

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO MATO GROSSO  
INSTITUTO DE FÍSICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA AMBIENTAL**

**SISTEMA DE SUPORTE A DECISÃO ACOPLADO AO  
MODELO SWAT PARA A GESTÃO DE  
RECURSOS HÍDRICOS**

**CARLOS UESLEI RODRIGUES DE OLIVEIRA**

**PROF. DR. PETER ZEILHOFER  
ORIENTADOR**

**Cuiabá, MT  
Julho 2020**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO MATO GROSSO  
INSTITUTO DE FÍSICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA AMBIENTAL**

**SISTEMA DE SUPORTE A DECISÃO ACOPLADO AO  
MODELO SWAT PARA A GESTÃO DE  
RECURSOS HÍDRICOS**

**CARLOS UESLEI RODRIGUES DE OLIVEIRA**

*Tese apresentada ao Programa de Pós-  
Graduação em Física Ambiental da  
Universidade Federal de Mato Grosso,  
como parte dos requisitos para obtenção  
do título de Doutor em Física Ambiental.*

**PROF. DR. PETER ZEILHOFER  
ORIENTADOR**

**Cuiabá, MT  
Julho 2020**

### **Dados Internacionais de Catalogação na Fonte.**

R696s Rodrigues de Oliveira, Carlos Ueslei.  
SISTEMA DE SUPORTE A DECISÃO ACOPLADO AO MODELO SWAT  
PARA A GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS / Carlos Ueslei Rodrigues de  
Oliveira. -- 2020  
156 f. : il. color. ; 30 cm.

Orientador: Peter Zeilhofer.  
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Mato Grosso, Instituto de Física,  
Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental, Cuiabá, 2020.  
Inclui bibliografia.

1. Gestão de recursos hídricos. 2. Tomada de decisão. 3. Uso múltiplos da água. I.  
Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

**Permitida a reprodução parcial ou total, desde que citada a fonte.**



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO**  
**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO**  
**PRÓ-REITORIA DE ENSINO DE PÓS-GRADUAÇÃO**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA AMBIENTAL**

**FOLHA DE APROVAÇÃO**

**TÍTULO: SISTEMA DE SUPORTE A DECISÃO ACOPLADO AO MODELO SWAT PARA A GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS**

**AUTOR: DOUTORANDO CARLOS UESLEI RODRIGUES DE OLIVEIRA**

Tese de Doutorado defendida e aprovada em 06 de julho de 2020, pela comissão julgadora:

**COMPOSIÇÃO DA BANCA EXAMINADORA**

1. Prof. Dr. Peter Zeilhofer - Orientador (Instituto de Geografia, História e Documentação/IGHD/UFMT)
2. Prof. Dr. Jean Caminha - Examinador Interno (Instituto de Computação – IC/UFMT)
3. Prof. Dr. Ibraim Fantin da Cruz - Examinador Interno (Faculdade de Arquitetura, Engenharia e Tecnologia/UFMT)
4. Profa. Dra. Eliana Beatriz Nunes Rondon Lima - Examinadora Interna (Faculdade de Arquitetura, Engenharia e Tecnologia/UFMT)
5. Prof. Dr. Fernando da Silva Sallo - Examinador Externo (Universidade de Cuiabá/UNIC)
6. Profa. Dra. Danielle de Almeida Bressiani - Examinadora Externa (Universidade Federal de Pelotas - UFPel)

**CUIABÁ-MT, 06/07/2020.**



Documento assinado eletronicamente por **SERGIO ROBERTO DE PAULO, Coordenador(a) de Programas de Pós-Graduação em Física Ambiental - IF/UFMT**, em 06/07/2020, às 19:20, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **PETER ZEILHOFER, Docente da Universidade Federal de Mato Grosso**, em 06/07/2020, às 20:47, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **JEAN CAMINHA, Docente da Universidade Federal de Mato Grosso**, em 07/07/2020, às 07:26, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Danielle de Almeida Bressiani, Usuário Externo**, em 07/07/2020, às 10:17, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Fernando da Silva Sallo, Usuário Externo**, em 07/07/2020, às 12:22, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **IBRAIM FANTIN DA CRUZ, Docente da Universidade Federal de Mato Grosso**, em 07/07/2020, às 15:35, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **ELIANA BEATRIZ NUNES RONDON LIMA, Docente da Universidade Federal de Mato Grosso**, em 07/07/2020, às 16:50, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **CARLOS UESLEI RODRIGUES DE OLIVEIRA, Docente da Universidade Federal de Mato Grosso**, em 10/07/2020, às 18:12, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [http://sei.ufmt.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](http://sei.ufmt.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **2610807** e o código CRC **8340D8F0**.

Dedico esse trabalho ao meu filho Tomás  
Hernandes de Oliveira que viu a minha  
defesa de mestrado no ventre de sua mãe e  
que acompanhará essa minha nova etapa  
como uma bela estrelinha no céu

## **AGRADECIMENTOS**

- A minha esposa Profa. Dra. Thais Hernandes que sempre esteve do meu lado nos últimos 23 anos de minha vida.
- Ao Prof. Dr. Peter Zeilhofer que aceitou me orientar tanto no mestrado quanto no doutorado e que tem sido um exemplo de pesquisador e amigo
- Aos Prof. Dr. José de Souza Nogueira e Prof. Dr. Sergio de Paula pelo suporte em momentos complicados da minha vida e nunca permitiram que eu desistisse desse doutorado;
- A todos(as)os(as)professores(ras)do Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental da Universidade Federal de Mato Grosso, onde transmitiram seus conhecimentos;
- Aos colegas do Instituto de Computação por toda a ajuda para que eu pudesse concluir essa etapa.
- A todos os colegas de curso que ajudaram em muito, os quais se tornaram grandes amigos.

## SUMÁRIO

|                                                                                       |             |
|---------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| <b>LISTA DE FIGURAS .....</b>                                                         | <b>viii</b> |
| <b>LISTA DE QUADROS .....</b>                                                         | <b>x</b>    |
| <b>LISTA DE EQUAÇÕES.....</b>                                                         | <b>xi</b>   |
| <b>LISTA DE TABELAS .....</b>                                                         | <b>xii</b>  |
| <b>LISTA DE ABREVIATURAS .....</b>                                                    | <b>xiii</b> |
| <b>RESUMO .....</b>                                                                   | <b>xiv</b>  |
| <b>ABSTRACT .....</b>                                                                 | <b>xv</b>   |
| <br>                                                                                  |             |
| <b>1. Introdução.....</b>                                                             | <b>1</b>    |
| 1.1 Objetivos .....                                                                   | 7           |
| 1.1.1 Geral .....                                                                     | 7           |
| 1.1.2 Específicos .....                                                               | 8           |
| <br>                                                                                  |             |
| <b>2. Revisão BIBLIOGRÁFICA.....</b>                                                  | <b>9</b>    |
| 2.1 Conceitos da Política e Gestão dos Recursos Hídricos no Brasil .....              | 9           |
| 2.2 Sistemas de suporte à decisão .....                                               | 14          |
| 2.3 Sistemas de suporte à decisão para subsidiar a gestão dos recursos hídricos ..... | 17          |
| 2.4 O modelo SWAT.....                                                                | 20          |
| 2.4.1 Principais arquivos de entradas e saídas do SWAT .....                          | 25          |
| 2.4.1.1 Nível da Bacia .....                                                          | 26          |
| 2.4.1.2 Nível Sub-bacia .....                                                         | 26          |
| 2.4.1.3 Nível HRU.....                                                                | 27          |
| 2.4.1.4 Arquivos de Saída .....                                                       | 27          |
| 2.4.2 Estrutura do arquivo fig.fig .....                                              | 28          |
| 2.5 Índice de qualidade de água CCME-WQI.....                                         | 32          |
| <br>                                                                                  |             |
| <b>3. Materiais e métodos .....</b>                                                   | <b>37</b>   |
| 3.1 Concepção do sistema SWAT_Gestão e seus pré-requisitos .....                      | 37          |
| 3.1.1 Arquitetura geral .....                                                         | 37          |
| 3.1.2 Funcionamento básico do sistema.....                                            | 39          |
| 3.2 Alterações feitas pelo sistema SWAT_Gestão.....                                   | 44          |
| 3.3 Banco de Dados do SWAT_Gestão .....                                               | 46          |
| 3.3.1 Diagrama de entidade e relacionamento .....                                     | 46          |
| 3.3.2 Descrição das tabelas .....                                                     | 47          |
| 3.3.2.1 Configuração do SWAT_Gestão (Configuracao) .....                              | 47          |
| 3.3.2.2 Tipos de Uso e Cobertura de Solo (Tipo_Cobertura_Solo) .....                  | 48          |
| 3.3.2.3 Bacia.....                                                                    | 48          |
| 3.3.2.4 Sub-bacia (Subbacia).....                                                     | 50          |
| 3.3.2.5 Polígono (Poligono) .....                                                     | 53          |
| 3.3.2.6 Canal Principal (Canal_Principal).....                                        | 53          |
| 3.3.2.7 HRU .....                                                                     | 54          |

