

ESTUDO HIDROSEDIMENTOLÓGICO DO LAGO GUAÍBA
CONTRATO Nº 22/2018

**PRODUTO 07 - ESTRUTURA DE COMPILAÇÃO DE DADOS EM FORMATO
COMPATÍVEL COM A REDE SEMA/FEPAM**

REALIZAÇÃO:



GOVERNO DO ESTADO
RIO GRANDE DO SUL
SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE
E INFRAESTRUTURA

EXECUÇÃO:

RHA
RECURSOS HÍDRICOS E AMBIENTAIS
ENGENHARIA

CURITIBA - PR
OUTUBRO/2019

ESTUDO HIDROSEDIMENTOLÓGICO DO LAGO GUAÍBA**CONTRATO Nº 22/2018**

Emissão Inicial						
Rev.	Data	Elaborado por	Verificado por	Autorizado por	CREA Responsável Técnico	CE
1	14/10/2019	HOF; RBR; TM	AP	CSG	67059-D	AE
0	23/08/2019	HOF; RBR	AP	CSG	67059-D	VS

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 DE MEIO AMBIENTE E INFRAESTRUTURA (SEMA/RS)**

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

Secretário de Estado do Ambiente e Desenvolvimento Sustentável
Artur Lemos Júnior

Fiscal titular de acompanhamento e execução do contrato
Amanda Wajnberg Fadel

Fiscal suplente de acompanhamento e execução do contrato
Fernando Comerlato Scottá

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

Engenheira Civil
Mestre em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental
csgarcia@rhaengenharia.com.br

EQUIPE PERMANENTE

Coordenadora 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

Coordenadora Executiva

Eng.^a Ambiental, Esp., Andréia Pedroso

Técnica em Sistemas de Informações Geográficas

Geógrafa Karine Krunn

Auxiliar Administrativo

Veridiana Dias da Cruz

EQUIPE COMPLEMENTAR

Físico, Dr., José Eduardo Gonçalves

Oceanógrafa, M.Sc., Tábata Fernanda Vilas Boas de Miranda

Engenheiro Ambiental, M.Sc., Hugo de Oliveira Fagundes

Engenheira Ambiental, Renata Barão Rossoni

Estagiária em Geografia Thais Regina Paes

DADOS CONTRATUAIS

Contrato nº 22/2018 de 17 de setembro de 2018.

Número do processo administrativo eletrônico: 18/0500-0000570-8.

Ordem de Início dos Serviços nº CT-0290 de 13/11/2017.

Partes: Estado do Rio Grande do Sul, por intermédio da Ambiente e Desenvolvimento Sustentável, e RHA Engenharia e Consultoria SS Ltda.

Objeto: Contratação de serviços de empresa especializada para prestação de serviços de Estudo Hidrossedimentológico do Lago Guaíba.

Vigência: 06 meses a partir da data definida na Ordem de Início dos Serviços (com aditamento de prazo de 06 meses).

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. ÁREA DE ESTUDO E REGIÃO DE APLICAÇÃO DOS MÓDULOS I, II, III E CENÁRIOS.....	8
FIGURA 2. FLUXOGRAMA DO ESTUDO HIDROSEDIMENTOLÓGICO DO LAGO GUAÍBA	9
FIGURA 3. REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DOS PROCESSOS SIMULADOS NO MODELO MGB	10
FIGURA 4. REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DOS PROCESSOS SIMULADOS NO MGB-SED	11
FIGURA 5. PASTAS DE TRABALHO DO MÓDULO I.....	12
FIGURA 6. DIRETÓRIO GERAL PARA UTILIZAÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO DELFT3D	15

LISTA DE TABELAS

TABELA 1. MÉTRICAS DE AVALIAÇÃO DO MODELO HIDROSEDIMENTOLÓGICO.....	13
TABELA 2. INFORMAÇÕES DO SISTEMA COMPUTACIONAL	18
TABELA 3. CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO DO MGB	20
TABELA 4. RESUMO DOS CENÁRIOS SIMULADOS COM O DELFT3D.....	21

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	7
2	CONTEXTUALIZAÇÃO	8
3	MÓDULO I	10
4	MÓDULO II E MÓDULO III	14
4.1	IMPLEMENTAÇÃO E SIMULAÇÃO	15
4.2	ESTRUTURA COMPUTACIONAL	18
5	CENÁRIOS	19
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	22

1 INTRODUÇÃO

Este relatório apresenta a estruturação e compilação dos dados de acordo com o formato compatível com a rede SEMA/FEPAM. O estudo foi realizado em quatro etapas principais: Módulo I – Modelagem de aporte de sólidos e líquidos da bacia hidrográfica; Módulo II – Modelagem hidrodinâmica e de transporte de sedimentos do Baixo Jacuí; Módulo III – Modelagem hidrodinâmica e de transporte sedimentos do Lago Guaíba; e Cenários de uso e cobertura do solo e mudanças climáticas.

No Módulo I, foram realizadas as estimativas de descarga líquida (vazão), descarga sólida em suspensão e descarga sólida total, utilizando o modelo MGB e seu módulo de sedimentos, o modelo MGB-SED. Tanto o módulo hidrológico, quanto o módulo de sedimentos, foram calibrados com dados observados de descarga líquida e sólida.

Nos Módulos II e III foram implementados modelos para simular o regime de fluxos de vazão e sedimentos no trecho final do Baixo Jacuí (Módulo II) e do Lago Guaíba (Módulo III), simulando a dinâmica de erosão, deposição e ressuspensão de sedimentos. Para isto, a modelagem numérica foi realizada com o auxílio do modelo hidrodinâmico Delft3D.

