta\eta}} \left(\frac{\partial}{\partial \xi} \left(D_H \frac{\sqrt{G\eta\eta}}{\sqrt{G\xi\xi}} \frac{\partial c}{\partial \xi} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(D_H \frac{\sqrt{G\xi\xi}}{\sqrt{G\xi\xi}} \frac{\partial c}{\partial \eta} \right) \right) + \frac{1}{(d+\zeta)} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(D_V \frac{\partial c}{\partial \eta} \right) - \lambda_d(d+\zeta)c + S_{fs}$$

Onde:

D_H → Coeficiente de difusão horizontal;

D_V → Coeficiente de difusão vertical;

λ_d → Primeira ordem do processo de deposição;

S_{fs} → Termo “fonte” e “sumidouro” por unidade de área, devido à entrada ou saída de fluxo, detalhado em (DELTARES, 2014).

O modelo considera que a velocidade de sedimentação sofre efeito por conta da concentração. Neste tipo de sistema, a velocidade sedimentação W_s é determinada pela velocidade de queda, na mistura fluido/sedimento, em função da concentração de sedimentos (RIJN e WALSTRA, 2003). A Equação abaixo mostra a relação considerada para um sedimento l :

$$W_s^{(l)} = 1 - \frac{c_s^{tot}}{c_{ref}} W_{s,0}^{(l)}$$

Onde:

c_{ref} → Concentração de referência (dado de entrada);

c_s^{tot} → Concentração total, a partir da massa total de sedimentos;

$W_{s,0}^{(l)}$ → Velocidade de sedimentação específica para a fração de sedimentos (l).

Os coeficientes de difusão turbulenta para o sedimento ($\varepsilon_{s,x}, \varepsilon_{s,y}, \varepsilon_{s,z}$) dependem das características do escoamento (nível de turbulência) e influência de ondulações no fundo (em decorrência de cisalhamento). Para cada uma das interfaces que delimitam as camadas, obtêm-se os coeficientes de viscosidade turbulenta, como resultado de um submodelo de turbulência fechado (RIJN e WALSTRA, 2003).

O Delft3D apresenta diferentes submodelos de turbulência. Nesse estudo será utilizado o submodelo, o mais utilizado na literatura (SILVA, 2004), conhecido como modelo de turbulência $k - \varepsilon$. Utilizando o submodelo de turbulência $k - \varepsilon$, o coeficiente de difusão turbulenta para o sedimento (ε_s) pode ser obtido diretamente dos coeficientes de difusão turbulenta do fluido (ε_f) resultante do modelo de fechamento turbulento (DELTARES, 2014).

Os processos de erosão e sedimentação dependem do nível energético, o qual é uma função do volume de água e da descarga líquida. Quanto mais energético é o fluxo de água, maior a probabilidade de erodir o fundo e suas laterais. Em contrapartida, a perda parcial (ou temporária) de energia estimula a sedimentação de uma parcela do material em suspensão. Sedimentos coesivos e sedimentos não-coesivos apresentam comportamentos distintos para essas situações. Para frações de sedimentos coesivos, os fluxos entre a corpo d'água e o leito, são calculados conforme as formulações de Partheniades-Krone 15 (DELTARES, 2012):

$$E^{(l)} = M^{(l)} S(\tau_{cw}, \tau_{cr,e}^{(l)}) \quad \rightarrow \quad \text{Fluxo Erosivo}$$

$$D^{(l)} = W_s^{(l)} c_b^l S(\tau_{cw}, \tau_{cr,d}^{(l)}) \quad \rightarrow \quad \text{Fluxo de Deposição}$$

$$c_b^l = c^{(l)} \left(z = \frac{\Delta z_b}{z}, t \right) \quad \rightarrow \quad \text{Concentração média próxima a camada de fundo}$$

Onde:

$E^{(l)}$ → Fluxo erosivo ($\text{kg/m}^2/\text{s}$), para fração de sedimento l ;

$M^{(l)}$ → Parâmetro erosivo ($\text{kg/m}^2/\text{s}$), para fração de sedimento l , definido pelo usuário;

$S(\tau_{cw}, \tau_{cr,e}^{(l)})$ → Função do passo de erosão;

$D^{(l)}$ → Fluxo de deposição ($\text{kg/m}^2/\text{s}$);

$W_s^{(l)}$ → Velocidade de sedimentação (m/s), para fração de sedimento l ;

c_b^l → Concentração média de sedimento próximo à camada de fundo, para fração de sedimento l ;

$S(\tau_{cw}, \tau_{cr,d}^{(l)})$ → Função do passo de deposição.

τ_{cw} → Tensão média de cisalhamento no leito devido a correntes e ondas;

$\tau_{cr,e}^{(l)}$ → Tensão de cisalhamento crítica para erosão (N/m^2), para fração de sedimento l ;

$\tau_{cr,d}^{(l)}$ → Tensão de cisalhamento crítica para deposição (N/m^2), para fração de sedimento l .

Para frações de sedimentos não-coesivos a transferência de sedimentos entre o transporte pelo leito e o transporte em suspensão é modelada usando termos de “sumidouro” e “fonte”, que agem na camada próxima ao fundo, gerando uma camada de referência, denominada altura de referência de Van Rijn (DELTAIRES, 2012). As concentrações em camadas inferiores a essa são rapidamente ajustadas a da camada de referência.

A concentração no fundo da célula de referência sobre uma aproximação para conseguir quantificar a massa de sedimento que integrara o transporte por suspensão e a massa que será incorporada ao transporte pelo leito, mais detalhes podem ser vistos em Deltares (2012).

2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O modelo hidrossedimentológico do Lago Guaíba, será composto por três módulos principais:

- Módulo I – Modelagem de aporte de sólidos e líquidos da bacia hidrográfica
- Módulo II – Modelagem hidrodinâmica de sedimentos do Baixo Jacuí
- Módulo III – Modelagem hidrodinâmica de sedimentos do Lago Guaíba

Em relação às condições de controle de entrada, serão considerados os períodos de cheias e estiagem. Para a condição de controle de saída será considerada a variação do nível da Laguna dos Patos, sendo de represamento quando os níveis estão altos e situação de perdas quando os níveis estão baixos.

Como saída, serão fornecidos os dados de dispersão de sedimentos sólidos, taxas de agitação, velocidades e direção de fluxo, áreas de erosão e deposição.

Após a calibração e validação destes modelos serão simuladas diferentes condições que resultaram em sete cenários, categorizados em: cenário base; cenário de previsões, cenário de mineração exclusiva no Lago Guaíba e; Cenário de mineração.

Os procedimentos metodológicos a serem aplicados para os Módulos I, II e III, assim como para os Cenários, estão apresentados nos próximos itens.

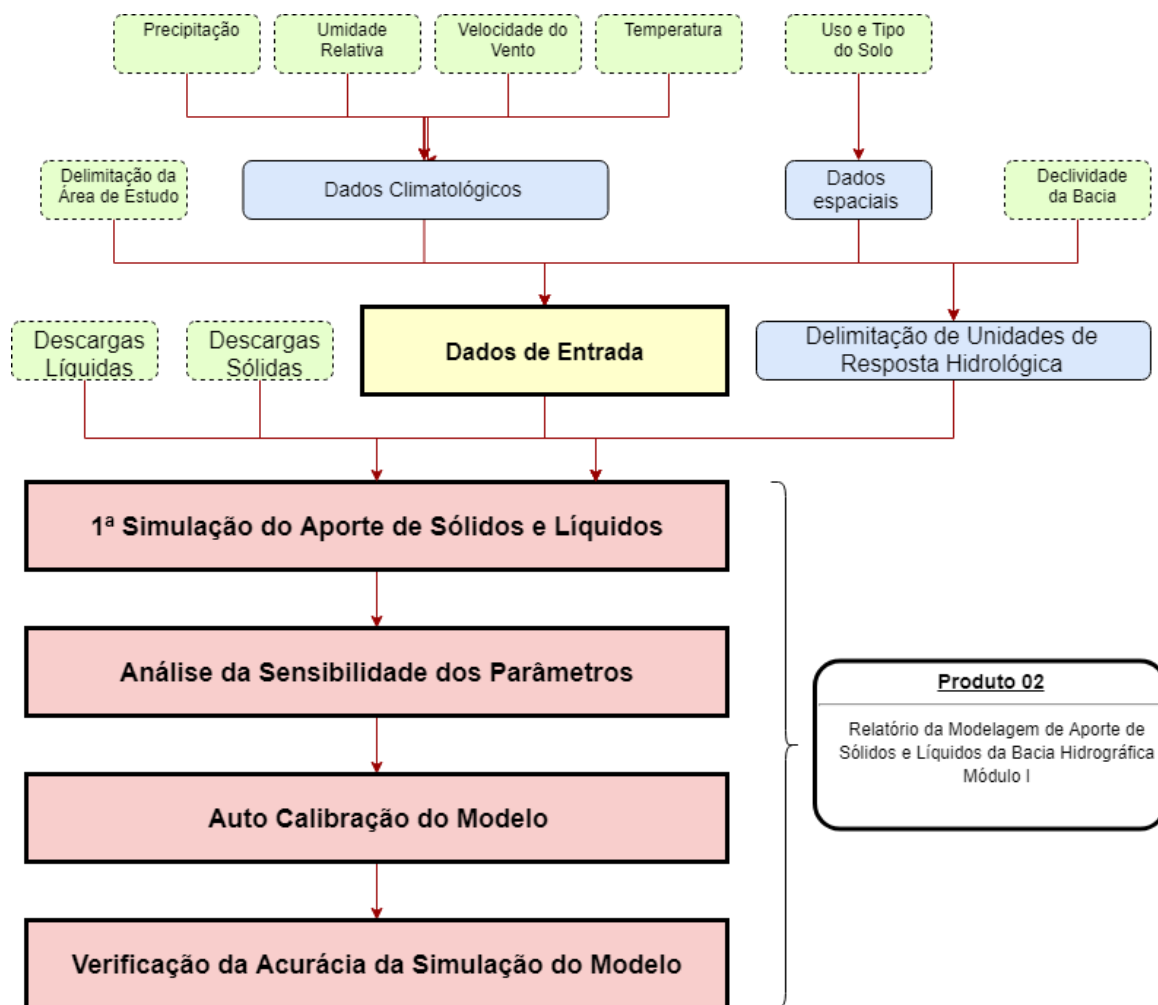
2.1 MODELAGEM DE APORTE DE SÓLIDOS E LÍQUIDOS – MÓDULO I

A modelagem hidrológica para o aporte de sedimentos e descargas líquidas será realizado através do modelo SWAT (Soil & Water Assessment Tool), considerando os rios dos Sinos, Gravataí, Caí, Alto Jacuí, Vacacaí-Vacacaí Mirim, Pardo e Taquari-Antas (afluentes do rio Jacuí).