|           |                                                                                                        |           |
|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.3.2.8   | Armazenamento de fontes pontuais (FONTE_PONTUAL) .....                                                 | 55        |
| 3.3.2.9   | Simulação do Canal Principal (Simulacao_CanalPrincipal) .....                                          | 56        |
| 3.3.2.10  | Simulação das Sub-Bacias (Simulacao_Subbacia) .....                                                    | 58        |
| 3.3.2.11  | Tabela Situação (Situacao).....                                                                        | 59        |
| 3.3.2.12  | Simulação de reservatórios (Simulacao_Reservatorio).....                                               | 60        |
| 3.4       | Processos implementados no SWAT_gestao .....                                                           | 61        |
| 3.4.1     | Cadastramento de uma Bacia Hidrográfica.....                                                           | 62        |
| 3.4.1.1   | Cadastrar Bacia Hidrográfica .....                                                                     | 62        |
| 3.4.1.2   | Importar arquivos do projeto SWAT original .....                                                       | 63        |
| 3.4.1.3   | Recriar Rede Hidrográfica .....                                                                        | 64        |
| 3.4.1.4   | Importar fontes de poluição pontuais e captação de água.....                                           | 65        |
| 3.4.1.5   | Importar dados das HRUs .....                                                                          | 66        |
| 3.4.2     | Gerar os Cenário de base e Cenário atual .....                                                         | 66        |
| 3.4.2.1   | Mudar UOT .....                                                                                        | 67        |
| 3.4.2.2   | Gerar Simulação .....                                                                                  | 68        |
| 3.4.2.3   | Configurar arquivos de captações/lançamentos do SWAT .....                                             | 69        |
| 3.4.2.4   | Importar Output.rch.....                                                                               | 70        |
| 3.4.2.5   | Avaliar a Qualidade pelo CCME-WQI .....                                                                | 72        |
| 3.4.2.6   | Avaliar componente do index com o valor da referência.....                                             | 75        |
| 3.4.3     | Incluir uma nova fonte de poluição pontual.....                                                        | 75        |
| 3.4.3.1   | Comparar índices CCME-WQI.....                                                                         | 77        |
| 3.4.3.2   | Verifica classificação do índice CCME-WQI.....                                                         | 79        |
| 3.4.4     | Módulo de Suporte à Decisão .....                                                                      | 79        |
| 3.4.4.1   | Gerar lista de alternativas.....                                                                       | 82        |
| 3.4.4.2   | Fazer alterações de Suporte à Decisão .....                                                            | 83        |
| 3.4.5     | Calcular total de constituintes de uma sub-bacia .....                                                 | 85        |
| <b>4.</b> | <b>Estudos de caso .....</b>                                                                           | <b>86</b> |
| 4.1       | Área de estudo, modelagem base com o SWAT e escolha das sub-bacias para validação do SWAT_Gestão ..... | 86        |
| 4.2       | Cenários avaliados.....                                                                                | 91        |
| 4.2.1     | Inclusão de novas fontes de poluição pontual (EC1) .....                                               | 91        |
| 4.2.1.1   | Cenários Base e Atual .....                                                                            | 92        |
| 4.2.1.2   | Cenários de inclusão avaliados (Cenários Analisados).....                                              | 93        |
| 4.2.1.2.1 | EC1_C1a e EC1_C1b .....                                                                                | 94        |
| 4.2.1.2.2 | EC1_C2a e EC1_C2b.....                                                                                 | 97        |
| 4.2.1.2.3 | Análise detalhada de duas sub-bacias no cenário EC1_C2a.....                                           | 98        |
|           | Sub-Bacia 75 .....                                                                                     | 98        |
|           | Sub-Bacia 171 .....                                                                                    | 100       |
|           | Sub-Bacia 251 .....                                                                                    | 102       |
| 4.2.2     | Uso do SWAT_Gestão na análise de alterações por cargas de poluição difusa e pontual .....              | 103       |
| 4.2.2.1   | Cenários Base e Atual .....                                                                            | 103       |
| 4.2.2.2   | Cargas lançadas e configuração do estudo de caso (EC2) .....                                           | 104       |
| 4.2.2.3   | Sensibilidade do CCME-WQI frente alterações das cargas lançadas ...                                    | 108       |
| 4.2.2.4   | Desempenho do módulo de SSD em gerar propostas de redução de impactos .....                            | 111       |

|                         |                                                                     |            |
|-------------------------|---------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>5.</b>               | <b>Discussão .....</b>                                              | <b>114</b> |
| 5.1                     | Concepção e implementação .....                                     | 116        |
| 5.1.1                   | Integração com o executável do SWAT e não com uma biblioteca.....   | 116        |
| 5.1.2                   | Determinação dos valores de referência.....                         | 117        |
| 5.1.3                   | Concepção do módulo de suporte a decisão.....                       | 118        |
| 5.1.4                   | Versão 2009 do SWAT como componente do sistema SWAT_Gestão          | 119        |
| 5.1.5                   | Definições sobre a arquitetura do sistema.....                      | 119        |
| 5.2                     | Funcionalidade do sistema no contexto do domínio de aplicação ..... | 120        |
| <b>6.</b>               | <b>Conclusão .....</b>                                              | <b>124</b> |
| <b>Referências.....</b> |                                                                     | <b>127</b> |

## LISTA DE FIGURAS

|                  |                                                                                                                                                                                                            |    |
|------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>FIGURA 1</b>  | - Disponibilidade hídrica nos rios do Brasil (Q <sub>95</sub> ) e IQA (Média anual dos anos 2016/17).....                                                                                                  | 11 |
| <b>FIGURA 2</b>  | - Bacia Hidrográfica dividida em sub-bacias. Os processos da fase aquática em reservatórios são simulados por um próprio módulo.                                                                           | 22 |
| <b>FIGURA 3</b>  | - Processos da fase terrestre representados no SWAT. <b>FONTE:</b> (ARNOLD et al., 2010) .....                                                                                                             | 23 |
| <b>FIGURA 4</b>  | - Processos da fase aquática representados no SWAT. <b>FONTE:</b> (ARNOLD et al., 2010) .....                                                                                                              | 24 |
| <b>FIGURA 5</b>  | - Estrutura do arquivo fig.fig <b>FONTE:</b> (ARNOLD et al., 2010)....                                                                                                                                     | 29 |
| <b>FIGURA 6</b>  | - Concepção geral do SWAT_Gestão. ....                                                                                                                                                                     | 37 |
| <b>FIGURA 7</b>  | - Fluxograma multifuncional dos processos, dados e decisões no SWAT_Gestão. ....                                                                                                                           | 40 |
| <b>FIGURA 8</b>  | - Diagrama de Entidade e Relacionamento do sistema. ....                                                                                                                                                   | 47 |
| <b>FIGURA 9</b>  | - Fluxograma para cadastro de uma bacia hidrográfica. ....                                                                                                                                                 | 62 |
| <b>FIGURA 10</b> | - Interface gráfica para cadastro de uma Bacia Hidrográfica.....                                                                                                                                           | 63 |
| <b>FIGURA 11</b> | - Processos para importação de um projeto original do SWAT.....                                                                                                                                            | 63 |
| <b>FIGURA 12</b> | - Procedimento para criação da topologia da bacia hidrográfica ....                                                                                                                                        | 64 |
| <b>FIGURA 13</b> | - Importação de dados das HRUs.....                                                                                                                                                                        | 66 |
| <b>FIGURA 14</b> | - Processos para a geração do Cenário Base e do Cenário Atual....                                                                                                                                          | 67 |
| <b>FIGURA 15</b> | - Detalhamento do processo de mudança de cobertura de solo. ....                                                                                                                                           | 68 |
| <b>FIGURA 16</b> | - Detalhamento do processo de gerar simulação.....                                                                                                                                                         | 69 |
| <b>FIGURA 17</b> | - Detalhamento do processo de configurar arquivos de captação/lançamento do SWAT.....                                                                                                                      | 70 |
| <b>FIGURA 18</b> | - Detalhamento do processo de Importar OUTPUT.RCH. ....                                                                                                                                                    | 71 |
| <b>FIGURA 19</b> | - Fluxograma descrevendo o processo de Avaliar a Qualidade. ....                                                                                                                                           | 74 |
| <b>FIGURA 20</b> | - Detalhamento do processo de Avaliar valor do componente do CCME-WQI com o valor de base.....                                                                                                             | 75 |
| <b>FIGURA 21</b> | - Tela de cadastro de uma fonte de poluição pontual.....                                                                                                                                                   | 76 |
| <b>FIGURA 22</b> | - Detalhamento do processo da inclusão de uma nova fonte de poluição pontual.....                                                                                                                          | 77 |
| <b>FIGURA 23</b> | - Fluxograma descrevendo o processo Comparar índices de qualidade. ....                                                                                                                                    | 78 |
| <b>FIGURA 24</b> | - Detalhamento do processo Verifica classificação do índice CCME-WQI. ....                                                                                                                                 | 79 |
| <b>FIGURA 25</b> | - Detalhamento do processo de Módulo de Suporte à Decisão.....                                                                                                                                             | 81 |
| <b>FIGURA 26</b> | - Fluxograma descrevendo o processo de Gerar Lista de Alternativas. ....                                                                                                                                   | 83 |
| <b>FIGURA 27</b> | - Detalhamento do processo Fazer alterações de Suporte à Decisão. ...                                                                                                                                      | 84 |
| <b>FIGURA 28</b> | - Detalhamento do procedimento Soma Item em Sub-bacia.....                                                                                                                                                 | 85 |
| <b>FIGURA 29</b> | - Modelo numérico de terreno (a), declividade (b), precipitação anual (c) e UOT (d) da Bacia Hidrográfica do Rio Cuiabá. A distribuição das sub-bacias de avaliação nos dois estudos de caso e localização |    |