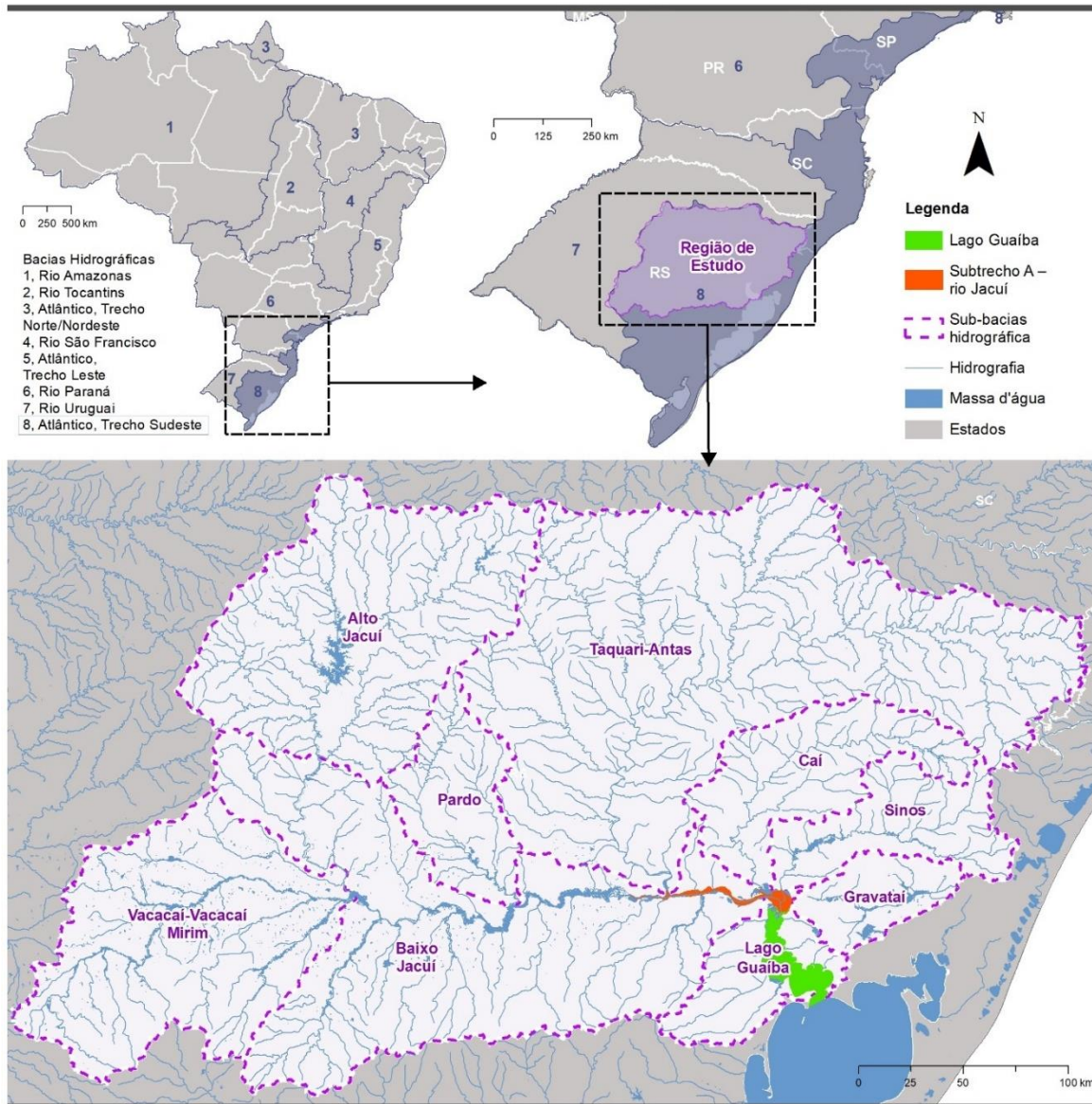
Nos Cenários foram realizadas simulações hidrossedimentológicas de toda a Região Hidrográfica do Lago Guaíba, utilizando o modelo MGB, e simulações hidrodinâmicas do Baixo Jacuí e do Lago Guaíba, utilizando o modelo Delft3D. Os cenários avaliados incluíram tanto cenários tendenciais quanto cenários otimistas (poucas alterações climáticas e aumento da cobertura vegetal) e pessimistas (mudanças climáticas amplificadas e redução da cobertura vegetal) para o período de 2016 a 2030.

Para a completa compreensão do conteúdo deste relatório deve-se consultar também o *Relatório P06 – Estrutura de todos os modelos desenvolvidos juntamente com os respectivos dados de entrada organizados e manuais descritivos*, que apresenta os manuais dos modelos MGB e Delft3D e toda a estrutura de dados do Estudo Hidrossedimentológico do Lago Guaíba.

2 CONTEXTUALIZAÇÃO

A FIGURA 1 apresenta a área de estudo e as regiões de aplicação de cada módulo.

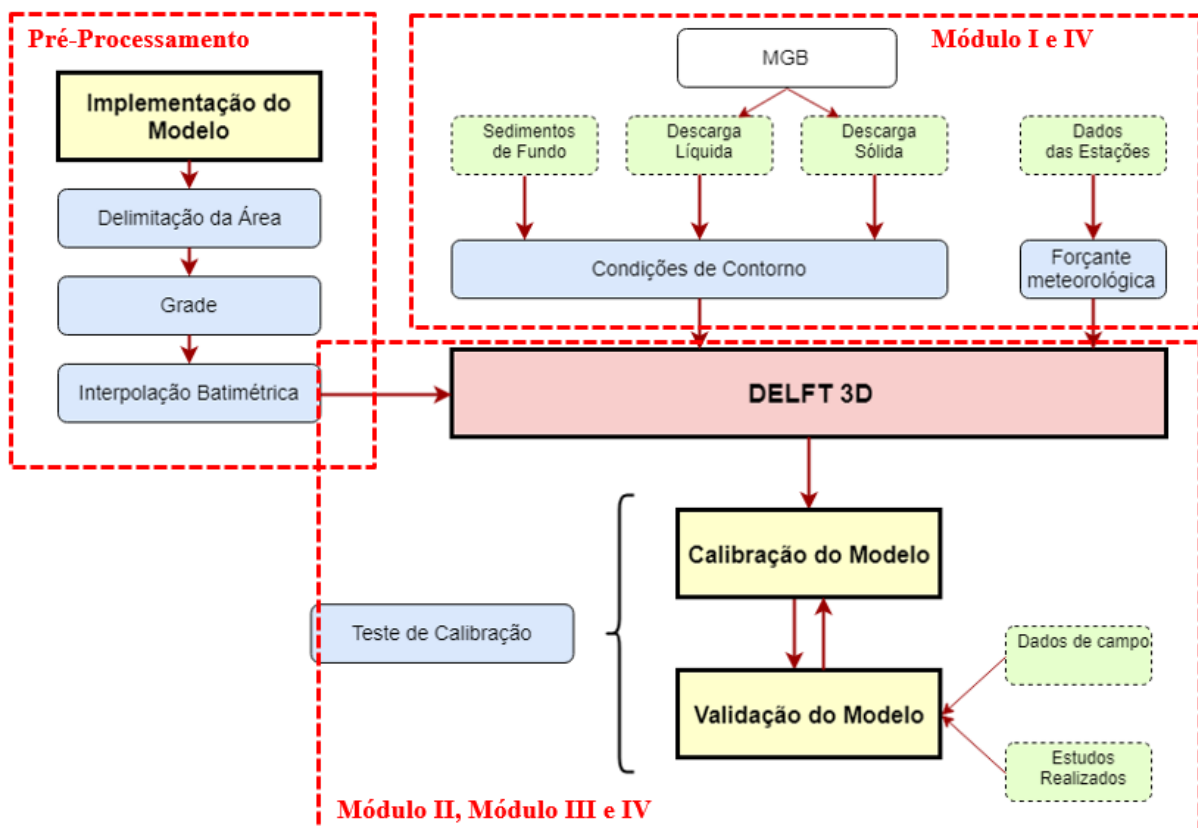
FIGURA 1. ÁREA DE ESTUDO E REGIÃO DE APLICAÇÃO DOS MÓDULOS I, II, III E CENÁRIOS