2.1.1 IMPLEMENTAÇÃO DO SWAT

A FIGURA 7 apresenta o fluxograma simplificado da implementação do modelo SWAT.

FIGURA 7 – FLUXOGRAMA DA MODELAGEM HIDROSSEDIMENTOLÓGICA NO SWAT



2.1.1.1 DADOS DE ENTRADA PARA O MODELO SWAT

Para a simulação, o modelo requer as seguintes informações espaciais: modelo digital do terreno, hidrografia, mapa de solos, mapa de usos do solo. Além dos dados espaciais, o são necessárias séries temporais de dados climatológicos, de descarga líquida e descarga sólida.

O Modelo Digital do Terreno foi obtido através do uso de Imagens SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), com resolução espacial de 30 metros. O mapa de solos e a hidrografia na escala 1:25.000 serão fornecidos pela contratante. As informações de uso do solo serão disponibilizadas pela contratante, oriundas do *MapBiomass* (Projeto de Mapeamento Anual da Cobertura e Uso do Solo do Brasil).

Os dados climatológicos de temperatura, umidade relativa, pressão atmosférica e velocidade do vento serão fornecidos pela contratante, com base em monitoramento efetuado pela FEPAGRO (Fundação Estadual de Pesquisa Agropecuária). Adicionalmente, o estudo contará com dados oriundos das estações do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia).

Além dos dados climatológicos fornecidos pela contratante ou obtidos junto ao INMET, podem ser utilizados dados do CFRS (*Climate Forecast System Reanalysis* – Sistema de reanálise de previsões climáticas). Os dados CFRS são oriundos de modelagem considerando as interações entre atmosfera, oceano, superfície e geleiras. Como produtos, são fornecidas séries temporais de precipitação, temperatura, umidade relativa e velocidade do vento entre 1979 a 2014, com as séries em formato condizente com os dados de entrada do modelo SWAT. Estudo realizado por Fuka *et. al* (2013), utilizando dados do CFRS para simular vazões em cinco bacias hidrográficas com diferentes regimes hidroclimatológicos mostrou bons resultados. Comparando a acurácia das simulações com dados do CFRS em relação aos observados em estações meteorológicas, os autores mostraram que a acurácia da simulação de vazões com dados do CFRS foi superior à efetuada com dados meteorológicos observados. Neste contexto, dado o potencial de utilização dos dados e extensão considerável da área de estudo, dados do CFRS devem ser considerados na realização deste estudo.

Em estudo realizado na bacia hidrográfica do Lago Tana, Etiópia, Dire e Srinivasan (2014) utilizaram dados climáticos de precipitação diária e temperatura máxima e mínima de 9 estações localizadas nos arredores da bacia, de 1990 a 2011. Os dados CFRS de precipitação, temperatura máxima e mínima, velocidade do vento, umidade relativa e radiação solar foram provenientes de 24 estações, selecionadas de acordo com a cobertura da rede meteorológica na área. A performance comparativa das simulações do modelo SWAT foi efetuada utilizando dados de vazão de estações localizadas na bacia do Lago Tana. Os resultados mostraram que a simulação com dados oriundos das estações apresentou acurácia

levemente superior. Entretanto, para ambos dados de entrada, o modelo apresentou ajuste adequado, com Coeficiente de Nash-Sutcliffe (1970) superior a 0,7. Para os autores, a acurácia inferior das simulações com base em dados de entrada oriundos do CFRS deve-se a utilização de dados observados de alta qualidade e que o CFRS pode ser útil para situações de falhas e falta de dados. A última situação é comum na rede hidrometeorológica nacional.

Os dados de descarga líquida e sólida são inseridos no modelo para que a calibração tome como base tais valores para melhorar a acurácia da modelagem.

Para a foz de cada um dos rios a serem estudados serão apresentados os hidrogramas diários e mensais de descargas líquidas e sólidas. A avaliação destes resultados será realizada através das estatísticas: erro médio relativo, coeficiente de eficiência de *Nash-Sutcliffe* e coeficiente de correlação.

2.1.1.2 CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO

A calibração será efetuada de forma automática, com uso do software SWAT-CUP (*Soil and Water Assessment Tool Calibration and Uncertainty Programs*) e as séries de descargas líquidas e sólidas das estações hidrossedimentométricas na área de estudo. Primeiramente, será realizada a análise de sensibilidade dos parâmetros. Cabe ressaltar que cada área apresenta um conjunto de parâmetros mais sensíveis. De posse do conjunto, será realizada a calibração automática com o SWAT-CUP. Após o resultado da calibração automática, será realizado um refinamento da calibração, de forma manual, com alterações pontuais em alguns parâmetros.

2.1.1.2.1 SELEÇÃO DAS ESTAÇÕES DE MONITORAMENTO PARA CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO

Para a calibração e validação dos modelos serão utilizadas as estações de monitoramento hidrossedimentométricos da Agência Nacional de Águas, disponibilizadas no Portal *HIDROWEB*, do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH). Com base no inventário da ANA, há treze estações hidrossedimentométricas com dados disponíveis de concentração de sólidos suspensos totais (mg/L) na área de estudo, apresentadas na TABELA 1 e na FIGURA 8. O diagrama de disponibilidade de dados

sedimentométricos destas estações está apresentado no Anexo 1. O Anexo 2 apresenta o diagrama de disponibilidade de dados de vazões consistidas a partir do ano de 1978, onde iniciam os dados de sedimentos, até 2014. As séries históricas destas estações fluviométricas foram consistidas no projeto “Análise de consistência de dados fluviométricos, de estações de monitoramento da ANA em operação em bacias hidrográficas selecionadas”, cuja RHA está desenvolvendo para a ANA¹. Os anos de 2015 e 2016 das séries históricas, embora não estejam consistidos, serão consideradas no estudo devido a ocorrência de cheias históricas na região.

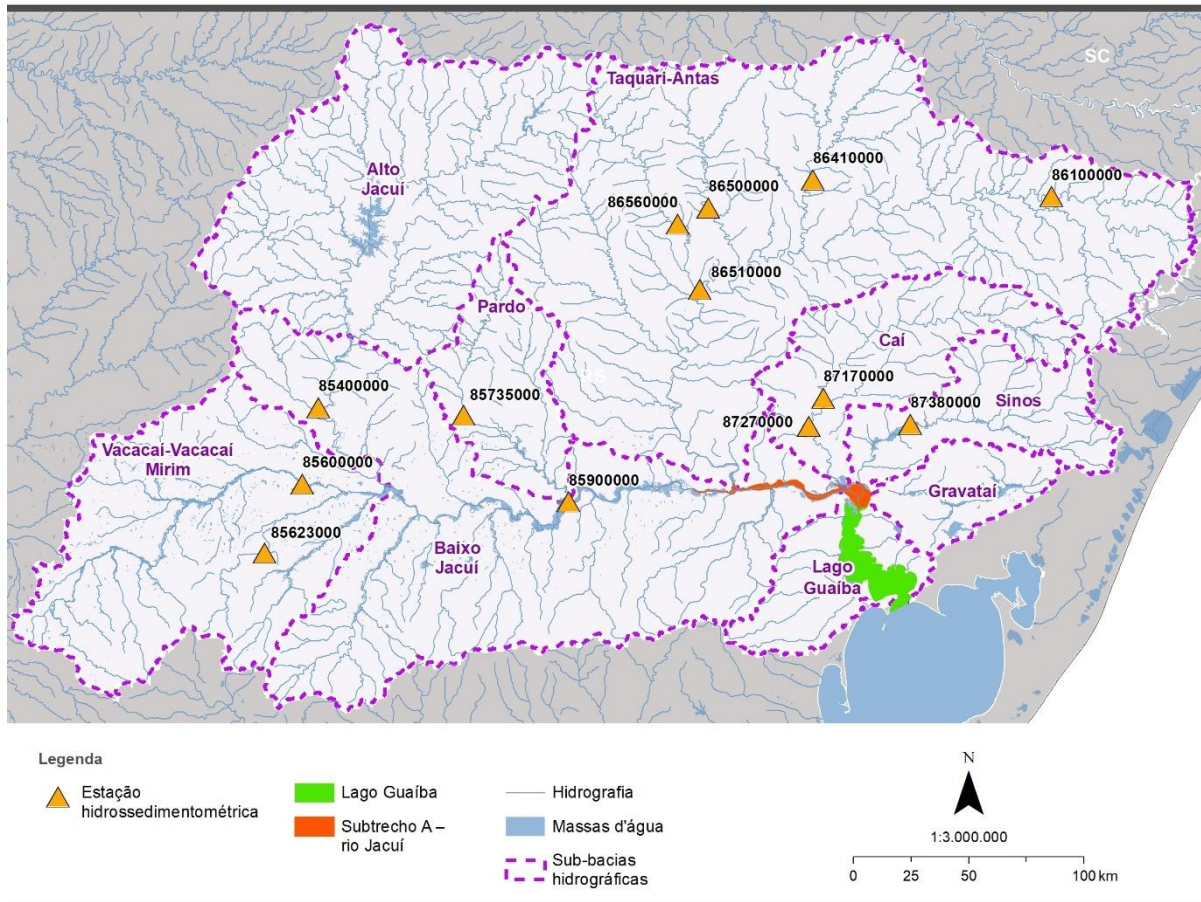
TABELA 1 – ESTAÇÕES HIDROSSEDIMENTOMÉTRICAS COM DADOS DISPONÍVEIS NA REGIÃO HIDROGRÁFICA DO GUAÍBA

Código da estação	Nome da estação	Nome do rio	Área de drenagem (km ²)	Primeiro ano com medições	Último ano com medições
85400000	Dona Francisca	Rio Jacuí	14000	1978	2015
85600000	Passo das Tunas	Rio Vacacaí	6780	1986	2018
85623000	São Sepé - Montante	Rio São Sepé	690	1985	2018
85735000	Candelária - Montante	Rio Pardo	1340	2002	2018
85900000	Rio Pardo	Rio Jacuí	38700	1998	2018
86100000	Passo do Gabriel	Rio das Antas	1820	2001	2018
86410000	Passo Barra do Guaiaveira	Rio Turvo	2820	1979	2018
86500000	Passo Carreiro	Rio Carreiro	1820	1979	2018
86510000	Muçum	Rio Taquari	16000	1979	2018
86560000	Linha Colombo	Rio Guaporé	2030	1979	2018
87170000	Barca do Caí	Rio Caí	3030	2009	2018
87270000	Passo Montenegro	Rio Caí	4360	1986	2014
87380000	Campo Bom	Rio dos Sinos	2900	1986	2018

Com base os diagramas de disponibilidade de dados dos Anexos 1 e 2, propõe-se que a calibração do modelo seja realizada no período de 1975 a 2005 e a validação no período de 2005 a 2014.