|                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                       |     |
|------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
|                  | na bacia do Alto Rio Paraguai (BAP) são detalhadas na Figura 30.                                                                                                                                                                                                                      | 87  |
| <b>FIGURA 30</b> | - Sub-bacias utilizadas para validação dos estudos de caso 1 e 2. ...                                                                                                                                                                                                                 | 90  |
| <b>FIGURA 31</b> | - Cenário Atual do CCME-WQI (seis constituintes) na Bacia do Rio Cuiabá no EC1. ....                                                                                                                                                                                                  | 93  |
| <b>FIGURA 32</b> | - Resultado simulação inserção na sub-bacia 75 (Cenário Avaliado)..                                                                                                                                                                                                                   | 99  |
| <b>FIGURA 33</b> | - Melhor Cenário Alternativo para minimizar a degradação do CCME-WQI na sub-bacia 75. ....                                                                                                                                                                                            | 99  |
| <b>FIGURA 34</b> | - Resultado simulação inserção na sub-bacia 171 (Cenário Avaliado).                                                                                                                                                                                                                   | 101 |
| <b>FIGURA 35</b> | - Melhor Cenário Alternativo para minimizar a degradação do CCME-WQI na sub-bacia 171. ....                                                                                                                                                                                           | 101 |
| <b>FIGURA 36</b> | - Resultado da simulação na sub-bacia 251. ....                                                                                                                                                                                                                                       | 102 |
| <b>FIGURA 37</b> | - Resultado Suporte a Decisão sub-bacia 251. ....                                                                                                                                                                                                                                     | 103 |
| <b>FIGURA 38</b> | - Cenário Atual do CCME-WQI (seis constituintes) na Bacia do Rio Cuiabá no EC2. ....                                                                                                                                                                                                  | 104 |
| <b>FIGURA 39</b> | - Contribuições difusas e pontuais de NT, PT e DBO e cargas anuais transportadas na rede hidrográfica no cenário atual da bacia do Rio Cuiabá. ....                                                                                                                                   | 106 |
| <b>FIGURA 40</b> | - Variação do IQA CCME-WQI em cenários de redução e incremento percentual das cargas em 25 sub-bacias de uso misto. ....                                                                                                                                                              | 110 |
| <b>FIGURA 41</b> | - Variação do IQA CCME-WQI em cenários de redução e incremento percentual das cargas em duas sub-bacias de uso principalmente agropecuário. ....                                                                                                                                      | 111 |
| <b>FIGURA 42</b> | - CCME-WQI do Cenário Atual e sua diminuição no caso de aumento das cargas em 20% e 40% (coluna a esquerda). A coluna a direita mostra os respectivos melhorias do CCME-WQI alcançáveis pelas simulações alternativas pelo módulo de SDD e o número de alternativas encontradas. .... | 112 |

## LISTA DE QUADROS

|                  |                                                                                                                                                                               |    |
|------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>QUADRO 1</b>  | - Arquivos de entrada no nível da Bacia. A última coluna refere a documentação oficial do SWAT sobre as entradas e saídas do modelo (ARNOLD et. al., 2011) .....              | 26 |
| <b>QUADRO 2</b>  | - Lista de arquivos de entrada no nível da Sub-Bacia. A última coluna refere a documentação oficial do SWAT sobre as entradas e saídas do modelo (ARNOLD et. al., 2011) ..... | 27 |
| <b>QUADRO 3</b>  | - Lista de arquivos no nível da HRU. A última coluna refere a documentação oficial do SWAT sobre as entradas e saídas do modelo (ARNOLD et. al., 2011) .....                  | 27 |
| <b>QUADRO 4</b>  | - Lista de arquivos de saída do SWAT. ....                                                                                                                                    | 27 |
| <b>QUADRO 5</b>  | - Conceitos importantes para entender o processo de configuração de ambiente no sistema SWAT-GESTÃO .....                                                                     | 41 |
| <b>QUADRO 6</b>  | - Dicionário de Dados da tabela de Configuração do Sistema.....                                                                                                               | 47 |
| <b>QUADRO 7</b>  | - Dicionário de Dados da tabela dos tipos de cobertura e uso de solo .....                                                                                                    | 48 |
| <b>QUADRO 8</b>  | - Dicionário de Dados da Tabela de Bacia.....                                                                                                                                 | 49 |
| <b>QUADRO 9</b>  | - Dicionário de Dados da Tabela de Sub-bacias .....                                                                                                                           | 52 |
| <b>QUADRO 10</b> | - Dicionário de Dados da Tabela de polígono das sub-bacias. ....                                                                                                              | 53 |
| <b>QUADRO 11</b> | - Dicionário de Dados da Tabela dos trechos do Canal Principal....                                                                                                            | 54 |
| <b>QUADRO 12</b> | - Dicionário de Dados da Tabela de HRU .....                                                                                                                                  | 54 |
| <b>QUADRO 13</b> | - Dicionário de dados da tabela com dados das Fontes Pontuais de Poluição .....                                                                                               | 55 |
| <b>QUADRO 14</b> | - Dicionário de Dados da Tabela de Simulação no Canal Principal                                                                                                               | 57 |
| <b>QUADRO 15</b> | - Dicionário de dados da tabela de simulação da fase terrestre da Sub-Bacia .....                                                                                             | 58 |
| <b>QUADRO 16</b> | - Dicionário de Dados da Tabela Situação .....                                                                                                                                | 59 |
| <b>QUADRO 17</b> | - Dicionário de dados da tabela de simulações de reservatórios.....                                                                                                           | 60 |

## LISTA DE EQUAÇÕES

|                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Eq. 1</b> - Percentual de parâmetros com falhas.....                  | 33 |
| <b>Eq. 2</b> - Percentual de ocorrências com falhas .....                | 34 |
| <b>Eq. 3</b> - Cálculo da amplitude da falha acima do valor padrão ..... | 34 |
| <b>Eq. 4</b> - Cálculo da amplitude da falha abaixo do valor padrão..... | 34 |
| <b>Eq. 5</b> - Cálculo da amplitude média das falhas.....                | 34 |
| <b>Eq. 6</b> - Normalização da amplitude média entre 0 e 100.....        | 35 |
| <b>Eq. 7</b> - Cálculo do índice de qualidade CCME-WQI .....             | 35 |

## LISTA DE TABELAS

|                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |     |
|------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Tabela 1</b>  | - Disponibilidade anual de água per capita por região (em $10^3 \text{ m}^3$ )<br>.....                                                                                                                                                                                                             | 9   |
| <b>Tabela 2</b>  | - Evolução do uso da água no mundo. ....                                                                                                                                                                                                                                                            | 10  |
| <b>Tabela 3</b>  | - Validação do projeto SWAT original, com simulação entre 2003 e 2012, utilizado como base dos estudos de caso 1 e 2 do SWAT_Gestão (adaptado de acordo com Alkmim 2017) .....                                                                                                                      | 89  |
| <b>Tabela 4</b>  | - Concentração em mg/l de poluentes lançados como efluentes por alguns tipos de empreendimentos do MT .....                                                                                                                                                                                         | 91  |
| <b>Tabela 5</b>  | - Constituintes utilizados para cálculo do CCME-WQI nos quatro cenários avaliados no estudo de caso 1 (EC1). ....                                                                                                                                                                                   | 91  |
| <b>Tabela 6</b>  | - Cargas mínimas, máximas e médias dos empreendimentos utilizadas para as simulações dos cenários no SWAT para os cenários EC1_2a e EC1_2b. ....                                                                                                                                                    | 95  |
| <b>Tabela 7</b>  | - Cargas de empreendimentos fictícios utilizadas nas simulações do cenário EC1_C1a com seis constituintes (Vazão mensal, Sólidos totais suspensos, Nitrogênio Total, Fósforo Total, DBO, Oxigênio Dissolvido) e EC1_C1b com três constituintes (Nitrogênio Total, Fósforo Total e Sedimentos) ..... | 95  |
| <b>Tabela 8</b>  | - Cargas mínimas, máximas e médias dos empreendimentos utilizadas para as simulações dos cenários no SWAT para os cenários EC1_2a e EC1_2b. ....                                                                                                                                                    | 97  |
| <b>Tabela 9</b>  | - Porcentagem dos empreendimentos autorizados sem uso do SSD, Valores mínimas, máximas e médias do CCME-WQI para os Cenários Atual, Avaliado e melhor Alternativo e número de alternativas detectadas pelo módulo SSD (EC1_2a e EC1_2b).....                                                        | 97  |
| <b>Tabela 10</b> | - Cargas lançadas e resultados da simulação na sub-bacia 75 .....                                                                                                                                                                                                                                   | 98  |
| <b>Tabela 11</b> | - Dados da inserção na sub-bacia 251 .....                                                                                                                                                                                                                                                          | 102 |
| <b>Tabela 12</b> | - Cargas diárias de Fósforo, Nitrogênio e DBO geradas por fontes difusas e pontuais nas sub-bacias avaliadas no estudo de caso 2 (EC2).....                                                                                                                                                         | 108 |