O Módulo I foi aplicado a todos os rios da Região Hidrográfica do Lago Guaíba, representados na FIGURA 1 pelas rede de drenagem, em azul. O Módulo II foi aplicado ao trecho baixo do Rio Jacuí, representado na FIGURA 1 pelo polígono em laranja. O Módulo III foi aplicado ao Lago Guaíba, representado na FIGURA 1 pelo polígono em verde. Por fim, a modelagem dos Cenários foi aplicada a toda Região Hidrográfica do Lago Guaíba, incluindo a região do Baixo Jacuí e Lago Guaíba.

Os modelos utilizados para realizar o estudo foram o MGB (Collischonn, et al., 2007), MGB-SED (Buarque, 2015) e Delft3D (Deltares, 2012). O fluxograma das etapas realizadas pode ser observado na FIGURA 2, em que os modelos MGB e MGB-SED são tratados simplesmente por MGB. O MGB foi utilizado no Módulo I e Cenários, teve como resultado as descargas líquidas e sólidas para cada trecho de rio da Região Hidrográfica do Lago Guaíba. Esses resultados foram utilizados como parâmetros de contorno para os Módulos II e III, realizados com o modelo Delft3D. No Módulo II, foi realizada a modelagem hidrodinâmica do trecho baixo do rio Jacuí, enquanto no Módulo III foi realizada a modelagem hidrodinâmica do Lago Guaíba. Nos Cenários, foram realizadas estimativas de variação de uso do solo, mudanças climáticas, variações de mineração de sedimentos no rio Jacuí e Lago Guaíba, entre outras variantes, para determinar padrões de variação do regime hidrológico e hidrossedimentológico a longo prazo. A partir de novos dados de entrada, foram geradas novas simulações na mesma cronologia: primeiro o Módulo I, depois o Módulo II e por fim o Módulo III.

FIGURA 2. FLUXOGRAMA DO ESTUDO HIDROSEDIMENTOLÓGICO DO LAGO GUAÍBA

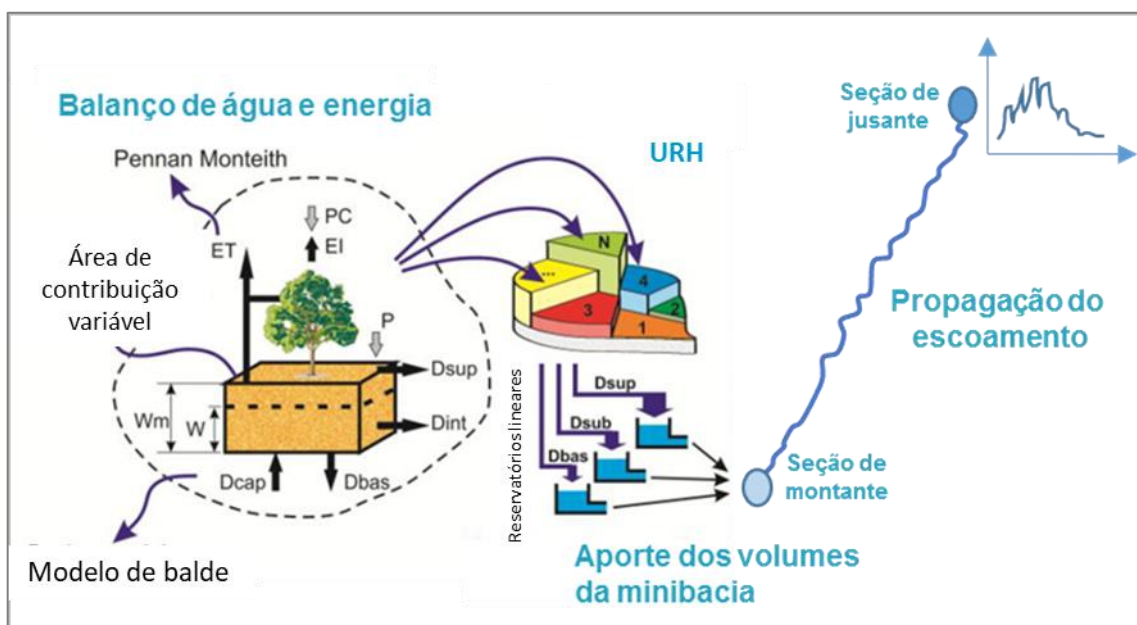


3 MÓDULO I

O modelo MGB (Collischonn, et al., 2007) foi utilizado no Módulo I (Modelagem de aporte de sólidos e líquidos da bacia hidrográfica) para representar os processos físicos relacionados ao ciclo hidrológico e de sedimentos na área de estudo. Por ser um modelo semi-distribuído no espaço, permite considerar a heterogeneidade das características presentes na bacia e como essas influenciam localmente os processos hidrológicos, como o clima, os usos do solo, os tipos de solo, as variações da precipitação, entre outras.

Os processos considerados na modelagem são: balanço de água no solo, precipitação, interceptação, evapotranspiração, infiltração, escoamentos superficiais, subsuperficiais e subterrâneos, além do armazenamento de água no solo (Collischonn et al., 2007). Mais detalhes podem ser encontrados no *Relatório P02 – Módulo I: Modelagem do aporte de sólidos e líquidos da bacia hidrográfica*. A FIGURA 3 mostra uma representação esquemática dos processos simulados no modelo MGB.