¹ Análise de consistência de dados fluviométricos, de estações de monitoramento da ANA em operação em bacias hidrográficas selecionadas – (Realização RHA Engenharia e Consultoria / Contrato 010/ANA/2015)

FIGURA 8 – LOCALIZAÇÃO DAS ESTAÇÕES HIDROSSEDIMENTOMÉTRICAS



2.1.1.2.2 DESCARGA SÓLIDA TOTAL

Para a calibração e validação do modelo hidrossedimentológico, são necessárias estimativas de séries históricas de descargas sólidas totais. A descarga sólida total é considerada como sendo composta de duas parcelas distintas: descarga sólida em suspensão e descarga sólida do leito (t/dia).

$$Q_{st} = Q_{ss} + Q_{sl}$$

Onde:

Q_{st} → a descarga sólida total (t/dia);

Q_{ss} → a descarga sólida em suspensão (t/dia);

Q_{sl} → a descarga sólida do leito (t/dia)

O cálculo da **descarga sólida em suspensão** medida, sendo o produto da concentração de sedimentos em suspensão pela descarga líquida medida no momento da amostragem, é o mais simples de ser realizado e também o que oferece uma melhor aproximação da realidade. Resulta da multiplicação da descarga líquida pela concentração de sedimentos e por uma constante de transformação de unidades:

$$Q_{ss} = 0,0864 \times Q_l \times C_s$$

Onde:

Q_{ss} → descarga sólida em suspensão (t/dia);

Q_l → descarga líquida (m³/s); e

C_s → concentração de sedimentos em suspensão (ppm ou mg/L).

Para a estimativa indireta da **descarga sólida do leito** será utilizado o método de Colby. Este método se destaca pela simplicidade e exigência de dados prontamente disponíveis, pois a aplicação necessita apenas da concentração de sedimentos em suspensão (C_s) e de informações oriundas da medição de descarga líquida. Assim, a estimativa da descarga sólida total, será dada por:

$$Q_{st} = q_{sl} \cdot L \cdot K + 0,0864 \cdot C_s \cdot Q_l$$

Onde:

Q_{st} → descarga sólida total (t/dia);

$q_{sl} = 39 \cdot V^{3,36}$ → descarga sólida do leito por unidade de largura (t/dia·m);

V → velocidade média do fluxo na seção (m/s);

L → largura da seção (m);

$K = 1,18 \cdot \sqrt{C_s / C_r}$ → o fator de correção;

C_s → concentração de sedimentos em suspensão (ppm ou mg/L);

C_r → concentração relativa em função da velocidade e profundidade da seção;

Q_l → descarga líquida (m³/s).

Assim, os dados de concentração de sedimentos em suspensão serão utilizados para determinar a descarga sólida total de cada medição, as quais serão utilizadas para ajustar curvas de descarga sólida individuais por estação.

A curva de descarga sólida é uma equação que relaciona o conjunto de medições de descargas líquidas com os valores de descarga sólida medidos simultaneamente, cuja forma usualmente utilizada é a seguinte:

$$Q_{st} = a \cdot Q_l^b$$

Para as curvas de descarga sólida determinadas, serão estabelecidos limites inferior e superior para avaliar a qualidade dos dados, sendo definidos respectivamente pela multiplicação dos resultados da equação pelos fatores 0,5 e 2.

Estes limites serão utilizados como regra de controle para análise de consistência dos serão desprezados. Os dados serão submetidos duplamente a regra de controle, utilizando-se a curvas de descarga sólida da própria estação e regional.

Esta região limite bastante ampla associada a curva de descarga sólida é usualmente adotada na literatura, pois a produção e transporte de sedimentos em bacias hidrográficas apresentam variabilidade associada a diversos fatores ambientais, não sendo, portanto totalmente explicados pela descarga líquida (SANTOS *et al.* 2001).

2.2 MODELAGEM HIDRODINÂMICA DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS DO BAIXO JACUÍ E DO LAGO GUAÍBA – MÓDULOS II E III

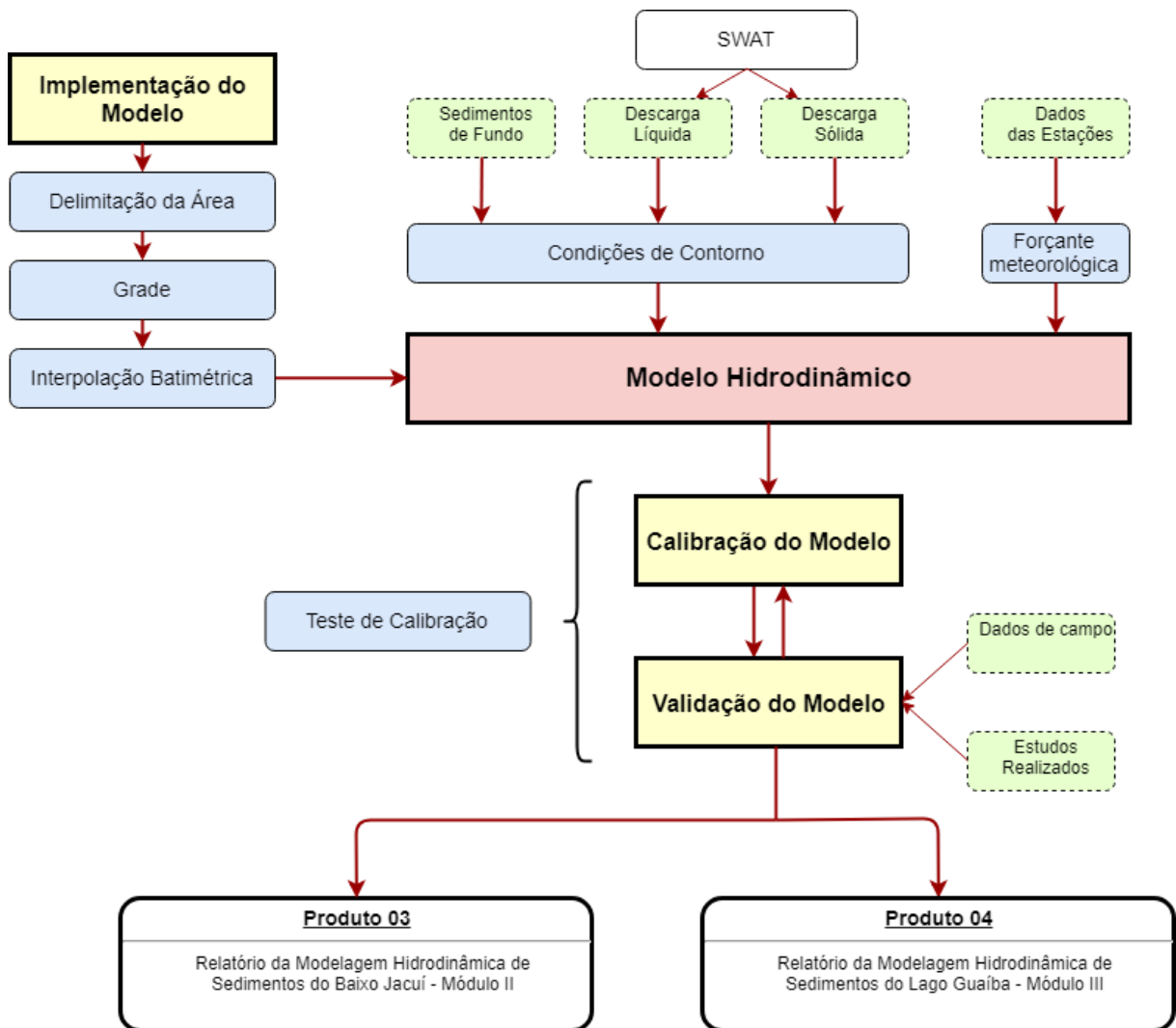
Nos módulos II e III serão propostos modelos numéricos hidrodinâmicos capazes de simular o regime de fluxos de vazão e sedimentos no trecho final do Baixo Jacuí e do Lago Guaíba, respectivamente, simulando a dinâmica de erosão, deposição e transporte de sedimentos.

O produto do Módulo II fornecerá a série de descargas líquidas e concentrações de sedimentos que serão usadas como condição de contorno de jusante na modelagem hidrodinâmica do Lago Guaíba (Módulo III). O modelo do Módulo III determinará zonas de tendência erosiva e deposicional, e estimará o tempo e volumes de reabastecimento do material removido das áreas de interesse. Como também, deve ser capaz de simular a dinâmica de sedimentos que possam sofrer ressuspensão após extração de areia no leito do lago.

2.2.1 IMPLEMENTAÇÃO DO DELFT3D

A FIGURA 9 apresenta o fluxograma simplificado da implementação do modelo Delft3D.