## **LISTA DE ABREVIATURAS**

|          |                                                                        |
|----------|------------------------------------------------------------------------|
| AHP      | ANALYTICAL HIERACHICAL PROCESS                                         |
| CCME-WQI | CANADIAN COUNCIL OF MINISTERS OF THE ENVIRONMENT – WATER QUALITY INDEX |
| DBO      | DEMANDA BIOLÓGICA DE OXIGÊNIO                                          |
| EDSS     | ENVIRONMETAL DECISION SUPPORT SYSTEM                                   |
| FPP      | FONTE DE POLUIÇÃO PONTUAL                                              |
| GWP      | GLOBAL WATER PARTNERSHIP                                               |
| HRU      | HIDROLOGICAL RESPONSE UNIT                                             |
| IPCC     | INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE                              |
| MCDM     | MULTI-CRITERIA DECISION MAKER                                          |
| RH       | RECURSOS HÍDRICOS                                                      |
| SSD      | SISTEMAS DE SUPORTE A DECISÃO                                          |
| SGDB     | SISTEMA GERENCIADOR DE BANCO DE DADOS                                  |
| SWAT     | SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL                                         |
| TIC      | TECNOLOGIAS DE INFORMAÇÃO E COMUNICAÇÃO                                |
| WMO      | WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION                                      |
| WSM      | WEIGHT SUM MODEL                                                       |
| WPM      | WEIGHT PRODUCT MODEL                                                   |
| WQI      | WATER QUALITY INDEX                                                    |
| PMI      | PROJECT MANAGEMENT INSTITUTE®                                          |
| CMM      | CAPABILITY MATURITY MODEL                                              |
| ITIL     | INFORMATION TECHNOLOGY INFRASTRUCTURE LIBRARY                          |
| RUP      | RATIONAL UNIFIED PROCESS                                               |
| PRH      | PLANO DE RECURSOS HÍDRICOS                                             |
| NT       | NITROGÊNIO TOTAL                                                       |
| PT       | FÓSFORO TOTAL                                                          |
| UOT      | USO E OCUPAÇÃO DA TERRA                                                |
| IQA      | ÍNDICE DE QUALIDADE DE ÁGUA                                            |

## RESUMO

OLIVEIRA, C. U. R. **SISTEMA DE SUPORTE A DECISÃO ACOPLADO AO MODELO SWAT PARA A GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS**. Cuiabá, 2020, 156f. Tese (Doutorado em Física Ambiental) -Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso.

A área de recursos hídricos apresenta enormes desafios aos gestores para cumprirem os objetivos preconizados na Lei N° 9433/1997. Trabalhar com a quantidade de informações geradas a partir de mudanças na dinâmica de uma bacia hidrográfica é uma tarefa árdua para a correta tomada de decisão. Com o auxílio de Sistemas de Suporte a Decisão, que prometem transformar uma grande quantidade de informações em um conjunto menor, mais significativo e compreensível de informações, o gestor poderá tomar decisões mais assertivas. O trabalho expõe o desenvolvimento e validação de um Sistema de Suporte a Decisão para auxílio na gestão de recursos hídricos. Trabalhando em conjunto ao modelo eco-hidrológico Soil and Water Assessment Tool (SWAT), que permite criar simulações calculando os impactos gerados por determinadas alterações, e o índice de qualidade de água CCME-WQI utilizado tanto para avaliar a magnitude desses impactos quanto como método de auxílio a tomada de decisão, a concepção do SWAT-Gestão auxilia o gestor a atender as demandas de diferentes diretrizes descritas na Lei N° 9433/1997. A concepção modular do sistema permite ainda a sua aplicação em diferentes escalas espaço-temporais e sua adaptação para diferentes características socioambientais. Dois estudos de caso na bacia hidrográfica do Rio Cuiabá validam as funcionalidades do sistema desenvolvido e exemplifica a sua aplicabilidade para subsidiar gestores em duas áreas: Na concessão de direitos de usos múltiplos dos recursos hídricos apresentando soluções que possam diminuir em até 16% os impactos previstos; Na avaliação de cenários para subsidiar o desenvolvimento de planos de bacia.

**Palavras-chave:** Gestão de Recursos Hídricos, Tomada de Decisão, Usos Múltiplos da água

## ABSTRACT

**OLIVEIRA, C. U. R. DECISION SUPPORT SYSTEM COUPLED WITH SWAT MODEL FOR WATER RESOURCE MANAGEMENT.** Cuiabá, 2020, 156f. Thesis (Doctorate in Environmental Physics) - Institute of Physics, Federal University of Mato Grosso.

The area of water resources presents enormous challenges to managers to meet the objectives recommended in Law No. 9433/1997. Working with the amount of information generated from changes in the dynamics of a watershed is an arduous task for correct decision making. With the help of Decision Support Systems, which promise to transform a large amount of information into a smaller, more meaningful and understandable set of information, the manager can make more assertive decisions. The work exposes the development and validation of a Decision Support System to assist in the management of water resources. Working together with the soil and water assessment tool (SWAT) eco-hydrological model, which allows the simulations to be created by calculating the impacts generated by certain changes, and the CCME-WQI water quality index used both to assess the magnitude of these impacts and as a method of aiding decision making, the design of SWAT-Management helps the manager to meet the demands of different guidelines described in Law No. 9433/1997. The modular design of the system also allows its application in different space-time scales and its adaptation to different socio-environmental characteristics. Two case studies in the Cuiabá River basin validate the functionalities of the developed system and exemplify its applicability to subsidize managers: In the granting of rights of multiple uses of water resources presenting solutions that can reduce by up to 16% the expected impacts; In the evaluation of scenarios to support the development of basin plans.

Keyword: Water Resources Management, Decision Making, multiple uses of water

## 1. INTRODUÇÃO

A água é um componente fundamental e insubstituível para a sustentabilidade da vida na Terra tendo também um importante papel no desenvolvimento das sociedades civilizadas (MANJU & SAGAR, 2017). A maioria dos aglomerados humanos são criados próximos de locais com grande disponibilidade de água, principalmente de água doce, com o objetivo de ter um acesso rápido, fácil e barato a esse recurso.

A medida que esses aglomerados se desenvolvem a água deixa de ser somente um recurso para suprir as necessidades primárias (dessedentação, saneamento e pequenas irrigações) para ser usada também em processos mais complexos, como produção industrial e grandes sistemas de irrigação, em um volume crescente frente a uma oferta limitada. Esse aumento na demanda de uso de água coloca pressão sobre a sua disponibilidade, ocasionando problemas de escassez e gerando conflitos pelo seu uso em diversas partes do mundo. Esses problemas começaram a ganhar evidência a partir da década de 80 do século passado quando surgiram os primeiros artigos científicos tratando sobre a escassez de água em determinadas regiões do mundo (LIU et al., 2017).

Inicialmente, as principais preocupações eram relacionadas apenas no aspecto quantitativo, ou seja, somente se haveria água suficiente para os usos antrópicos (LIU et al, 2017). Com o passar do tempo percebeu-se a necessidade de avaliar também as questões qualitativas envolvendo o controle das concentrações de poluentes lançados nos corpos hídricos. Esses poluentes indisponibilizam a água para o consumo humano e podem afetar a sustentabilidade do ecossistema da bacia hidrográfica (AZNAR-SÁNCHEZ et al., 2018).