FIGURA 3. REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DOS PROCESSOS SIMULADOS NO MODELO MGB

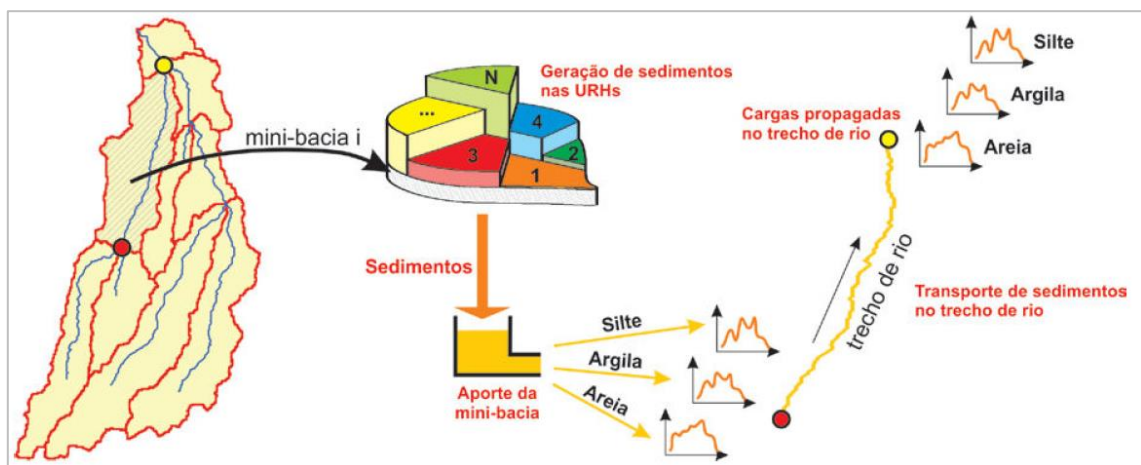


A aplicação do modelo MGB passa por uma etapa de pré-processamento onde são definidas as características físicas/espaciais da bacia, como o Modelo Digital de Elevação (MDE), a geração da rede de drenagem, delimitação das sub-bacias e minibacias e definição das Unidades de Resposta Hidrológica (URH).

O modelo MGB-SED (Buarque, 2015) é um modelo que representa os processos de erosão laminar e em sulcos nas encostas e o transporte de sedimentos no canal. A discretização espacial do

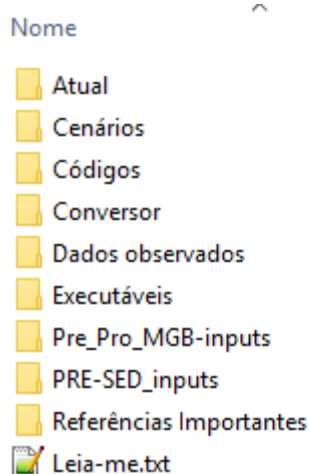
modelo, em sub-bacias e minibacias, é a mesma utilizada para o MGB e em cada URH são computados os volumes de sedimentos. Esses volumes são gerados a partir da Equação Universal de Perda de Solos Modificada - MUSLE (Williams, 1975). Posteriormente, os volumes de sedimentos são somados para cada minibacias e transferido das encostas para o canal por meio de reservatórios lineares. No canal, a propagação dos sedimentos em suspensão (frações de silte e argila) é feita utilizando a equação de difusão-advecção. A propagação da carga de leito (areia) foi realizada utilizando a equação da continuidade de sedimentos (Equação de Exner) e a fórmula de Yang (Yang, 1973; 1984) para calcular a capacidade de transporte do escoamento, e assim também se considerou os processos de erosão de leito e deposição no canal. Um esquema dos funcionamento do modelo MGB-SED é apresentado na FIGURA 4.

FIGURA 4. REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DOS PROCESSOS SIMULADOS NO MGB-SED



Para o presente estudo, o MGB foi aplicado em três etapas: (1) Pré-Processamento; (2) Simulação Hidrológica; e (3) Simulação Hidrossedimentológica. Os projetos executáveis do modelo (na pasta “Executáveis”), utilizados em cada etapa, bem como os dados de entrada, podem ser encontrados nas pastas de trabalho disponibilizadas, de acordo com a FIGURA 5. Mais detalhes podem ser encontrados no *Relatório P06 – Estrutura de todos os modelos desenvolvidos juntamente com os respectivos dados de entrada organizados e manuais descritivos*.

FIGURA 5. PASTAS DE TRABALHO DO MÓDULO I



Na etapa de Pré-Processamento do MGB foi utilizado o MDE do SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) de resolução espacial de 90 m e as Unidades de Resposta Hidrológicas (regiões que possuem mesmo comportamento hidrológico) foram obtidas do Mapa de URH da América do Sul (Fan, et al., 2015). A bacia foi discretizada em 17 sub-bacias e em 1512 minibacias. Na etapa de Pré-Processamento do MGB-SED, foi definido o parâmetro *LS* da MUSLE. Mais detalhes do funcionamento do modelo podem ser encontrados no *Relatório P02 – Módulo I: Modelagem do aporte de sólidos e líquidos da bacia hidrográfica*. Os dados utilizados na etapa de pré-processamento do MGB-SED se encontram na pasta “PRE-SED_MGB-inputs”. O código fonte e o projeto executável se encontram nas pastas “Códigos” e “Executáveis” respectivamente. Mais detalhes podem ser consultados no *Relatório P06 – Estrutura de todos os modelos desenvolvidos juntamente com os respectivos dados de entrada organizados e manuais descritivos*.

Na etapa de Simulação Hidrológica e Hidrossedimentológica, foram utilizados dados de clima de 813 estações pluviométricas da ANA (Agência Nacional de Águas) para gerar a chuva média diária de cada minibacia. Os dados de descarga líquidas e sólidas observadas foram obtidos de 13 estações fluviométricas da ANA para calibrar os modelos. Os dados climatológicos de temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento, pressão atmosférica e insolação estão disponíveis no banco de dados interno do MGB e são obtidos a partir das normais climatológicas do INMET (Fan e Collischonn, 2014). Os dados de chuva e de clima se encontram na pasta “Input”, dentro da pasta “Atual” e são referentes ao cenário atual de simulação. Os dados observados de descarga líquida e sólida se encontram na pasta “Dados observados”.

A calibração do modelo hidrológico foi realizada de forma manual, por tentativa e erro, baseada em Lopes et al. (2018), comparando os dados de vazões geradas pelo MGB com as vazões observadas pelas estações fluviométricas da ANA. O período de calibração foi de 1975 a 2005, enquanto o período

de validação foi de 2006 a 2015. Para avaliar a calibração, foram feitas análises qualitativas dos hidrogramas diários gerados pelo modelo, nas respectivas estações, com os hidrogramas diários das vazões observadas. Considerando o objetivo do estudo, torna-se mais relevante ter os picos de vazão bem representados para a posterior aplicação do modelo hidrossedimentológico. Assim, buscou-se com a calibração dar prioridade para uma boa representação dos picos de vazão. Além disso, foi realizada uma análise quantitativa, considerando três métricas de desempenho: coeficiente de correlação de Pearson (r), coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) e o erro relativo médio percentual ($BIAS$).