FIGURA 9 – FLUXOGRAMA DA MODELAGEM HIDRODINÂMICA NO DELFT3D



A configuração de modelos numéricos de uma forma geral passa necessariamente por uma sequência de preparação de dados de entrada necessários para a sua implementação. Para o caso de modelo hidrodinâmicos, a sequência de informações necessárias a serem definidas são:

- 1- Delimitação do contorno da área de interesse;
- 2- Geração da grade numérica e interpolação dos pontos batimétricos;
- 3- Definição das forçantes a serem impostas;
- 4- Definição das condições de contorno.

2.2.1.1 GRADE NUMÉRICA

O primeiro passo para a construção da grade numérica é a definição dos limites externos do domínio de interesse. Com base no contorno da área de estudo (linha de costa) obtido da cartografia, atualizada em 2018, disponibilizada pela Secretaria do Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (SEMA/RS), em coordenadas UTM, serão criadas linhas de tendência denominadas *splines*, as quais são utilizadas pelo Delft3D na construção da grade numérica. A posição e orientação da grade devem representar bem os canais principais de maré, o contorno de ilhas e a costa. Desta forma, visando a construção de uma boa grade numérica, os *splines* serão criados seguindo as linhas de fluxo do domínio modelado. Após a definição dos *splines* a grade numérica será gerada automaticamente pelo programa.

2.2.1.2 INTERPOLAÇÃO BATIMÉTRICA

Após a aplicação de diversos procedimentos de refinamento e de remanejamento das linhas de grade os dados batimétricos serão interpolados através da aplicação de três diferentes métodos. Devido ao tamanho e geomorfologia da área de estudo, o processo de interpolação pode ser realizado com a definição de apenas um polígono englobando todo o domínio, sendo os métodos de interpolação triangular, média entre células adjacentes e difusão interna empregados de maneira subsequente.

2.2.1.3 PROPRIEDADES DA GRADE NUMÉRICA

2.2.1.3.1 Ortogonalidade

O modelo Delft3D utiliza solução numérica das equações diferenciais baseada em técnicas de diferenças finitas, assim a grade numérica se caracteriza como sendo uma grade cartesiana ou ortogonal de diferenças finitas. Na nomenclatura utilizada na descrição desse modelo, os autores utilizaram um sistema de coordenadas onde os elementos de grade na

direção x foram denominados por M e os elementos de grade na direção y forma denominados por N. Em relação a um sistema de coordenadas geográfico os elementos de grade M se encontram alinhados com o eixo Leste – Oeste, enquanto os elementos de grade na direção N se encontram alinhados com o eixo Norte – Sul.

Uma vez que esse modelo adota um sistema numérico baseado grades de diferenças finitas, para evitar erros numéricos, o ângulo entre as direções M e N precisa necessariamente ser o mais ortogonal possível, ou seja, o mais próximo de 90°. Erros numéricos provocados em pontos da grade que possuem elementos não ortogonais se traduzem em gradientes de pressão e consequentemente em campos de velocidade não realistas. A medida de ortogonalidade utilizada pelo Delft3D é o ângulo, ou o cosseno do ângulo, entre as linhas de grade nas direções M e N. O erro na direção do gradiente de pressão é proporcional ao valor do cosseno desviado de zero. Valores de ortogonalidade inferiores a 0,04 são recomendados, sendo o erro no termo da advecção proporcional ao valor da ortogonalidade.

2.2.1.3.2 Resolução

A resolução da grade numérica é indicada pela raiz quadrada da área da célula da grade ($R = \sqrt{A}$ sendo A a área da célula da grade) e deve apresentar valores altos, especialmente em áreas de interesse, onde há a necessidade de resultados mais precisos, levando-se em conta que o tamanho de uma célula não pode ser maior que 1,4 vezes o tamanho da célula adjacente (RIBAS, 2004).

Durante a calibração dos modelos serão realizados testes a fim de verificar qual a melhor resolução a ser utilizada para atender aos propósitos deste estudo. Com enfoque nas resoluções propostas pelo “Termo de Referência para Contratação de Serviços de Estudo Hidrossedimentológico do Lago Guaíba” de uma malha com distância mínima de 0,5 km entre cada seção transversal para o Baixo Jacuí e de 2 km entre cada ponto de grade para o modelo hidrodinâmico do Lago Guaíba. Se for verificada a necessidade, a resolução da grade apresentará um maior refinamento do que o sugerido.

2.2.1.4 FORÇANTE METEOROLÓGICA

Séries históricas de intensidade e direção do vento utilizadas como forçante do modelo hidrodinâmico Delft3D, serão obtidas das estações meteorológicas (TABELA 2) localizadas em Porto Alegre – RS, pertencentes ao INMET. As séries serão consistidas para eliminação de dados espúrios e preenchimento de falhas.

TABELA 2 - ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS

Estação	Latitude	Longitude
Porto Alegre – A801	-30.053536°	-51.174766°
Porto Alegre – RS	-30.016667°	-51.216667°

2.2.1.5 CONDIÇÕES DE CONTORNO

Dados de descarga líquida e sólida serão utilizados como condição de contorno em ambos os modelos (Baixo Jacuí e Lago Guaíba), para o modelo hidrodinâmico do Lago Guaíba informações de sedimento de fundo também serão utilizadas como contorno.

2.2.1.5.1 Módulo II – Baixo Jacuí

Para a modelagem do Baixo Jacuí serão utilizadas cinco entradas de dados (Contorno Jacuí, Contorno Taquari-Antas, Contorno Caí, Contorno Sinos e Contorno Gravataí), que serão consideradas condições de contorno do modelo, e um contorno aberto (Contorno Baixo Jacuí) que servirá como saída do Baixo Jacuí e entrada para o modelo hidrodinâmico do Lago Guaíba (Módulo III). A FIGURA 10 apresenta a localização dos contornos do modelo.

- **DESCARGA LÍQUIDA:** As condições de contorno de descarga líquida serão obtidas da modelagem hidrológica realizada com o modelo SWAT (Módulo I). A entrada dos dados acontecerá nos Contornos de entrada: Jacuí, Taquari-Antas, Caí, Sinos e Gravataí, apresentados na FIGURA 10.
- **DESCARGA SÓLIDA:** As condições de contorno de descarga sólida serão obtidas da modelagem hidrológica realizada com o modelo SWAT (Módulo I). A entrada dos dados acontecerá nos Contornos de entrada: Jacuí, Taquari-Antas, Caí, Sinos e Gravataí, apresentados na FIGURA 10.

FIGURA 10 - LOCALIZAÇÃO DOS CONTORNOS DO MODELO DO BAIXO JACUÍ.



2.2.1.5.2 Módulo III – Lago Guaíba

Para a modelagem do Lago Guaíba serão utilizadas duas entradas de dados (Contorno Baixo Jacuí e Contorno Laguna dos Patos), que serão consideradas condições de contorno do modelo, e a condição de contorno do fundo do lago, onde constará os dados de sedimento de fundo. A FIGURA 11 apresenta a localização dos contornos do modelo.

- **DESCARGA LÍQUIDA:** As condições de contorno de descarga líquida serão obtidas da modelagem hidrodinâmica realizada no Baixo Jacuí com o Delft3D (Módulo II). A entrada de dados acontecerá pelo Contorno Baixo Jacuí, apresentado na FIGURA 11.
- **DESCARGA SÓLIDA:** As condições de contorno de descarga sólida serão obtidas da modelagem hidrodinâmica realizada no Baixo Jacuí com o Delft3D. A entrada de dados acontecerá pelo Contorno Baixo Jacuí, apresentado na FIGURA 11.
- **SEDIMENTO DE FUNDO:** O mapa de sedimento de fundo será interpolado para grade a partir de dados de sedimento coletados, por Andrade (2018)

(FIGURA 12 e FIGURA 13), em conjunto com dados coletados por Scottá (2018) e Nicolodi (2007).

FIGURA 11- LOCALIZAÇÃO DOS CONTORNOS DO MODELO DO LAGO GUAÍBA.



FIGURA 12 - MAPA DE LOCALIZAÇÃO DAS AMOSTRAS DE SEDIMENTOS COLETADOS NO LAGO GUAÍBA (ANDRADE, 2018).

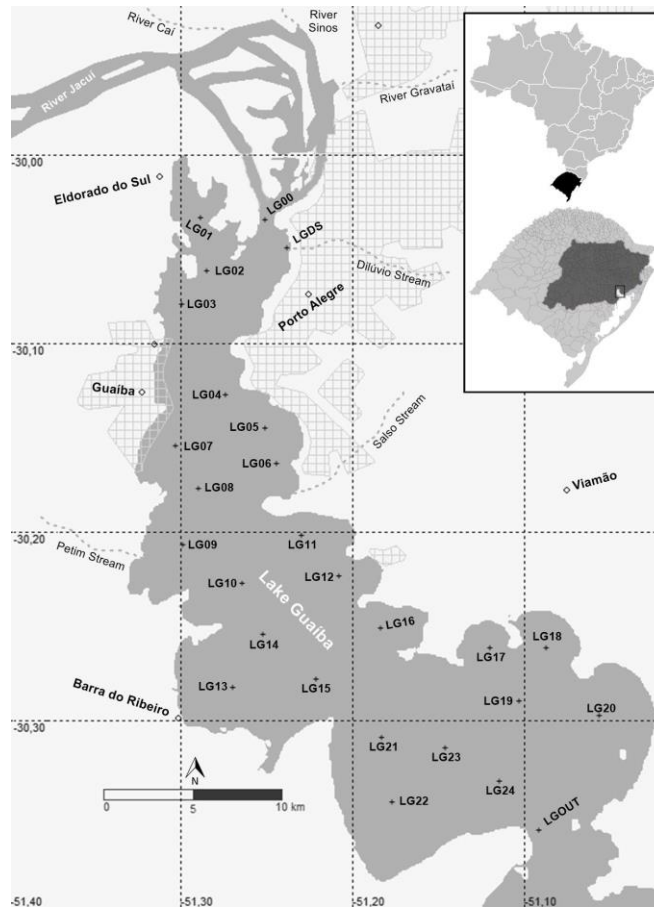
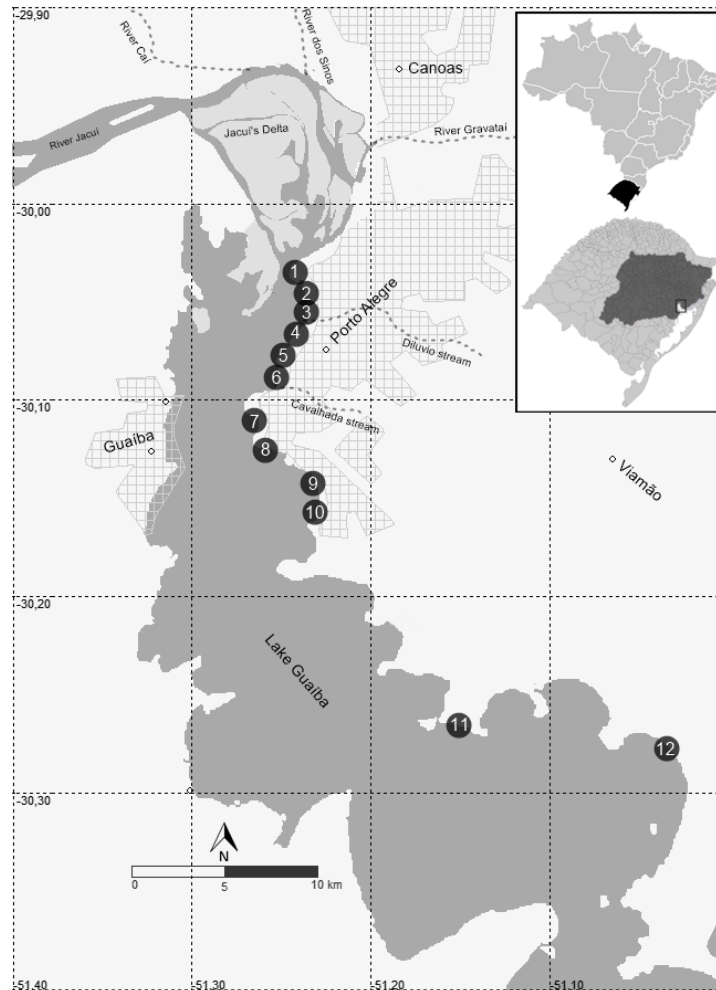