Poluentes lançados nos corpos hídricos podem possuir duas fontes distintas: fontes pontuais e difusas (VON SPERLING, 2005). As fontes pontuais referem-se às descargas de poluentes lançados diretamente em um trecho específico de um curso hídrico receptor sendo facilmente controladas e monitoradas. Entre os principais tipos de fontes pontuais estão os efluentes domésticos e industriais; e as difusas que

se referem às entradas de poluentes associadas aos escoamentos difusos derivados das diversas atividades humanas que são desenvolvidas ao longo das bacias hidrográficas. Nesse tipo de poluição, as entradas de poluentes são aleatórias dificultando assim a sua identificação e controle (ANJINHO,2019).

Apesar do Brasil ser um dos países com maior disponibilidade de água doce do mundo, o país possui problemas e conflitos de uso principalmente nas Regiões Nordeste, Sul e Sudeste do país, onde o adensamento populacional junto ao desenvolvimento industrial pressionam a parca oferta de água existente nessas regiões (ANA, 2017).

Para enfrentar esses problemas tanto preventivamente quanto reativamente é preciso um conjunto de ações integradas que envolvam planejamento e gerenciamento de recursos hídricos. O objetivo fundamental desse planejamento é atender a demanda de água (quantidade e qualidade) dos sistemas socioeconômicos vigentes sem comprometer a sustentabilidade do ecossistema fazendo uso do gerenciamento administrativo (regulamentos, leis da água) para criar a infraestrutura necessária para o seu controle (GWP, 2000).

Esse planejamento, para ser efetivo, necessita de um conjunto variado de informações referentes a todos os aspectos que impactam no gerenciamento desse recurso hídrico e que podem ser resumidos como (HOOPER, 2005; WMO, 2009):

- Avaliação de recursos: condição e tendência dos recursos, incluindo variação espacial e temporal na disponibilidade, suficiência, equidade e sustentabilidade do suprimento.
- Avaliação de vulnerabilidade: resposta do sistema a mudanças não planejadas (como mudanças climáticas, mudanças demográficas).
- Avaliação de impacto: efetividade e impactos do desenvolvimento proposto (resposta do sistema à mudança planejada).

O gerenciamento de recursos hídricos requer, para garantir o seu uso sustentável, a avaliação de processos físicos complexos e com alto grau de interação

das partes interessadas (GÓMEZ-BEAS et al., 2018). Essa complexidade aliada ao rápido aumento na demanda por água em quantidade e qualidade forçam muitos países a buscarem práticas de gestão mais sofisticadas e abrangentes na avaliação dos processos hidrológicos e no planejamento da gestão da água (GÓMEZ-BEAS et al., 2018) tornando desafiante o processo de tomada de decisão por parte dos gestores.

O processo de tomada de decisão parte do pressuposto que os humanos são capazes de escolher a melhor solução através de decisões racionais (ÖHLMÉR et al., 1998, KUIL et al., 2018) levando em consideração todas as combinações possíveis de informações existentes (KOEHLER & HARVEY, 2008). Porém essas decisões nem sempre seguem um padrão uniforme considerado ideal (KOEHLER & HARVEY, 2008; VAN DEN BERGH et al., 2000; BANCO MUNDIAL, 2015) pois o ser humano tem dificuldade de lidar com cálculos complexos e análises probabilísticas. Cada indivíduo desenvolve uma forma diferente de tomada de decisão e de como interpretar seus resultados com base em suas próprias experiências e sua própria percepção pessoal do mundo (ELLIOTT, 2003) favorecendo a ocorrência de vieses ou desvios cognitivos de "bom julgamento objetivo" sobre a tomada de decisão (MERZ et al., 2015).

Na área ambiental, a qual a área de recursos hídricos está inserida, a tomada de decisão é principalmente complexa devido à grande quantidade de componentes a serem avaliadas a saber: clima, flora, fauna, atividades antrópicas, entre outras. Variáveis que descrevem estes elementos se relacionam em diversas escalas de espaço e tempo. A análise e interpretação dessas relações são pré-requisito da efetiva tomada de decisão sendo fundamental a disponibilidade de dados provenientes do monitoramento de variáveis hidrológicas quantitativos e qualitativos.

Coletar e armazenar essa quantidade de informações ao longo do tempo e de forma consistente tem se mostrado uma tarefa árdua com problemas na sistematização e normalização de dados atrapalhando assim o estudo dos processos hidrológicos e dificultando uma gestão dos RH mais eficiente. Para superar escassez e inconsistência de dados, principalmente em países em desenvolvimento e de grandes extensões territoriais como o Brasil (HABERLANDT, 2010), a utilização de modelos hidrológicos se torna imperativa já que eles utilizam equações que emulam

esses processos físicos permitindo a geração de dados simulados que preencham essas lacunas de informação possibilitando uma análise mais robusta da sua situação atual e consequentemente aumentando a eficiência da sua gestão possibilitando a tomada de decisão (JOHNSTON & SMAKHTIN, 2014).

Já foram conduzidas análises exploratórias e modelagens empíricas (*data driven models*) nas bacias de contribuição do Pantanal (Zeilhofer 2006, 2010, Fantin-Cruz et al. 2011, Lima et al. 2015, Hunke et al. 2014) procedimentos úteis para o dimensionamento de problemas eco-hidrológicos. Porém, se utilizadas de forma exclusiva estas técnicas podem falhar em diagnosticar e quantificar as diversas origens da poluição e seus processos determinantes (BOURAOUI & GRIZZETTI, 2014; WILKINSON et al., 2014). Adicionalmente em previsões de longo prazo (p. ex. simulações de cenários de uso e ocupação da terra) os modelos conceituais-processuais possuem geralmente desempenho superior do que modelos empíricos (SINGH et al., 2014; MEKONNEN et al., 2014).

Além de estimar os padrões espaço-temporais de variáveis hidrológicas para locais não amostrados, modelos hidrológicos permitem simular possíveis consequências em caso de alterações em uma bacia hidrográfica, tais como: crescimento populacional (lançamentos domiciliares) e aumento da demanda de água por empresas de saneamento, indústrias e pelo setor agropecuário (MACCARTHY et al., 2001; CHUNG et al, 2010; FALLOON & BETTS, 2010; XIONG et al., 2010; ZHU & RINGLER, 2012; FISCHER et al., 2007), fatores que resultam em pressão sobre o uso dos recursos hídricos compartilhados e limitados concomitantemente em termos quantitativos e qualitativos. Desta forma, modelos hidrológicos processuais podem ser utilizados como ferramentas de uso preventivo, permitindo a gestão antecipando possíveis mudanças a partir da criação de ações que procuram minimizar os seus impactos negativos. Nesse contexto, Dong et al. (2013) enfatizam que prever impactos é a principal razão para o desenvolvimento de cenários em recursos hídricos, possibilitando testar as possíveis alterações e avaliar suas consequências permitindo um gerenciamento mais proativo da bacia hidrográfica.

Um dos modelos hidrológicos processuais com aplicabilidade comprovada em diversas escalas e regiões geoambientais é o SWAT (*Soil and Water Assessment*

*Tool*) que agrega nas suas formulações tanto aspectos climáticos, ambientais e hidrológicos quanto antrópicos. É um modelo que permite a geração de cenários para a previsão de impactos tornando-lhe uma ferramenta com potencial para auxiliar a gestão de recursos hídricos. No momento a sua aplicação no Brasil ainda foca primordialmente em objetivos acadêmicos para simulações do escoamento (BRESSIANI, 2015). Resultados promissores também em simulações de produção e transporte de sedimentos (MONTEIRO et al, 2016) e de qualidade de água (TAFARELLO et al, 2018) em climas semiúmidos no Brasil indicam, porém, o potencial do SWAT em ser utilizado como ferramenta operacional de auxílio a gestão das águas superficiais e sua disponibilidade em termos qualitativos.

A legislação brasileira através da lei N º 9433/1997, que instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), estabelece os instrumentos para gerenciar os recursos hídricos buscando um equilíbrio entre a sustentabilidade do meio ambiente e o desenvolvimento socioeconômico das sociedades situadas dentro da área de influência dos corpos hídricos geridos por essa lei. Tem como objetivo tanto assegurar o acesso universal à água de qualidade, pelo seu uso racional, para as gerações atuais e futuras quanto agir, de forma preventiva ou reativa, contra eventos hidrológicos adversos sejam eles naturais ou antrópicos.

Dentre esses instrumentos destaca-se o Plano de Recursos Hídricos (PRH), um planejamento de longo prazo que fundamenta e orienta a implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos. Esses planos são obrigados por lei a conter um diagnóstico da situação atual dos recursos hídricos junto com prognósticos de crescimento demográfico, de evolução de atividades produtivas, e de modificações dos padrões de ocupação do solo, com o objetivo de identificar possíveis conflitos que necessitem da ação dos órgãos gestores de recursos hídricos. PRHs podem ser desenvolvidos não somente para grandes bacias ou regiões hidrográficas, mas em escalas mais detalhadas, p.ex. para subsidiar a atuação de comitês de bacias. Para embasar PRHs, a lei prevê o desenvolvimento e a utilização de Sistemas de Informação para coletar, tratar, armazenar e recuperar informações sobre recursos hídricos e fatores intervenientes em sua gestão para fornecer subsídios a elaboração e atualização dos Planos de Recursos Hídricos.