A calibração do módulo de sedimentos foi realizada através da calibração manual, por tentativa e erro, dos parâmetros K (fator de erodibilidade do solo) e C (fator de cobertura e uso do solo) para cada URH de cada sub-bacia de acordo com Rossoni (2018). O valor do parâmetro K foi calibrado a partir de estimativas iniciais de texturas de solo, disponibilizadas pelo mapa de tipos de solo do IBGE (2000). Os valores de C foram calibrados de acordo com dados de literatura (Carvalho, 2008; Farinasso et al., 2006; Frizzarim et al., 2015; Martins et al., 2010). Na sequência, realizou-se uma calibração de forma automática para obter maior acurácia dos resultados, seguindo a abordagem usada por Fagundes et al. (2019). Dessa forma, utilizou-se o algoritmo de otimização MOCOM-UA para calibrar o modelo MGB-SED, variando os coeficientes α (3,0-8,0) e β (0,2-1,2) e o parâmetro de retardo do escoamento superficial TKS , a partir de um coeficiente multiplicativo que variou entre 0,2 e 4,0. As faixas de variação dos três parâmetros calibráveis foram definidas com base na análise de sensibilidade apresentada por Fagundes et al. (2019). Foram utilizados até 100 conjuntos de parâmetros (NS) e o número de iterações máximas (Imaxgen) do algoritmo entre 50 e 100. Para avaliar a performance do modelo, foram usadas as mesmas métricas usadas na calibração do modelo hidrológico, e os resultados finais foram avaliados de acordo com a TABELA 1.

TABELA 1. MÉTRICAS DE AVALIAÇÃO DO MODELO HIDROSEDIMENTOLÓGICO

Avaliação	r	NSE	$BIAS$ (%)
Muito Bom	1,0 – 0,8	1,0 – 0,50	$BIAS < \pm 15$
Bom	0,8 – 0,6	0,50 – 0,25	$\pm 15 \leq BIAS \leq \pm 30$
Satisfatório	0,6 – 0,4	0,25 – 0,00	$\pm 30 \leq BIAS \leq \pm 55$
Insatisfatório	$\leq 0,4$	$\leq 0,00$	$BIAS \geq \pm 55$

Após a calibração e validação do modelo hidrossedimentológico, utilizou-se a descarga sólida em suspensão (QSS) e a descarga sólida de leito, estimadas pelo MGB-SED, para calcular a descarga sólida total (QST). Isso foi realizado somando as duas descargas em suspensão e de leito. Além disso, foram estimadas as QST a partir de dados observados. Embora não haja dados de descarga sólida de leito medidos em campo, utilizou-se o método de Colby para estimar as QST dos dados observados, que necessita das informações de concentração de sedimentos em suspensão e dados obtidos a partir da

medição da descarga líquida, como velocidade média do fluxo na seção, largura da seção, profundidade d'água e vazão. Esses dados foram obtidos das estações sedimentométricas da ANA. As descargas sólidas totais estimadas pelo modelo MGB-SED foram comparadas com as descargas sólidas totais estimadas por Colby.

Os resultados obtidos podem ser encontrados no *Relatório P02 – Módulo I: Modelagem do aporte de sólidos e líquidos da bacia hidrográfica*. Os modelos, dados de entrada e resultados brutos podem ser encontrado no *Relatório P06 – Estrutura de todos os modelos desenvolvidos juntamente com os respectivos dados de entrada organizados e manuais descritivos* e na pasta “output”, inserida na pasta “Atual”, para a etapa de calibração e validação do modelo.

4 MÓDULO II E MÓDULO III

Para a Modelagem hidrodinâmica e de transporte de sedimentos do Baixo Jacuí (Módulo II) e do Lago Guaíba (Módulo III) foi utilizado o modelo hidrodinâmico Delft3D. Dentre os módulos disponíveis no Delft3D, neste trabalho foi necessária a utilização do módulo FLOW (Hidrodinâmico) e SED (transporte de sedimentos) em ambas as modelagens. Sendo a ação das ondas um fator determinante na dinâmica sedimentar do Lago Guaíba, o módulo do DelftD WAVE (Ondas) foi também utilizado no Módulo III. Mais detalhes podem ser encontrados nos Relatórios *P03 – Relatório da Modelagem Hidrodinâmica de Sedimentos do Baixo Jacuí* e *P04 – Relatório da Modelagem Hidrodinâmica do Lago Guaíba*, respectivamente.

O módulo de transporte de sedimentos (SED) funciona somente em conjunto com o módulo hidrodinâmico (FLOW). Ao gerar o arquivo de simulação de hidrodinâmica, o processo de transporte de sedimentos pode ser acionado, sendo então considerado nas análises do modelo. Simulações dos campos de ondas (WAVE) podem ser realizadas separadas ou em conjunto com módulo FLOW. Quando selecionada a função de ondas no arquivo de hidrodinâmica tem-se a opção de rodar um após o outro ou em conjunto. Para as análises deste estudo, as simulações com os módulos FLOW, SED e WAVE foram realizadas simultaneamente.

A caracterização hidrodinâmica, campos de velocidade e direção dos fluxos e variações nos níveis da coluna de água para os modelos foram gerados a partir da utilização do módulo FLOW. O módulo SED foi aplicado para avaliar a dinâmica sedimentar das áreas de estudo, como áreas de deposição/erosão, taxa de sedimentação, taxa de erosão e também para a simulação dos processos de mineração. A função do Delft3D que simula o processo de mineração só pode ser acionada quando ambos os módulos FLOW e SED estão em operação. Por fim, o campo de ondas foi gerado utilizando o módulo WAVE no modelo do Lago Guaíba.

Os modelos foram calibrados e validados utilizando dados de nível de água, velocidade das correntes e mapas da dinâmica sedimentar das regiões analisadas e os comparando com os resultados dos modelos.

4.1 IMPLEMENTAÇÃO E SIMULAÇÃO

A primeira etapa de aplicação do Delft3D consiste na implementação do modelo para a área a ser simulada. A segunda etapa consiste na geração dos arquivos mestres, para então ocorrer a simulação. O modelo Delft3D necessita de uma série de dados e informações para realizar as simulações. A FIGURA 6 apresenta um diretório exemplo com todos os dados necessários para a modelagem, com exceção da pasta “Resultados”, onde constam as saídas do modelo.

O diretório demonstrado refere-se ao modelo hidrodinâmico do Lago Guaíba (Módulo III), entretanto as mesmas pastas e instruções são aplicadas ao modelo hidrodinâmico do Baixo Jacuí (Módulo II), com exceção do arquivo de ondas que não foi implementado para o Módulo II.

FIGURA 6. DIRETÓRIO GERAL PARA UTILIZAÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO DELFT3D

Nome	Tipo
Batimetria	Pasta de arquivos
Contornos	Pasta de arquivos
Forcantes	Pasta de arquivos
Grade	Pasta de arquivos
Linha de Costa	Pasta de arquivos
Pontos Secos	Pasta de arquivos
PontosObs	Pasta de arquivos
Resultados	Pasta de arquivos
Rugosidade	Pasta de arquivos
Sedimento	Pasta de arquivos
Guaiba_Cjacui_250m_arambare.fil	Arquivo FIL
Guaiba_Cjacui_250m_arambare	Arquivo MDF
mineracao_guaiba	Arquivo DAD
mineracao_guaiba	Arquivo POL
ondas	Microsoft Access ...