FIGURA 13- LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE COLETA DE SEDIMENTO DE FUNDO (ANDRADE, 2018).



- **CONTORNO ABERTO – CONEXÃO COM A LAGUNA DOS PATOS:** Para a conexão com a Laguna dos Patos (Contorno Laguna dos Patos) serão utilizados dados de níveis da coluna d'água disponíveis das estações fluviométricas da base da HydroWeb: 87421000 (Rincão Cristóvão Pereira) e 87540000 (Arambaré).

2.2.2 CALIBRAÇÃO DO DELFT3D

Para que o modelo apresente o melhor desempenho computacional e ao mesmo tempo represente as condições naturais da região de interesse, após a implementação, é necessário realizar a calibração. Simulações testes são realizadas com o intuito de analisar a resposta do modelo, para os parâmetros de grade, forçantes e de contorno inseridas, e comparadas com

dados observados em campo (validação). A quantidade de testes realizada depende da análise da comparação dos dados simulados e dos dados observados, sempre após a calibração é realizada uma tentativa de validação do modelo, até que se atinjam os resultados esperados.

Os testes realizados são:

- Teste de limitações de processamento: Para atender as demandas do estudo é necessária a geração de uma grade que atenda tanto os requisitos de resolução espacial e temporal, quanto de capacidade de processamento do Delft3D e da máquina utilizada. Grades muito extensas e com um número muito grande de pontos aumentam significativamente o tempo de processamento das simulações e geram erros no programa;
- Teste do passo de tempo: A escolha do passo de tempo utilizado influencia diretamente no tempo de simulação do modelo. A partir da análise do número de Courant (fornecido pelo Delft3D nas saídas das simulações) é possível aumentar ou diminuir o passo de tempo do modelo. O que pode contribuir para reduzir o tempo de processamento das simulações.

Geralmente, o número de Courant (Cr) não deve apresentar valores altos, tendo valores próximos de 1, mas por problemas de pequenas variações no espaço e tempo, o número de Courant pode ser assumido substancialmente maior (DELTARES, 2012).

$$Cr = \Delta t \sqrt{\left(\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2}\right)} \left(|\vec{u}| + \sqrt{gH}\right)$$

Onde:

Cr → Número de Courant;

Δt → Passo de tempo (s);

Δx → Espaçamento médio longitudinal dos nós da malha (m);

Δy → Espaçamento médio transversal dos nós da malha (m);

$|\vec{u}|$ → Módulo da velocidade da corrente (em geral na prática, este valor é desprezível)

por ser muito menor que $\frac{gH}{v}$);
 H → Profundidade média local (m)
 g → Aceleração da gravidade (m/s^2).

- Número de camadas: Sendo esta uma modelagem em três dimensões, além das resoluções dos eixos x, y é necessário analisar a resolução e quantidade de camadas necessárias no eixo z (profundidade). O Delft3D permite que camadas do eixo z apresentem diferentes resoluções para que se tenha uma melhor análise dos objetivos do estudo;
- Estabilização: Todo modelo numérico necessita de um período de simulação para que entre em equilíbrio, chamado de período de aquecimento do modelo, após este período o modelo se estabiliza e é possível a utilização dos resultados para as respectivas análises.

2.2.3 VALIDAÇÃO DO DELFT3D

Via de regra séries temporais da elevação da coluna da água, geradas por estações hidrológicas localizadas em rios e por marégrafos instalados em estuários, são as informações mais utilizadas na comparação entre os resultados obtidos com a utilização de modelos hidrodinâmicos e a realidade. Isso se deve pelo fato do nível ser a variável hidrológica mais fácil de ser medida e o seu conhecimento fornece informações confiáveis de outras variáveis hidrodinâmica de interesse, como a direção e a intensidade do campo de velocidade de correntes. Com isso é possível afirmar que se modelo hidrodinâmico é capaz de reproduzir o comportamento da elevação da superfície livre das massas de água, outras variáveis hidrodinâmicas também serão reproduzidas com precisão.

Assim, a validação do modelo hidrodinâmico será feita com base na comparação dos níveis de água modelados e os níveis de água monitorados por estações hidrológicas existentes ao longo do Baixo Jacuí e do Lago Guaíba TABELA 3. Além disso, serão efetuadas comparações entre seções de transversais de velocidade extraídas do modelo e medidas diretas do campo de velocidade realizada em campo com equipamentos sônicos tipo ADCP.

TABELA 3 – ESTAÇÕES PARA CONTROLE DO BAIXO JACUÍ E LAGO GUAÍBA.

Nome da Estação	Código ANA	Coordenadas	
		Latitude	Longitude
Passo Cachoeirinha	85940000	-29,95000	-51,76666
São Jerônimo	87020000	-29,95333	-51,72388
Foz do Rio Jacuí	87040100	-29,95000	-51,31666
Foz do Rio Caí	87301100	-29,93333	-51,28333
Foz do Rio dos Sinos	87393000	-29,93305	-51,2333
Gravataí	87410200	-29,97083	-51,20000
Ilha Pintada	87450005	-30,03000	-51,25055
Cais Mauá C6	87450004	-30,0211	-51,2211
Ilha da Pintada	87450005	-30,0306	-51,2522
Cristal	87460007	-30,0925	-51,2494
Ipanema	87460120	-30,1353	-51,2328
Ponta Grossa	87460220	-30,1886	-51,2425
Ponta dos Coatis	87500020	-30,2592	-51,1558
Ponta da Fortaleza	87500080	-30,3500	-51,0500

A validação dos resultados de transporte de sedimento em suspensão e de fundo se configura uma tarefa mais complexa uma vez que esse tipo de informação é, em sua grande maioria, restrita a medidas pontuais, realizadas em campanhas que não possuem regularidade temporal. Ou seja, a indisponibilidade de séries temporais contínuas desse tipo de informação impossibilita uma validação criteriosa dos resultados das modelagens matemáticas.

Com isso a validação será realizada com base nos volumes de sedimento fornecidos como condição de contorno na entrada do domínio do modelo hidrodinâmico. Com isso é possível se certificar que os volumes de sedimentos transportados pelo modelo Delft3D é compatível com os volumes de sedimento oriundos da bacia hidrográfica do Jacuí. Além disso, todos os dados disponíveis, gerados em campanhas de monitoramento e em estudos na área do rio Jacuí e no Lago Guaíba serão utilizados na validação do modelo de transporte de sedimento.

2.3 CENÁRIOS

2.3.1 CONDIÇÕES

Após a calibração e validação dos modelos, a partir dos Módulo I, II e III serão obtidas as simulações das Condições apresentadas na TABELA 4 para a montagem posterior dos cenários.

TABELA 4 – CONDIÇÕES DA SIMULAÇÃO DOS MÓDULOS I, II E III

MÓDULO	CONDIÇÃO	DESCRIÇÃO
MÓDULO I	1A	Aporte de sedimentos e descargas líquidas para a série de vazões de 2005 a 2015 e atual uso do solo
	1B	Aporte de sedimentos e descargas líquidas para as séries de vazões de 2010 a 2050 e uso do solo futuro.
MÓDULO II	2A	Modelagem do sistema Baixo Jacuí sem a intervenção da mineração no rio Jacuí.
	2B	Modelagem do sistema Baixo Jacuí com a intervenção da mineração no rio Jacuí.
MÓDULO III	3A	Modelagem do sistema Lago Guaíba sem a intervenção da mineração no Lago Guaíba
	3B	Modelagem do sistema Lago Guaíba com a intervenção da mineração no Lago Guaíba
	CA	Condição de jusante para a Laguna dos Patos com represamento
	CB	Condição de jusante para a Laguna dos Patos sem represamento
	CC	Condição de jusante para a Laguna dos Patos com a série histórica de níveis em Itapuã

Para a projeção do uso do solo futuro para composição da Condição 1B serão considerados os programas e metas do Plano Estadual de Recursos Hídricos, instituídos pela Resolução CRH nº 141/2014, no que se refere ao crescimento populacional. A evolução do uso do solo será realizada com base nos mapas de 2000 a 2016 do projeto MapBiomas.