A outorga, outro instrumento da Política de RH, tem o objetivo de assegurar o controle quantitativo e qualitativo dos seus usos, garantindo ao usuário outorgado o direito de acesso à água, uma vez que regularizado (ANA, 2011). Os contratos de outorga, entretanto, são do tipo precário, tendo o órgão gestor a prerrogativa de suspender parcialmente/integralmente a sua vigência, quando houver riscos à manutenção da sustentabilidade da bacia hidrográfica. Com isso os outorgantes desses recursos hídricos podem ser incentivados a investir em ações de gestão ambiental da Bacia Hidrográfica de forma a evitar essa suspensão. A outorga, seja para a sua concessão ou reavaliação, deve ser baseada na disponibilidade hídrica dos RH em quantidade e qualidade no manancial e mananciais a jusante do uso nas condições atuais e futuras. Informações que demandam a utilização de um modelo eco-hidrológico, como o SWAT, para simular os impactos da inclusão de um novo empreendimento no sistema hídrico da bacia.

Além desses instrumentos preconizados pela Lei Nº 9433/1997 existem outros instrumentos que podem ser utilizados pelo gestor como forma de pressão e incentivo para que os usuários de recursos hídricos contribuam para a sua gestão. Um exemplo é o licenciamento ambiental instituído pela Lei Nº 6938/1981 também chamada de Lei da Política Nacional de Meio Ambiente. Outro exemplo é o PSA ou pagamento de serviços ambientais que está em discussão no congresso desde 2007. Nesse instrumento um indivíduo ou entidade recebe um benefício, que pode ser financeiro, de entes públicos ou privados para preservarem o meio ambiente sob o seu controle.

Modelos eco-hidrológicos processuais como o SWAT geram conjuntos de saída extensos, tipicamente series temporais diárias ou mensais de parâmetros hidrológicos quantitativos (p. ex. elementos do balanço hídrico das sub-bacias, vazão líquida e sólida nos trechos etc.) e de qualidade de água (concentrações e cargas de nutrientes etc.), cuja análise conjuntiva pode ser complexa e dificultar demasiadamente a tomada de decisão do gestor. Desta forma, modelos eco-hidrológicos não são entendidos como Sistemas de Suporte de Decisão *per se*, mas como componente ou parte de um SSD de RH (PANAGOPOULOS et al., 2012; HABERLANDT, 2010).

Assim, como primeiro elemento de um SSD, o gestor deve dispor de uma forma de sintetizar as complexas saídas do modelo acoplado. É possível assim a utilização de um índice que resume a disponibilidade hídrica nos trechos da bacia e que pode ser composto por parâmetros quantitativos e qualitativos reconfiguráveis e disponíveis pelas saídas do modelo, principalmente em grandes territórios com características hidroclimática, ambientais e socioeconômicas variadas.

Apesar desta simplificação na análise das situações atuais utilizando um índice composto (p.ex. antes da autorização de um novo usuário no caso da outorga ou na avaliação estratégica das situações hidro-ambientais nas sub-bacias para um PRH), o gestor ainda enfrenta outros desafios importantes na sua tomada de decisão. No âmbito da outorga, se uma modelagem após inclusão de um usuário indica que os limites da disponibilidade hídrica mínima serão violados, o gestor deve propor possíveis soluções que podem consistir na diminuição da captação/lançamento, na formulação de medidas que beneficiam a disponibilidade hídrica na bacia ou na renegociação de outros usos a montante. Da mesma forma uma vez identificadas sub-bacias impactadas na elaboração de um PRH o gestor deve buscar por soluções viáveis para definir prioridades de atuação, testando diversas medidas e avaliando os seus respectivos impactos positivos sobre a disponibilidade hídrica na bacia. Essas medidas podem variar amplamente, desde a implantação de estações de tratamento de esgoto até a implantação de programas de reflorestamento de mata ciliares entre muitos outros.

Assim, um SSD deve dispor, seja para Outorga, seja para subsidiar um PRH, de ferramentas para criar cenários, repassá-los para o modelo, e principalmente ponderar os efeitos dessas medidas na manutenção ou melhoria da integridade da disponibilidade hídrica para poder subsidiar a gestão operacional, planejamento estratégico e a formulação de políticas de RH (RIZZOLI & YOUNG, 1997; YOE, 2004), cumprindo assim os objetivos da Lei N. 9433/1997 (MARTELLI, 2001).

## **1.1 OBJETIVOS**

### **1.1.1 Geral**

A tese tem por objetivo desenvolver um Sistema de Suporte a Decisão para gestão de águas superficiais, projetado para subsidiar gestores ambientais na tomada

de decisões para concessão de outorga e subsidiar o desenvolvimento de PRH de acordo com os objetivos expostos na Lei Nº 9433/97 equilibrando a relação entre oferta e demanda da disponibilidade hídrica.

### **1.1.2 Específicos**

- Desenvolvimento de um SSD acoplando modelo SWAT e índice de qualidade da água CCME-WQI para subsidiar gestão.
- Validar o sistema com casos típicos de conflitos de uso dos recursos hídricos para demonstrar sua real capacidade em auxiliar gestores de recursos hídricos.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste tópico são revisados os temas apresentados durante a introdução e que servem como fundamentos para a metodologia proposta no presente trabalho. Aborda aspectos da política dos RH que norteiam o desenvolvimento do SSD proposto, características e conceitos dos SSDs com ênfase na sua aplicação na gestão de RH e a concepção do modelo hidrológico SWAT e do Índice de Qualidade de água CCME-WQI, como elementos do SSD proposto.

### 2.1 CONCEITOS DA POLÍTICA E GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS NO BRASIL

A água é um recurso natural com múltiplos usos, essencial à vida humana e ao funcionamento dos ecossistemas (BRAGA, 2008). Apesar de ser um recurso abundante no planeta, sua distribuição é bastante irregular, principalmente das águas doces, propícias para o consumo humano (Tabela 1).

**Tabela 1** - Disponibilidade anual de água per capita por região (em  $10^3 \text{ m}^3$ )

| Região           | 1950  | 1960  | 1970  | 1980 | 2000 |
|------------------|-------|-------|-------|------|------|
| África           | 20,6  | 16,5  | 12,7  | 9,4  | 5,1  |
| Ásia             | 9,6   | 7,9   | 6,1   | 5,1  | 3,3  |
| América Latina   | 105   | 80,2  | 61,7  | 48,8 | 28,3 |
| Europa           | 5,9   | 5,4   | 4,9   | 4,4  | 4,1  |
| América do Norte | 37,2  | 30,2  | 25,2  | 21,3 | 17,5 |
| Total            | 178,3 | 140,2 | 110,6 | 89   | 58,3 |

**Fonte:** Ayibotele (1992), citado por Gomes et al. (2008)

A disponibilidade anual per capita da América Latina é 5 ou 10 vezes maior que em outras regiões como a África ou a Ásia, respectivamente. Essa disponibilidade, entretanto, vem caindo ao longo das décadas passando para menos de um terço do volume nos anos 2000, se comparado com 1950. Esta forte redução da disponibilidade vem sendo causada pelo desenvolvimento econômico, principalmente nos países em desenvolvimento, que resultou em um crescimento

populacional e um conjunto de novas técnicas ou formas de produção de bens e serviços que aumentaram a demanda mundial por água (Tabela 2).