Na sequência são apresentados os nomes e conteúdos das pastas.

- **Batimetria** – arquivo .xyz com dados batimétricos obtidos para a área de estudo e o arquivo .dep que é a batimetria interpolada para o modelo.
- **Contornos** – arquivo de extensão .bnd com a localização e nomes das condições de contorno.

- **Forçantes** – arquivos .bct e .bcc com os nomes dos contornos e dados de vazão líquida e sólida, respectivamente e arquivo com série temporal de vento (.wnd)
- **Grade** – arquivos .grd e .enc constando as informações das grades geradas pelo modelo. Os dois arquivos correspondem a uma mesma grade.
- **Linha de Costa** – arquivo contendo as delimitações do contorno dos corpos d’água (.ldb).
- **Pontos Secos** – arquivo com a localização dos pontos secos da grade (.dry).
- **PontosObs** – arquivo com a localização dos pontos de observação (.obs).
- **Resultados** – arquivos de saída. Arquivos *com-* correspondem a saída gerada pela comunicação entre o modelo hidrodinâmico e o modelo de ondas, *trih-* apresentam as séries temporais de saída em formato de gráficos e o arquivo *trim-* os resultados apresentados em formato de mapa. Cada saída *com-*, *trih-* e *trim* possui dois arquivos associados, de mesmo nome, um .dat e um .def.
- **Rugosidade** – arquivo .xyz com dados de rugosidade obtidos para a área de estudo e o arquivo .rgh que corresponde a rugosidade interpolada para o modelo.
- **Sedimento** – arquivo .sed com dados de sedimentos coesivos e não coesivos e o arquivo .mor com informações sobre a morfologia do modelo.
- **Guaiba_Cjacui_250m_arambare.MDF e .fil** – os arquivos .mdf e .fil correspondem ao arquivo principal de simulação, onde todas as informações do modelo são reunidas.
- **mineração_guaiba.dad** – informações sobre as áreas de mineração, como o nome dos blocos de mineração, quantidade máxima de sedimentos a ser retirada (m³) e profundidade máxima. **Importante:** Para realizar as simulações, este arquivo deve permanecer na mesma pasta que o arquivo .MDF.
- **mineração_guaiba.pol** – polígonos das áreas a serem mineradas. **Importante:** Para realizar as simulações, este arquivo deve permanecer na mesma pasta que o arquivo .MDF.
- **Ondas** – arquivo principal para a simulação de ondas. **Importante:** Para realizar as simulações, este arquivo deve permanecer na mesma pasta que o arquivo .MDF.

Para a implementação do modelo, com a geração ou alteração da grade, batimetria, e rugosidade, serão utilizadas as pastas “Batimetria”, “Grade”, “Linha de Costa” e “Rugosidade”.

O arquivo contendo as delimitações do contorno, presente na pasta “Linha de Costa”, servirá para visualizar a região que a grade deve ser implementada. A grade pode ser gerada utilizando linhas, chamadas no modelo de *Splines*, que seguem o formato do contorno (grade curvilínea), ou de maneira regular (grade regular), onde são informados a localização de início da grade, posição, resolução dos pontos de grade e números de células em X e Y. Após criada ou alterada a grade é salva na pasta “Grade”.

Com a grade implementada deve-se realizar a interpolação da batimetria e da rugosidade de fundo. O formato de leitura de dados obtidos em campo deve ser .xyz. Após a leitura do arquivo .xyz é possível realizar a interpolação da batimetria, que passará a ter extensão .dep. A interpolação da rugosidade ocorre como se fosse um arquivo de batimetria, após salvo o arquivo .dep a extensão pode ser alterada manualmente de .dep para .rgh.

Com os arquivos base implementados para as regiões é iniciada a elaboração do arquivo principal de simulação, aqui chamado de MDF. O arquivo MDF é dividido em 12 seções:

- **Description** – descrição da simulação.
- **Domain** – inseridos os arquivos de grade (.grd e .enc), batimetria (.dep) e pontos secos (.dry).
- **Time Frame** – data de início e término da simulação e o passo de tempo.
- **Processes** – nesta seção são acionados os processos de transporte de sedimentos (Módulo SED), ondas (Módulo WAVE), ação dos ventos e o processo de mineração (*Dredging and Dumping*) nas simulações dos Cenários.
- **Initial Conditions** – condições iniciais de nível de água e concentração de sedimentos.
- **Boundaries** – arquivos de condições de contorno .bnd, .bcc e .bct.

O arquivo .bnd (pasta “Contornos”) contém informações sobre a localização do contorno na grade e o tipo de entrada de dados (ex: vazão ou constituintes harmônicas). Essas informações são inseridas diretamente no modelo, que após salvo será gerado um arquivo com extensão .bnd. Os arquivos de descarga líquida (.bct) e sólida (.bcc) devem ser gerados no formato do Delft3D com o cabeçalho e dados em colunas (ver arquivos na pasta “Forçantes” como exemplo).

- **Physical Parameters** – constantes utilizadas, arquivo de rugosidade (.rgh), dados de viscosidade, informações sobre os tipos de sedimentos (.sed), arquivo de morfologia (.mor) e o arquivo contendo a série temporal de vento.

Os arquivos de sedimentos (.sed) e de morfologia (.mor) são gerados inserindo dados no modelo manualmente, quando salvo serão criados os arquivos .sed e .mor.

O arquivo de vento (.wnd) deve ser gerado no formato do Delft3D com o cabeçalho e dados em colunas (ver arquivo na pasta “Forçantes” como exemplo).

- **Numerical Parameters** - parâmetros numéricos do modelo.
- **Operations** – operações adicionais. Para o modelo realizar o processo de *Dredging and Dumping* deve-se indicar o arquivo .dad nesta seção.
- **Monitoring** – arquivo com pontos de observação (.obs).
- **Additional Parameters** – parâmetros adicionais do modelo. Para o modelo realizar o processo de *Dredging and Dumping* deve-se inserir a palavra-chave FILDAD e indicar o nome do arquivo com extensão .dad. Formato: #mineracao_guaiba.dad#.

- **Output** – informações para armazenamento dos arquivos de saída, como data de início, término e intervalo de armazenamento.

Após inseridas todas as informações o MDF é criado. Para as simulações do Módulo II, no qual não foi necessária a implementação do campo de ondas, após a geração do MDF a próxima etapa consiste na simulação.