Para a projeção dos dados climáticos será utilizado como entrada para o SWAT o modelo climático regional HadCM3 do Hadley Centre, UK², como cenários do prognóstico do IPCC.

Com relação à mineração, do ponto de vista da física do sistema, a atividade de mineração provoca alterações na geometria (contorno das margens dos rios) e na morfologia

²http://www.ipcc-data.org/sres/hadcm3_download.html

de fundo (alterações batimétricas), sendo que essas alterações provocam impactos diretos na hidrodinâmica do sistema que por sua vez é a responsável pelo transpor de sedimento do sistema. Outro ponto importante é que a retirada de sedimento a montante, o que reduz a disponibilidade de sedimento a ser transportada para pontos a jusante, podendo provocar déficit nesses locais.

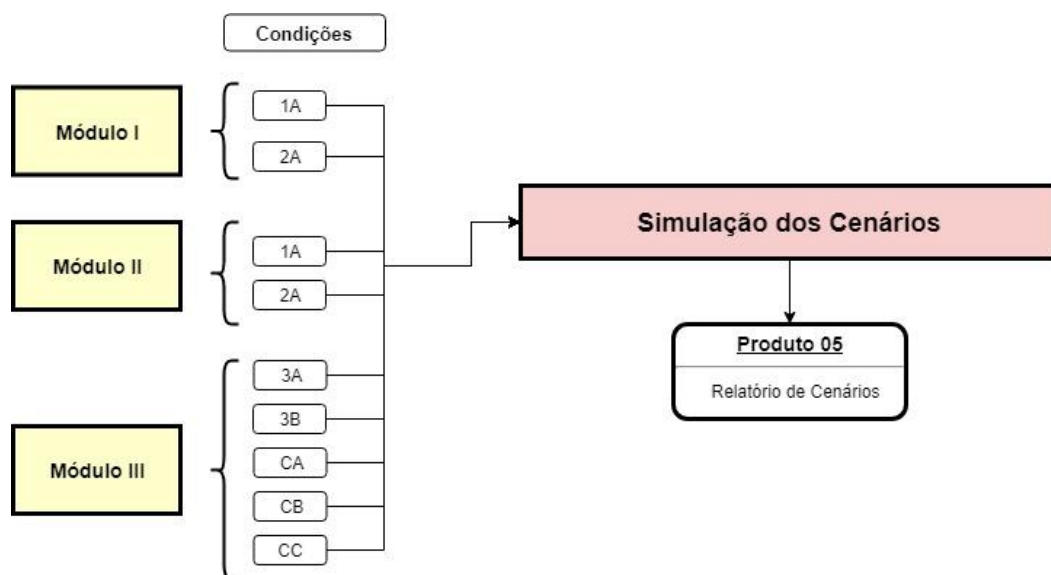
Assim, para representar os impactos físicos da atividade de mineração em pontos ao longo da área modelada, dois modelos serão testados:

- Serão realizadas alterações na geometria das margens e na batimetria das áreas afetadas e será avaliado o conseqüente impacto na intensidade do fluxo (que tende a diminuir) no transporte de sedimento;
- Diminuição na disponibilidade de sedimento a ser transportada devido a sua retirada do sistema em pontos a montante das áreas de mineração. A forma mais simples e talvez a mais eficiente, é modificar a carga de sedimento injetado no contorno da grade de cada domínio. Uma segunda forma de representar a retirada de sedimento pela atividade mineradora será feita por meio de uma menor espessura de sedimento de fundo, disponível para transporte por arraste. O módulo SED do sistema de modelagem Delf3D possui uma variável específica para definir a espessura de sedimento de fundo disponível para transporte. Assim a definição da condição inicial de uma coluna de sedimento mais espessa ou menos espessa, disponível para transporte pode ser usada para simular a retirada de sedimento pela atividade mineradora.

2.3.2 CENÁRIOS

Com base nas diferentes condições simuladas através dos Módulos I, II e III serão montados 4 diferentes cenários. A FIGURA 14 apresenta o fluxograma simplificado das atividades previstas nesta etapa.

FIGURA 14 – FLUXOGRAMA SIMPLIFICADO DAS ATIVIDADES PREVISTAS NA ETAPA DE CENARIZAÇÃO



Para o Módulo I serão considerados os cenários de geração de sedimentos e descargas líquidas, com alterações relacionadas ao **clima**, provenientes do prognóstico do IPCC, mudanças do **uso do solo**, retiradas e retenções de material para a **mineração**. Para os Módulos II e III, além de considerar os cenários atuais e futuros para a simulação do escoamento e transporte de sedimentos, serão considerados os registros de intenção para a mineração de areia tanto no Baixo Jacuí quanto para o Lago Guaíba. A TABELA 5 apresenta as descrições de cada cenário.

TABELA 5 – CENÁRIOS E CONDIÇÕES DO ESTUDO

Denominação do cenário	Objetivo	Cenário	Condições
Base	Avaliação da condição inicial do sistema	Base	1A + 2A + 3A + CC
Previsões	Avaliação da alteração das condições iniciais do sistema com base nas projeções climáticas e de crescimento populacional e de uso do solo.	IA	1B + 2A + 3A + CA
		IB	1B + 2A + 3A + CB
Mineração exclusiva no Lago Guaíba	Avaliação da interferência exclusiva no Lago Guaíba	IIA	1B + 2A + 3B + CA
		IIB	1B + 2A + 3B + CB
Mineração	Avaliação da interferência da mineração no Lago Guaíba considerando a existência da mineração também no rio Jacuí.	IIIA	1B + 2B + 3B + CA
		IIIB	1B + 2B + 3B + CB

Os resultados desta etapa serão apresentados em formato de mapas ilustrativos e análises estatísticas das séries de dados simuladas.

2.4 PROPOSIÇÃO DE REDE DE MONITORAMENTO

Os resultados de qualquer modelo hidrodinâmico são fortemente influenciados pelos dados disponíveis para as definições das condições iniciais e de contorno. Para o caso da modelagem do Baixo Jacuí, as principais informações necessárias são definidas com base em séries temporais de nível/vazão (descarga líquida) e séries temporais de descarga sólida. Além da necessidade desse tipo de informação, é necessário conhecimento mais detalhado do comportamento espacial da precipitação em toda área da bacia hidrográfica do Jacuí. Um melhor conhecimento da precipitação fornecerá informações mais consistentes para subsidiar a implementação de modelos distribuídos, como o SWAT, gerando resultados mais consistentes.

Segundo a OMM (MARCUSO, 2015) é recomendado um pluviômetro a cada 900 km² para regiões litorâneas e para regiões montanhosas, um pluviômetro a cada 250 km². O Alto Jacuí possui uma área aproximada de 13.072 km², com relevo essencialmente plano, e 19 pluviômetros instalados. O Baixo Jacuí possui área aproximada de 14.318 km² de relevo plano com 6 pluviômetros instalados. Com base nessa análise, para atender minimamente a resolução da OMM, é necessário a instalação de 4 pluviômetros na região do Alto Jacuí e 19 pluviômetros na região do Baixo Jacuí. O local exato para a instalação desses novos pluviômetros requer uma análise mais detalhada da atual rede, da análise da ampliação da rede de monitoramento, em implementação pelo Departamento de Recursos Hídricos (DRH, SEMA/RS), e também da necessidade de realocação de alguns pontos de monitoramento já em operação.

Mais especificamente na área do Lago Guaíba, um dos principais resultados esperados da modelagem hidrodinâmica e de transporte de sedimento, é a identificação de áreas de deposição ou erosão, bem como o padrão da circulação hidrodinâmica em toda a região de interesse. A partir desses resultados será possível determinar as taxas de deposição de sedimentos de fundo e a geração de mapas das áreas de deposição. Com isso, as campanhas de monitoramento, com base na coleta de amostras de sedimento de fundo,

deverão se concentrar nessas regiões para certificar que as áreas apontadas pelos resultados dos modelos são compatíveis com a realidade.

Um ponto de fundamental importância a ser monitorado é a entrada do Lago Guaíba. Nesse ponto, onde está instalada a estação hidrológica Cais Mauá C6 (latitude -30,0211, longitude -51,2211), deve ocorrer a medição contínua de nível/descarga líquida do rio, com o uso de ADCP, bem como campanhas de monitoramento trimestrais com a coleta de sedimentos em suspensão e de fundo. Essas informações são fundamentais para serem usadas como condição de contorno para modelagens futuras.

Importante frisar que as principais forçantes que regem a circulação hidrodinâmica no interior do Lago Guaíba é o vento e a descarga fluvial oriundas dos principais contribuintes. Como sugerido anteriormente, a instalação de uma estação hidrológica na foz do Rio Jacuí fornecerá as informações necessárias e suprirá parte dos dados necessários para a implementação de novas versões de modelos hidrodinâmicos mais precisos. Outra parte importante será suprida pela instalação de estações meteorológicas nas duas margens do lago. Uma vez que as únicas informações do campo de vento disponíveis se encontram na porção norte do domínio, outras três estações, uma na margem direita outra na margem esquerda e uma terceira na porção sul do domínio, cobririam toda a área de interesse, fornecendo informações da variabilidade espacial do campo de vento na região.

Os resultados do modelo ainda apontarão qual a importância do campo de ondas no transporte de sedimentos no interior do Lago Guaíba. Nesse projeto o campo de onda será gerado com base na aplicação do modelo de ondas SWAN, que tem como principal forçante o campo de vento. O resultado desse experimento pode apontar para duas direções: (1) as ondas não possuem papel relevante no transporte de sedimento no interior do lago, ou (2) as ondas possuem papel relevante no transporte de sedimento no interior do lago. Não importando qual o resultado, seria prudente a instalação de um ondógrafo no interior do Lago Guaíba para a determinação da climatologia do campo de ondas na região e com isso alcançar uma resposta mais definitiva da real importância do campo de ondas na distribuição de sedimento de fundo no Lago Guaíba.

Para a elaboração do relatório da Proposição de rede de monitoramento, além dos resultados obtidos nas simulações e cenarizações, será utilizada para comparação a ampliação

da rede de monitoramento do Rio Grande do Sul, que está sendo implementada pelo Departamento de Recursos Hídricos da SEMA/RS.