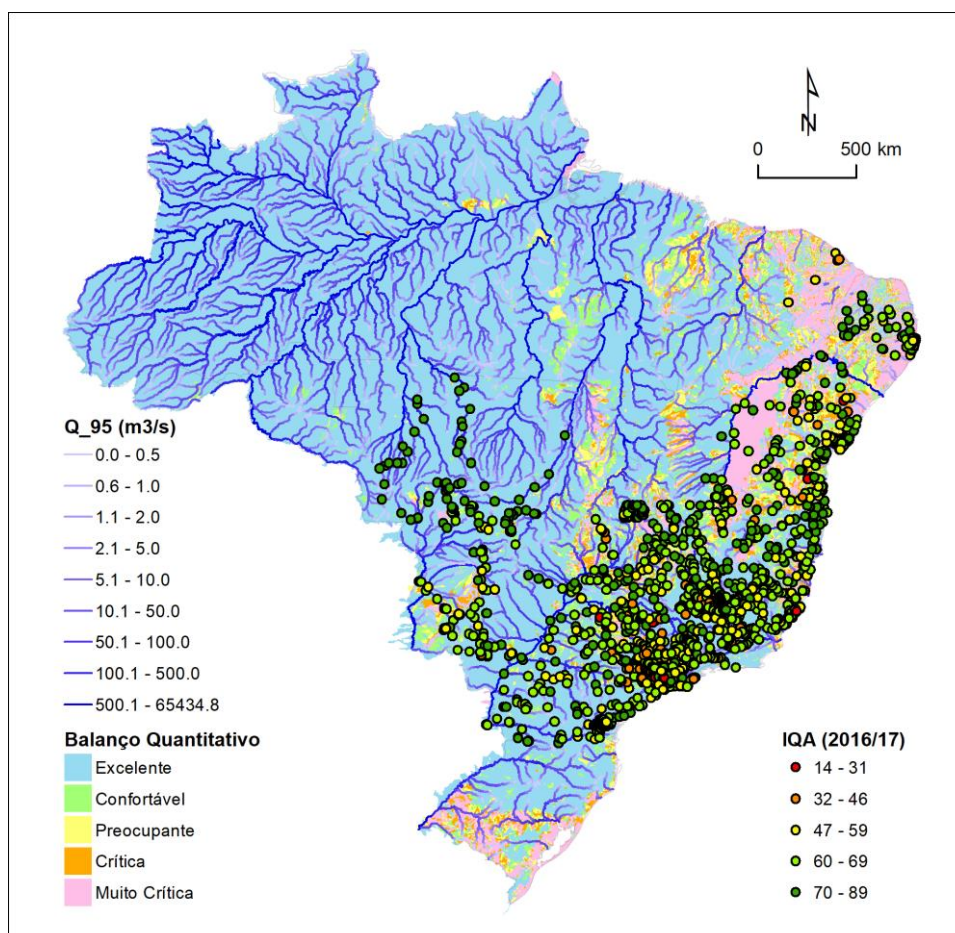
**Tabela 2** - Evolução do uso da água no mundo.

| Ano  | Habitantes        | Uso de água ( $\text{m}^3\text{hab}^{-1}\text{ano}^{-1}$ ) |
|------|-------------------|------------------------------------------------------------|
| 1940 | $2,3 \times 10^9$ | 400                                                        |
| 1990 | $5,3 \times 10^9$ | 800                                                        |

**Fonte:** Relatório do Banco Mundial (1992), citado por Gomes et al. (2008).

O aumento na demanda de uso de água elevou ao longo dos anos a pressão na disponibilidade finita dos RH. Esse comprometimento não ocorreu somente em termos quantitativos, mas também em termos qualitativos pois a água doce também é usada na depuração de efluentes de aglomerados urbanos, industriais e insumo de produtos químicos na atividade agrícola que são lançados nos corpos hídricos através da descarga superficial.

O balanço quantitativo, definido aqui (Figura 1) como a razão entre a vazão de retirada para os usos consuntivos e a disponibilidade hídrica em rios sem regularização (Representados pela vazão de estiagem, ou seja, aquela com permanência de 95% ( $Q_{95}$ )) demonstram situações com as categorias crítica e muito crítica, principalmente na região Nordeste devido suas características hidroclimáticas e no extremo Sul enquanto nas regiões Norte e Centro-Oeste a disponibilidade é geralmente alta (Figura 1). Já pontos de monitoramento com IQA abaixo de 50 concentram-se no Sudeste, nas regiões das maiores aglomerações metropolitanas e em algumas regiões do Nordeste, onde as baixas vazões mínimas elevam as concentrações de poluentes nos mananciais.



**FIGURA 1** - Disponibilidade hídrica nos rios do Brasil (Q<sub>95</sub>) e IQA (Média anual dos anos 2016/17)

**FONTE:** ANA (2019)

Para equacionar a relação oferta e demanda de água de forma a garantir o seu acesso universal sem prejudicar a sustentabilidade, muitos países começaram a regulamentar o uso, criando legislações que limitam a retirada de água dos corpos hídricos e o lançamento de efluentes nesses corpos.

No Brasil a legislação vigente sobre a gestão de recursos hídricos é a Lei N. 9433/97 que instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos tendo entre seus princípios a garantia universal do acesso, com prioridade ao consumo humano e dessedentação animal em caso de escassez, a descentralização da sua gestão e utilizando a Bacia Hidrográfica como a menor entidade espacial para efetuar a sua gestão.

Os principais objetivos a serem alcançados por essa lei estão dispostos no artigo 2º com os seguintes itens:

*I - assegurar à atual e às futuras gerações a necessária disponibilidade de água, em padrões de qualidade adequados aos respectivos usos;*

*II - a utilização racional e integrada dos recursos hídricos, incluindo o transporte aquaviário, com vistas ao desenvolvimento sustentável;*

*III - a prevenção e a defesa contra eventos hidrológicos críticos de origem natural ou decorrentes do uso inadequado dos recursos naturais.*

*IV - incentivar e promover a captação, a preservação e o aproveitamento de águas pluviais.*

A lei busca incentivar o uso racional dos recursos hídricos para promover o desenvolvimento das sociedades ao seu redor de forma sustentável procurando garantir a disponibilidade permanente desse recurso para o desenvolvimento contínuo das gerações futuras.

Para que esse objetivo seja alcançado são listadas no artigo 3º da lei as diretrizes que devem nortear as ações dos responsáveis por gerenciar os recursos hídricos:

*I - a gestão sistemática dos recursos hídricos, sem dissociação dos aspectos de quantidade e qualidade;*

*II - a adequação da gestão de recursos hídricos às diversidades físicas, bióticas, demográficas, econômicas, sociais e culturais das diversas regiões do País;*

*III - a integração da gestão de recursos hídricos com a gestão ambiental;*

*IV - a articulação do planejamento de recursos hídricos com o dos setores usuários e com os planejamentos regional, estadual e nacional;*

*V - a articulação da gestão de recursos hídricos com a do uso do solo;*

*VI - a integração da gestão das bacias hidrográficas com a dos sistemas estuarinos e zonas costeiras*

Estas diretrizes mostram a preocupação do legislador para que os responsáveis pela gestão dos recursos hídricos executem ações amplas dentro da área da gestão ambiental, como o correto uso do solo e tratamento de efluentes. Essa preocupação ocorre porque o destino de seus impactos tende a ser os corpos hídricos que os circundam.

Seguindo o princípio da descentralização da gestão estabelecida nessa lei, a menor seção administrativa permitida é o Comitê de Bacia Hidrográfica. Esse comitê conta com a participação de membros das três esferas públicas (Federal,

Estadual e Municipal) reunidos com membros da sociedade civil localizados dentro dos limites da bacia hidrográfica a ser gerida pelo mesmo, permitindo assim que aqueles que mais serão impactados pelo o que acontece na bacia hidrográfica tenham voz ativa. A participação da sociedade civil é também importante para garantir uma personalização dessa gestão, dentro dos limites permitidos na lei, levando em consideração as características individuais de cada bacia hidrográfica.

O artigo 38 dessa lei define as suas atribuições como segue:

*I - Promover o debate das questões relacionadas a recursos hídricos e articular a atuação das entidades intervenientes;*

*II - Arbitrar, em primeira instância administrativa, os conflitos relacionados aos recursos hídricos;*

*III - aprovar o Plano de Recursos Hídricos da bacia;*

*IV - Acompanhar a execução do Plano de Recursos Hídricos da bacia e sugerir as providências necessárias ao cumprimento de suas metas;*

*V - Propor ao Conselho Nacional e aos Conselhos Estaduais de Recursos Hídricos as acumulações, derivações, captações e lançamentos de pouca expressão, para efeito de isenção da obrigatoriedade de outorga de direitos de uso de recursos hídricos, de acordo com os domínios destes;*

*VI - Estabelecer os mecanismos de cobrança pelo uso de recursos hídricos e sugerir os valores a serem cobrados;*

*VII - (VETADO)*

*VIII - (VETADO)*

*IX - Estabelecer critérios e promover o rateio de custo das obras de uso múltiplo, de interesse comum ou coletivo.*

Como mostram os incisos III e IV é dever do Comitê de Bacia Hidrográfica aprovar e garantir a execução do Plano de Recursos Hídricos da bacia tomando as devidas providências quando algo que evite o cumprimento de suas metas estiver ocorrendo.

Entre as principais ações estabelecidas na Lei N. 9433/97 para garantir o cumprimento de seus objetos é a outorga de uso de recursos hídricos. A outorga é um contrato com tempo determinado, oneroso ou não, estabelecido entre os interessados em utilizar os recursos hídricos de uma determinada bacia hidrográfica e o órgão responsável pela gestão dessa Bacia Hidrográfica. Nesse contrato está estabelecido todas as condições que devem ser cumpridas pelo outorgante para ter direito ao uso desse recurso.