Para as simulações do Módulo III é necessária a elaboração do arquivo de simulação do campo de ondas. Como a simulação hidrodinâmica acontece simultânea à simulação das ondas, ao informar qual arquivo MDF o campo de ondas deve estar relacionado. As únicas informações necessárias no arquivo de ondas são a grade e batimetria do modelo (mesma utilizada no MDF, pasta “Grade” e “Batimetria”), a condição de contorno do campo de ondas e as informações do campo de ventos, gerador das ondas. A condição de contorno do campo de ondas coincide com a fronteira do MDF em que ocorre a entrada de ondas. Com o arquivo MDF e de ondas salvos é possível iniciar a simulação do modelo hidrodinâmico e de transporte de sedimentos do Lago Guaíba.

4.2 ESTRUTURA COMPUTACIONAL

Diferentes resoluções de grades, passo de tempo, complexidades dos modelos com a adição de novos processos e capacidade de processamento de computadores interferem diretamente no tempo de simulação dos modelos matemáticos. Para os modelos implementados neste estudo utilizando a máquina especificada na TABELA 2 o tempo para simular o período de um ano variou entre 8 e 24 horas.

TABELA 2. INFORMAÇÕES DO SISTEMA COMPUTACIONAL

Item	Descrição
Nome do Sistema Operacional	Microsoft Windows 7 Professional
Versão	6.1.7601 Service Pack 1 Compilação 7601
Processador	Intel ® Core™ i7 – 6700 CPU 3.40 GHz
Memória RAM	8 GB
Memória Virtual Total	16 GB
Memória Virtual Disponível	8 GB

5 CENÁRIOS

Nos Cenários, buscou-se estudar diferentes cenários futuros que combinassem tanto as mudanças climáticas quanto as mudanças no uso e ocupação do solo, a fim de subsidiar a tomada de decisões na Região Hidrográfica do Lago Guaíba. Os estudos foram realizados a partir de simulações hidrossedimentológicas de toda a região hidrográfica e de simulações hidrodinâmicas do Baixo Jacuí e do Lago Guaíba. Os cenários avaliados incluíram tanto cenários tendenciais quanto cenários futuros que implicariam na maior (aumento das precipitações e redução da cobertura vegetal) e menor (diminuição das precipitações e aumento da cobertura vegetal) produção de sedimentos para o período de 2016 a 2030.

Para avaliar os cenários futuros, foram realizadas as etapas de i) simulação hidrológica e hidrossedimentológica com mudanças climáticas e mudanças de uso e cobertura do solo e ii) simulação hidrodinâmica dos cenários tendenciais e de desflorestamento no Lago Guaíba.

Para a simulação hidrológica e hidrossedimentológica com mudanças climáticas e mudanças de uso e ocupação do solo, foram utilizados os resultados da avaliação das mudanças de uso e ocupação do solo em conjunto com modelos de mudanças climáticas. Foram selecionados, com base em Schuster (2019), três modelos climáticos e condições de emissões de GEE (gases de efeito estufa), descritos a seguir:

- Cenário de vazões máximas (extremo superior - ES): Utilizou-se o modelo HadGEM2-ES para a condição de emissões de GEE elevadas (RCP 8.5);
- Cenário de vazões medianas (mais provável - MP): Utilizou-se o modelo BNU-ESM para a condição de emissões de GEE restritas (RCP 2.6);
- Cenário de vazões mínimas (extremo inferior - EI): Utilizou-se o modelo GDEL-CM3 para a condição de emissões de GEE elevadas (RCP 8.5).

Esses modelos forneceram séries de dados para o período de 2016 a 2030 e de variáveis necessárias para aplicação do modelo MGB-SED: insolação, radiação, precipitação, pressão, temperatura, umidade relativa do ar e velocidade do vento. A partir dessas informações foram avaliados os efeitos das mudanças climáticas nas vazões, QSS e QST na Região Hidrográfica do Lago Guaíba.

As mudanças de usos do solo tendencial, com máximo florestamento e máximo desflorestamento, em conjunto com os modelos de mudanças climáticas, resultaram em combinações de cenários que visaram avaliar quais seriam as condições que resultariam nos maiores, menores e mais prováveis aportes de descarga sólida para o Lago Guaíba em um futuro próximo e, também, quantificar

as estimativas de volumes aportados. A TABELA 3 apresenta os nove cenários simulados com o modelo MGB-SED (Módulo I) para quantificar os aporte de sedimentos, que são descritos na sequência.

TABELA 3. CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO DO MGB

Modelo/Use do Solo	Desflorestamento (Desm)	Tendencial (At)	Florestamento (Ref)
HadGEM2-ES (ES)	ES_Desm	ES_At	ES_Ref
BNU-ESM (MP)	MP_Desm	MP_At	MP_Ref
GDEL-CM3 (EI)	EI_Desm	EI_At	EI_Ref

- ES_Desm: Cenário extremo superior de mudanças climáticas com cenário mais extremo de desflorestamento, considerando as mudanças de uso e ocupação do solo;
- ES_At: Cenário extremo superior de mudanças climáticas com cenário tendencial (mais provável), considerando as mudanças de uso e ocupação do solo;
- ES_Ref: Cenário extremo superior de mudanças climáticas com cenário mais extremo de florestamento, considerando as mudanças de uso e ocupação do solo;
- MP_Desm: Cenário mais provável de mudanças climáticas com cenário mais extremo de desflorestamento, considerando as mudanças de uso e ocupação do solo;
- MP_At: Cenário mais provável de mudanças climáticas com cenário tendencial (mais provável), considerando as mudanças de uso e ocupação do solo;
- MP_Ref: Cenário mais provável de mudanças climáticas com cenário mais extremo de florestamento, considerando as mudanças de uso e ocupação do solo;
- EI_Desm: Cenário extremo inferior de mudanças climáticas com cenário mais extremo de desflorestamento, considerando as mudanças de uso e ocupação do solo;
- EI_At: Cenário extremo inferior de mudanças climáticas com cenário tendencial (mais provável), considerando as mudanças de uso e ocupação do solo;
- EI_Ref: Cenário extremo inferior de mudanças climáticas com cenário mais extremo de florestamento, considerando as mudanças de uso e ocupação do solo;

Os nove cenários futuros foram simulados alterando-se as informações climatológicas, de precipitação e uso e cobertura do solo no modelo MGB-SED para gerar informações futuras de descarga líquida e sólida. Na pasta “Cenários”, são apresentados os dados de entrada e os principais dados de saída para os nove cenários simulados de mudanças de uso do solo combinados com os cenários de mudanças climáticas para o período de 2006 a 2035. Mais informações podem ser encontradas no *Relatório P06 – Estrutura de todos os modelos desenvolvidos juntamente com os respectivos dados de entrada organizados e manuais descritivos*.