2.5 PROPOSIÇÃO DE CRITÉRIOS PARA A MINERAÇÃO DE AREIA

Como comentado na seção anterior, um dos principais resultados do modelo de transporte de sedimentos será o mapeamento de áreas preferenciais de deposição dos sedimentos ao longo do Rio Jacuí e no interior do Lago Guaíba. Com base nesse mapa será possível então identificar as áreas preferenciais de extração de sedimento bem como os volumes disponíveis de retirada.

Outras informações que serão usadas na definição de diretrizes orientativas para extração de areia serão obtidas do comportamento hidrodinâmico. Ou seja, dependendo das condições do campo de correntes em um determinado momento, plumas de sedimento em suspensão geradas pelo processo de mineração, poderão atingir áreas de maior importância ambiental, ou mesmo áreas onde ocorre a captação de água para abastecimento humano ou processos industriais. Essas massas de água com alta concentração de sedimento podem interferir nos processos industriais e também tornarem os processos de purificação para consumo mais caros. Com isso, a atividade de mineração, em determinados pontos, poderá ser regulada com base no comportamento sazonal do campo hidrodinâmico, principalmente em função do alcance das plumas de sedimento em suspensão na coluna de água. Destacamos que o estudo hidrossedimentológico do Lago Guaíba apresentará respostas diretrizes orientativas aos critérios para a mineração, e não operacionais.

3 ATIVIDADES PREVISTAS

3.1 PRODUTOS

A TABELA 6 apresenta a proposição de datas de apresentações e de entrega dos produtos parciais e finais.

TABELA 6 - PROPOSIÇÃO DE DATAS PARA ENTREGA DOS PRODUTOS

Produtos	Descrição	Entrega parcial ¹ e apresentação ²	Feedback SEMA	Entrega final
P 01	Plano de Trabalho	22/10/2018 ¹²	26/10/2018	01/11/2018
P 02	Relatório da Modelagem de aporte de sólidos e líquidos da bacia hidrográfica - Módulo I	14/11/2018 ¹	26/11/2018	03/12/2018
		19/11/2018 ²		
P 03	Relatório da Modelagem hidrodinâmica de sedimentos do Baixo Jacuí - Módulo II	21/12/2018 ¹²	07/01/2019*	14/01/2019*
P 04	Relatório da Modelagem hidrodinâmica de sedimentos do Lago Guaíba - Módulo III	21/01/2019 ¹²	25/01/2019	01/02/2019
P 05	Relatório de Cenários	18/02/2019 ¹²	22/02/2019	01/03/2019
P 06	Estrutura de todos os modelos desenvolvidos, juntamente com os respectivos dados de entrada organizados e manuais descritivos	18/03/2019 ¹²	22/03/2019	01/04/2019
P 07	Estrutura de compilação de dados em formato compatível com a rede SEMA/FEPAM			
P 08	Proposta de monitoramento necessário para o aprimoramento do modelo			
P 09	Relatório de proposta de critérios de extração			

*Proposição de datas devido às festas de fim de ano

3.1.1 REUNIÕES DE ACOMPANHAMENTO

No momento da entrega parcial de todos os produtos serão realizadas reuniões de acompanhamento, na qual será feita uma apresentação do Produto em seu estágio de desenvolvimento. A exceção dos Produtos P 03 e P07, as reuniões ocorrerão por vídeo chamada.

A apresentação dos Produtos P 03 e P 07 serão realizadas presencialmente. No dia após a apresentação do P 07, será realizado um workshop à equipe de acompanhamento da SEMA/FEPAM, com uma parte teórica de 8 horas de apresentação dos estudos realizados e dos resultados e uma parte prática de introdução aos modelos utilizados. Para a realização do workshop é necessário que os participantes tenham instalado em seus computadores os modelos SWAT e Delft3D, além da infraestrutura básica que possibilite a realização de tal atividade, tal como sala compatível para o número de participantes, projetor, *wi-fi*, etc.

Ao final do projeto será realizada uma reunião presencial para apresentação completa do estudo.

3.1.2 APRESENTAÇÃO DOS PRODUTOS

Os relatórios parciais serão entregues via e-mail e serão apresentados por vídeo chamada. Os relatórios finais serão entregues em PDF, conforme o cronograma físico. Ao final do estudo, serão entregues todos os relatórios em duas vias físicas e 2 vias digitais

Os relatórios serão confeccionados em conformidade com as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), em duas vias impressas e duas vias digitais (formato .pdf). Os demais produtos resultantes deverão ser apresentados na forma de documento em meio digital. Todos os documentos entregues serão assinados pelos técnicos envolvidos nas fases do trabalho, conforme participação, e com a Anotação de Responsabilidade Técnica (ART) correspondente.

3.2 CONTROLE DE QUALIDADE

A RHA Engenharia preza pela melhoria contínua dos processos operacionais, de modo a garantir a satisfação e o atendimento dos clientes, superando suas expectativas em relação aos produtos recebidos.

A seguir são apresentados os procedimentos a serem adotados para a realização dos trabalhos, sendo estes em termos técnicos, organizacionais e de controle quanto à qualidade dos produtos e cumprimento de prazos estabelecidos.

- Utilização ao máximo das informações obtidas pelos técnicos quanto as especificidades da bacia em estudo e sua possível compatibilidade com métodos encontrados em bibliografia nacional e internacional;
- Realização dos trabalhos seguindo uma metodologia adequada, elaborada com base em experiências anteriores de trabalhos realizados pela empresa e adaptada às características específicas do estudo em questão, implicando uma melhor qualificação dos produtos;

- Operação de uma estrutura flexível e dinâmica de equipes multidisciplinares composta por profissionais qualificados, mestres e doutores. Contando com equipe de consultores formada por profissionais com mais de vinte e cinco anos de experiência, os quais certificam a qualidade dos trabalhos realizados;
- Aplicação de recursos e sistemas computacionais apropriados, levando a dinamização das atividades e aprimorando a precisão dos resultados, por meio de processos de editoração de textos e figuras, de elaboração de mapas e de transmissão e compartilhamento de dados por processos eletrônicos on-line atualizados;
- Organização racional do modo de emissão de documentos, através da padronização, codificação, registro e documentação dos produtos entregues e suas respectivas revisões, por parte da contratada e da contratante.

A qualidade dos produtos entregues é verificada através de indicadores de qualidade, em especial quanto ao retorno da Contratante. O Sistema de Gestão da Qualidade adotado pela empresa pauta-se em avaliações periódicas e ações corretivas sobre os processos em andamento.

Para a execução do trabalho, o Coordenador Geral realizará o planejamento, controle e acompanhamento. Os especialistas da Equipe Técnica do projeto serão responsáveis pelas atividades técnicas e pelo acompanhamento e verificação do produto em elaboração, estando envolvidos também em sua execução em conjunto com os membros de sua equipe auxiliar. Consultores poderão ser chamados para atuar com suporte técnico para solução de problemas complexos, sendo acionados pela Coordenação segundo as necessidades em curso. O Coordenador Geral também verificará o produto. Caso sejam necessárias alterações, o produto retornará ao coordenador da atividade para revisão até a sua aprovação, para posterior encaminhamento à SEMA/RS. Por sua vez, caso a SEMA/RS solicite alterações, o produto será revisado e submetido novamente aos processos de acompanhamento e verificação descritos, até a aprovação final da Contratante. O processo descrito é ilustrado pela FIGURA 15. No decorrer desse processo, os estágios do produto até a sua versão final são documentados através do preenchimento do carimbo na folha de rosto do produto.

FIGURA 15 – ETAPAS PARA ELABORAÇÃO DOS PRODUTOS



No decorrer deste processo os estágios do produto até a sua versão final são documentados através do preenchimento de carimbo na folha de rosto do produto conforme a TABELA 7 na sequência.

TABELA 7– CARIMBO DE CONTROLE DE ALTERAÇÕES DE DOCUMENTOS

Emissão Inicial						
Rev.	Data	Elaborado por	Verificado por	Autorizado por	CREA Responsável Técnico	CE

CE – Códigos de emissão

AE Aprovado para emissão AF Aprovação final VS Versão preliminar

CD Cancelado

Dessa forma, destacam-se as seguintes etapas do Plano de Qualidade a ser adotado:

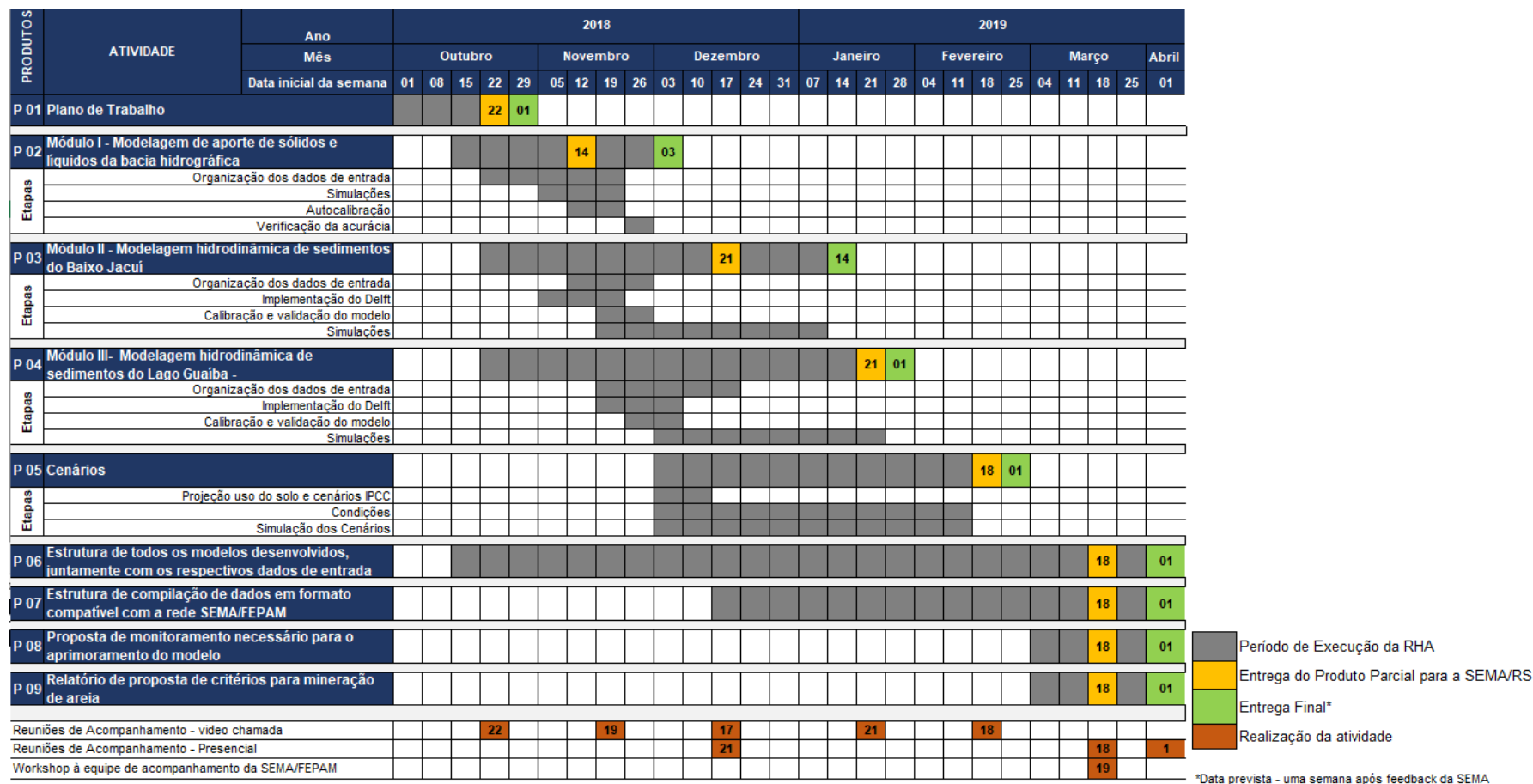
- Identificação das demandas da Contratante;
- Planejamento das atividades e definição dos responsáveis;
- Acompanhamento e controle dos processos em andamento com atualização periódica do cronograma físico ao longo do seu desenvolvimento;
- Avaliação dos produtos em elaboração a partir de resultados parciais e eventuais correções;
- Validação dos produtos finais.

As alterações e modificações solicitadas pela Contratante serão documentadas, analisadas criticamente e aprovadas por pessoal autorizado antes de sua implementação

3.3 CRONOGRAMA FÍSICO

A duração das atividades e seu encadeamento em relação às Etapas e Produtos podem ser observados no Cronograma Físico sugerido (FIGURA 16).

FIGURA 16 – CRONOGRAMA FÍSICO



REFERÊNCIAS

- ANDRADE NETO, J. S.; RIGON, L. T.; TOLDO JR., E. E.; SCHETTINI, C. A. F.; Descarga sólida em suspensão do sistema fluvial do Guaíba, RS, e sua variabilidade temporal. **Pesquisas em Geociências**, 39 (2): 161-171, maio/ago, 2012.
- ANDRADE, L. C. D., **Impactos do ambiente urbano na poluição dos sedimentos do lago Guaíba**. Porto Alegre, RS. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Faculdade de Agronomia, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Porto Alegre, BR-RS, 2018.
- BACHI, F.A.; BARBOZA, E. G.; TOLDO JÚNIOR, E. E. **Sedimentação do Guaíba – RS**. Centro de Estudos em Geologia Costeira e Oceânica (CECO) – Instituto de Geociências/Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2000.
- BERNARDO, J. W. Y. **Interpretation and Applicability of Residence Times in Reservoirs**. Curitiba. Dissertação de Mestrado. Departamento de Hidráulica e Saneamento. Universidade Federal do Paraná. 2013.
- CARVALHO, N. O.; FILIZOLA JÚNIOR, N. P.; SANTOS, P. M. C.; LIMA, J. E. F. W. **Guia de práticas sedimentométricas**. Brasília: ANEEL, 154p, 2000.
- CARVALHO, N.O. **Hidrossedimentologia Prática**. Rio de Janeiro: CPRM, 732p, 1994.
- COLBY, B. R. Relationship of unmeasured sediment discharge to mean velocity. **Transactions, American Geophysical Union**, vol. 38, n. 5, oct, pp.708-719, 1957.
- DELTARES. **User Manual - Delft3D**. WL | Delft Hydraulics, 2012.
- DILE, Y. T., RAGHAVAN S. Evaluation of CFSR climate data for hydrologic prediction in data-scarce watersheds: an application in the Blue Nile River Basin. **Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)**, vol 50 (5): p 1226-1241, 2014
- EDWARDS, T. K.; GLYSSON, G. D. Field Methods for Measurement of Fluvial sediment In: **Applications of hydraulics**. USGS. Techniques of Water Resources 88 Investigations of the United States Geological Survey. TWRI 3 – C2. Arlington. VA. p. 89, 1999.
- FUKA, D.R., C.A. MACALLISTER, A.T. DEGAETANO, and Z.M. Easton. 2013. Using the Climate Forecast System Reanalysis dataset to improve weather input data for watershed models. **Hydrological Processes**, vol 22, set, 2013. Disponível em:<<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/hyp.10073> >
- HYDRAULICS, Delft. **Delft3D-Flow user's manual: simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments**. WL Delft Hydraulics, Netherland, 2014.
- LEI Nº 10.350, DE 30 DE DEZEMBRO DE 1994. Institui o Sistema Estadual de Recursos Hídricos, regulamentando o artigo 171 da Constituição do Estado do Rio Grande do Sul. ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL ASSEMBLEIA LEGISLATIVA. Gabinete de Consultoria Legislativa. **Diário Oficial do Estado**. Publicado em 1 de janeiro de 1995.

LOPES, G., M. **Aplicação de um modelo numérico hidrodinâmico para as Baías de Paranaguá e Antonina-PR.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná, 2010.

MARCUZZO, F.F.N.; MELATI, M. D. Cálculo de densidade pelos critérios da OMM e espacialização de novas estações P e Pr na sub-bacia 85. In: **XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos.** Brasília – DF, 2015.

MIRANDA, L., B de; CASTRO, BM de; KJERFVE, Björn. **Princípios de oceanografia física de estuários.** São Paulo: EDUSP, 2002.

NASH J.E., SUTCLIFFE J.E. River flow forecasting through conceptual models. Part I - A discussion of principles. **Journal of Hydrology**, v. 10, p. 282-290, 1970.

NICOLODI, JOÃO LUIZ. **O padrão de ondas no Lago Guaíba e sua influência nos processos de sedimentação.** Tese (Doutorado em Ciências). Programa de Pós-graduação em Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, 2007.

PAZ, A.R.; REIS, L.G.M.; LIMA, H.V.C. Uso de modelagem hidrodinâmica visando a segmentação de corpos d'água rasos para enquadramento: o caso do Lago Guaíba (RS). In: **XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, João Pessoa - PB, 2005.

PBH – LAGO GUAIBA. **Plano da bacia hidrográfica do Lago Guaíba.** RS – Relatório Final Síntese e SIG. Secretaria do Meio Ambiente – Governo do Estado do Rio Grande do Sul, 2016.

PERH-RS. **Plano Estadual de Recursos Hídricos do Rio Grande do Sul.** Relatório Síntese da Fase A – Diagnóstico e Prognóstico Hídrico das bacias hidrográficas do Rio Grande do Sul. Secretaria Estadual do Meio Ambiente – SEMA, 2006.

RIBAS, T. M. **Implementação de modelo numérico para estudo hidrodinâmico das baías de Antonina e Paranaguá- PR.** 121 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) – Setor de Tecnologia – Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2004.

RIJN, L. C. VAN; WALSTRA, D. J. R. **Modelling of Sand Transport in Delft3D.** WL | Delft Hydraulics, 2003.

SANTOS, I.; FILL, H.D.; SUGAI, M.R.B.; BUBA, H.; KISHI, R.T.; MARONE, E. LAUTERT, L.F. **Hidrometria Aplicada.** Curitiba: LACTEC, 372p., 2001.

SCHULTZ, G. B.; SOUZA, R.M.; SANTOS, I. Simulação da produção e transporte de sedimentos com o modelo SWAT: aplicação na bacia do Altíssimo Rio Negro. In: Lima, J. E. F. W.; Lopes, W. T. A. **Engenharia de Sedimentos: na busca de soluções para problemas de erosão e assoreamento.** Brasília, 448p., 2011.

SCOTTÁ, F.C., **A Hidrodinâmica e Sedimentologia do Rio Guaíba Analisados por Sensores Geoacústicos e Orbitais.** Porto Alegre, RS. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geociências, Porto Alegre, BR-RS, 2018.

SILVA, M.A.D.L. TEIXEIRA, P.R.D.F. Estudo de dois aplicativos para solução de escoamento de fluidos com superfície livre. In: **SEMENGO - Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica**. Rio Grande: FURG, 2004.

TUCCI, C.E.M. **Modelos Hidrológicos**. Porto Alegre, ABRH, 678p, 2005.

YANG, TED C. **Sediment Transport Theory and Practice**. New York. McGraw-Hill Companies. ISBN 0-07-912265-5. p.395, 1996.

4 ANEXOS

ANEXO 2 – DIAGRAMA DE DISPONIBILIDADE DE DADOS DE VAZÃO NA ÁREA DE INTERESSE

Código da estação	Nome da estação	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014			
85400000	DONA FRANCISCA	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
85600000	PASSO DAS TUNAS	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
85623000	SÃO SEPÉ - MONTANTE	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
85735000	CANDELÁRIA MONTANTE	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
85900000	RIO PARDO	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
86100000	PASSO DO GABRIEL	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
86410000	PASSO BARRA DO GUAIAVEIRA	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
86500000	PASSO CARREIRO	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
86510000	MUÇUM	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
86560000	LINHA COLOMBO	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
87170000	BARCA DO CAÍ	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
87270000	PASSO MONTENEGRO	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
87380000	CAMPO BOM	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

Legenda:

- 12 meses com dados diários
- 11 meses com dados diários
- 10 meses com dados diários
- menos de 10 meses com dados diários
- Sem informação