Os resultados gerados nas simulações do Módulo I para os cenários Es_Desm e MP_At, em conjunto com as simulações históricas, foram utilizados como entrada do Módulo II, para que então as saídas do Módulo II servissem de entrada para o Módulo III. As simulações foram realizadas com o intuito de analisar diferentes cenários com e sem mineração no trecho final do Baixo Jacuí e do Lago Guaíba. Mais informações podem ser encontradas no *Relatório P06 – Estrutura de todos os modelos desenvolvidos juntamente com os respectivos dados de entrada organizados e manuais descritivos* e no *Relatório P05 – Relatório de Cenários*.

A TABELA 4 apresenta o resumo dos seis cenários simulados com o Delft3D, seguido da descrição dos mesmos.

TABELA 4. RESUMO DOS CENÁRIOS SIMULADOS COM O DELFT3D

Cenário	Módulo I	Módulo II	Módulo III	
ES_Desm_SJ_CG_NA	Desflorestamento	Sem mineração	Com mineração	Aumento do nível
MP_At_CJ_SG_NHist	Provável	Com mineração	Sem mineração	Nível histórico
MP_At_CJ_CG_NHist	Provável	Com mineração	Com mineração	Nível histórico
MP_At_SJ_CG_NHist	Provável	Sem mineração	Com mineração	Nível histórico
Hist_CJ_SG_NHist	Histórico	Com mineração	Sem mineração	Nível histórico
Hist_SJ_SG_NHist	Histórico	Sem mineração	Sem mineração	Nível histórico

- ES_Desm_SJ_CG_NA: Cenário com maior aporte de sedimentos, sem mineração no Jacuí, com mineração no Guaíba, com aumento no nível da Laguna dos Patos.
- MP_At_CJ_SG_NHist: Cenário mais provável de aporte de sedimentos, com mineração no Jacuí, sem mineração no Guaíba, com nível histórico na Laguna dos Patos.
- MP_At_CJ_CG_NHist: Cenário mais provável de aporte de sedimentos, com mineração no Jacuí, com mineração no Guaíba e com nível histórico na Laguna dos Patos.
- MP_At_SJ_CG_NHist: Cenário mais provável de aporte de sedimentos, sem mineração no Jacuí, com mineração no Guaíba e com nível histórico na Laguna dos Patos.
- Hist_CJ_SG_NHist: Cenário com aporte histórico de sedimentos, com mineração no Jacuí, sem mineração no Guaíba e com nível histórico na Laguna dos Patos.
- Hist_SJ_SG_NH: Cenário com aporte histórico de sedimentos, sem mineração no Jacuí, sem mineração no Guaíba e nível histórico na Laguna dos Patos.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BUARQUE, D. C. SIMULAÇÃO DA GERAÇÃO E DO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EM GRANDES BACIAS: Estudo de caso do rio Madeira. **Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental)**: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.
- CARVALHO, N. O. **Hidrossedimentologia Prática**. Rio de Janeiro: Interciência, 2008.
- COLLISCHONN, W.; ALLASIA, D.; SILVA, B. C.; TUCCI, C. E. M. The MGB-IPH model for large-scale rainfall-runoff modelling. **Hydrological Sciences Journal**, v. 52, p. 878-895, 2007, doi:10.1623/hysj.52.5.878.
- DELTARES. User Manual - Delft3D - FLOW. WL | Delft Hydraulics, 2012.
- FAN, F. M.; COLLISCHONN, W. Integração do modelo MGB-IPH com Sistema de Informação Geográfica. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 19, p. 243-254, 2014.
- FAGUNDES, H. O.; FAN, F. M.; PAIVA, R. C. D. Automatic calibration of a large-scale sediment model using suspended sediment concentration, water quality, and remote sensing data. **RBRH**, v. 24, 2019.
- FAN, F. M.; BUARQUE, D. C.; PONTES, P. R. M.; COLLISCHONN, W. Um mapa de Unidades de Resposta Hidrológica para a América do Sul. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 21., Brasília/DF. **Anais...** Brasília: ABRH, 2015.
- FARINASSO, M.; CARVALHO JR, O. A.; GUIMARÃES, R. F.; GOMES, R. A. T.; RAMOS, V. M. Avaliação qualitativa do potencial de erosão laminar em grandes áreas por meio da EUPS – Equação Universal de Perdas de Solo, utilizando novas metodologias em SIG para os cálculos dos seus fatores na região do Alto Parnaíba-PI-MA. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, ano 7, n. 2, p. 73-85, 2006.
- FRIZZARIM, S. S.; SILVA, B. P. C.; SILVA, M. L. N.; BOTEGA, A. A.; BATISTA, P. V. G.; ELISEI, L. G. Fator cobertura e manejo do solo em cultivos de eucalipto e floresta nativa no município de Eldorado do Sul, RS. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 35, Natal. **Anais...** Natal, 2015.
- IBGE. **Cartas Temáticas**. Disponível em: < <https://mapas.ibge.gov.br/bases-e-referenciais/cartas-tematicas.html>>. Último acesso em: 04 de dezembro de 2017. Escala 1:250.000. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística/Coordenação de Cartografia de Geociências do IBGE. Projeto Sistema de Vigilância da Amazônia (SIVAM), 2000.

LOPES, V. A. R.; FAN, F. M.; PONTES, P. R. M.; SIQUEIRA, V. A.; COLLISCHONN, W.; MARQUES, D. M. A first integrated modelling of a river-lagoon large-scale hydrological system for forecasting purposes. **Journal of Hydrology**, v. 565, p. 177-196, 2018.

MARTINS, S. G.; SILVA, M. L. N.; AVANZI, J. C.; CURTI, N.; FONSECA, S. Fator cobertura e manejo do solo e perdas de solo e água em cultivo de eucalipto e Mata Atlântica nos Tabuleiros Costeiros do estado do Espírito Santo. *Scientia Forestalis*. Piracicaba, v. 38, n. 87, p. 517-526, 2010.

ROSSONI, R. B.; FAN, F. M.; LOPES, V. A. L. Estimativa da descarga sólida de sedimentos em suspensão para o Lago Guaíba/RS através da modelagem hidrossedimentológica de grande escala. In: XIII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE SEDIMENTOS 2018, Vitória/ES. **Anais...** Vitória/ES, 2018.

WILLIAMS, J. R. **Sediment-yield prediction with universal equation using runoff energy factor**. Washington: Publication ARS-S-40. US Department of Agriculture, 1975.

YANG, C. T. **Incipient motion and sediment transport**. *J. Hydr. Div.*, 99(10), pp. 1679-1704, 1973

YANG, C. T. **Unit stream power equation for gravel**. *J. Hydraulic Eng., ASCE*, 110(12), 1984