Importante ressaltar que o artigo 15 desta lei informa que esse contrato de outorga é um contrato do tipo precário dando amplos poderes ao órgão responsável de suspendê-lo parcial ou completamente pelo prazo necessário se as condições de sustentabilidade da bacia hidrográfica se deteriorarem ao ponto da Bacia Hidrográfica correr o risco de deixar de cumprir os objetivos estabelecidos. As situações estão listadas abaixo:

*I -não cumprimento pelo outorgado dos termos da outorga;*

*II -ausência de uso por três anos consecutivos;*

*III -necessidade premente de água para atender a situações de calamidade, inclusive as decorrentes de condições climáticas adversas;*

*IV -necessidade de se prevenir ou reverter grave degradação ambiental;*

*V -necessidade de se atender a usos prioritários, de interesse coletivo, para os quais não se disponha de fontes alternativas;*

*VI -necessidade de serem mantidas as características de navegabilidade do corpo de água.*

De posse desse poder, o órgão responsável pela gestão de uma Bacia Hidrográfica com um sistema de informações ajustado sobre a situação da bacia hidrográfica gerida, pode propor ações preventivas/reativas aos usuários de recursos hídricos com o objetivo de evitar essa deterioração e a consequente necessidade de suspensão dos contratos.

Em relação ao estado do Mato Grosso a lei que regula a gestão das águas no estado é a Lei Estadual N. 6.945/1997 que instituiu a Política Estadual de Recursos Hídricos em consonância com a PNRH adequando-a as suas características. Nessa lei foram criados responsáveis pela gestão dos recursos hídricos no estado como o CEHIDRO (CONSELHO ESTADUAL DOS RECURSOS HÍDRICOS) e os Comitês Estaduais de Bacias Hidrográficas (Atualmente existem 6 Comitês criados). Nessa lei também são discriminados alguns instrumentos importantes como a outorga e a cobrança de recursos hídricos dentro do rios localizados no estado.

## **2.2 SISTEMAS DE SUPORTE À DECISÃO**

Para Rizzoli & Young (1997) Sistemas de Suporte à Decisão (SSD) são sistemas de software que integram modelos, bancos de dados e/ou outros componentes auxiliares para sintetização e extração de informação, dando ao usuário

capacidade analítica para tomada de decisões em problemas complexos. SSD desenvolvidos para uso em domínios ambientais são referidos aqui como Sistemas de Suporte à Decisão Ambientais (EDSS).

O conceito de Sistemas de Suporte à Decisão (SSD) foi desenvolvido por Gorry & Morton (1971), a partir dos trabalhos de Herbert Simon (1960), que teve como a inovação original a categorização dos tipos de decisões em estruturados, semiestruturados e não estruturados (COURTNEY, 2001). Para McIntosh et al., (2011) essa categorização é necessária porque numa decisão tanto a formulação de problemas como a geração e seleção de soluções possíveis possuem dimensões distintas com variados graus de incerteza.

Decisões estruturadas possuem formulações de problemas e soluções bem definidas de forma que a ocorrência de um problema leva a uma única ou poucas soluções, para as quais não há necessidade de avaliar qual é a mais indicada. Um exemplo de decisão do tipo estruturada seria a decisão de como chegar a um local não muito distante (p.ex. < 300 m do local no qual uma pessoa se encontra). Nesse caso o problema é bem definido e quanto as soluções possíveis, pode-se ter várias formas de percorrer esse percurso, porém uma das alternativas, caminhar, se sobrepõe fortemente na análise de custo/benefício frente as demais. Torna-se assim solução única para esse problema e a tomada de decisão ocorre praticamente de forma automática.

Já decisões semiestruturadas possuem formulações de problemas bem compreensíveis, porém com uma quantidade relativamente alta de soluções possíveis, sendo cada uma delas com um grau diferente de importância na solução do problema. Um exemplo de decisão desse tipo seria a necessidade de percorrer uma distância entre duas cidades. O problema é bem definido, mas existem diversas alternativas viáveis (meios de transporte, rotas etc.) cada uma com um custo/benefício diferente, mas *a priori* sem uma única alternativa “melhor”. A escolha da melhor alternativa deverá ser feita a partir de critérios que levam em conta as preferências do tomador de decisão, podendo ocorrer que alternativas diferentes sejam tomadas por tomadores de decisão diferentes.

Em decisões não estruturadas a formulação do problema não é facilmente compreensível e isso faz com que a busca por soluções aceitáveis se torne mais complexa. Como exemplo para esse tipo de decisão podem ser listados eventos da natureza ainda pouco compreendidos pelo ser humano como terremotos. Sabe-se somente com grande exatidão onde eles podem ocorrer, mas não quando irão ocorrer e em qual intensidade. Nesse caso em que o problema (momento e intensidade de ocorrência) não é bem definido, a quantidade de soluções ditas viáveis é tão grande que a escolha da melhor alternativa, principalmente quando envolve questões de segurança, são comumente privilegiadas as mais restritivas.

Os SSDs, segundo Gorry e Morton (1971), ajudam a lidar com a tomada de decisão principalmente em decisões do tipo semiestruturado, podendo ser também utilizados em algumas decisões do tipo não estruturado. Para a tomada de decisões do tipo semiestruturado o desafio é saber ordenar e categorizar as alternativas viáveis que solucionem o problema de acordo com as características/restrições inerentes a esse problema. Para essa tarefa nos Sistemas de Suporte a Decisão são utilizados geralmente métodos conhecidos como MCDM ou Tomador de Decisão Multicritério (*Multi-Criteria Decision Maker*) (TRANTAPHYLLOU, 2000).

Nas primeiras abordagens MCDM eram inicialmente elencadas e eliminadas as alternativas com restrições inerentes ao problema. Por exemplo se o problema for como se deslocar de Cuiabá para Brasília, a alternativa de se locomover de barco, seria eliminada do rol de alternativas possíveis. Exemplos desses primeiros métodos MCDM são o Modelo da Soma dos Pesos (*Weight Sum Model* - WSM) (BOZA et al., 2017), o Modelo da Soma dos Produtos (*Weight Product Model* - WPM) (ZAVADSKAS, 2012) e as primeiras versões do Processo Analítico Hierárquico (*Analytical Hierarchical Process* - AHP) (SAATY, 1980).

À medida que esses métodos foram se tornando mais conhecidos, surgiram questionamentos em relação a importância igualitária dada a todas as restrições listadas de um determinado problema (BELTON & GEAR, 1983). Em geral, no rol de restrições de um problema existem aquelas que são mais importantes do que outras. Isso é essencial no processo de tomada de decisão porque a melhor alternativa tende ser aquela que melhor se adequa as restrições mais importantes desse problema.

Deve ser levado em consideração que quem define o grau de importância de uma restrição frente as outras é quem precisa tomar a decisão. Desse modo não é garantido que a alternativa considerada a melhor para um tomador de decisão seja também a melhor para outro em relação ao mesmo problema por causa dos diferentes graus de importância dados às restrições.

Para resolver esse problema os métodos mais recentes começaram a usar em suas matrizes de decisão os chamados pesos de decisão que são valores representativos do grau de importância que uma restrição tem em relação a outra em um problema de acordo com o que foi estabelecido. Com esses pesos o valor de adequação de uma alternativa frente a uma restrição pode ser aumentado ou diminuído. Dessa forma há uma maior possibilidade de que alternativas consideradas viáveis tenham valores finais diferentes, permitindo o ordenamento desses valores e a definição das alternativas mais adequadas ao problema em questão. Exemplos de métodos MCDM que utilizam pesos de decisão são novas versões do método AHP (COSTA & VANSNICK, 2008), o ELECTRE (*Elimination and Choice Translating algorithm*) (MARY & SUGANYA, 2016) e o TOPSIS (*Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution*) (LIMA JUNIOR & CARPINETTI, 2015).

Como o SSD trabalha com uma quantidade elevada de operações sejam elas matemáticas ou de manipulação de dados e informações, o seu desenvolvimento somente começou a ganhar destaque a partir da década de 60 com a evolução das TICs (Tecnologias de Informação e Comunicação) (TRIANAPHYLLOU, 2000).

Desde então os SSDs tem sido usados como ferramenta de auxílio a tomada de decisão nas mais diferentes áreas do conhecimento humano, incluindo a administração (PUN et al., 2018), as engenharias (ZAVADSKAS et al., 2018) e as áreas da saúde (CONEJAR & KIM, 2014).

## **2.3 SISTEMAS DE SUPORTE À DECISÃO PARA SUBSIDIAR A GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS**

A gestão de Recursos Hídricos inclui diversos tipos de problemas aos quais SSDs se propõem a auxiliar. A quantidade de informações que determina o ciclo hidrológico e os interesses conflitantes dificultam o trabalho dos gestores em buscar

o melhor equilíbrio na alocação dos recursos disponíveis tornando as suas decisões, tipicamente das categorias semiestruturadas e não estruturadas, propícias a serem tratadas a partir de um SSD.

O processo de estruturação e a decisão de qual ação tomar diante de um problema é incerto e discutível, e o SSD ou mais especificamente, o EDSS (*Environment Decision Support System*) visa melhorar a transparência da formulação e solução da decisão. Melhorar a transparência porque explicações racionais podem ser fornecidas para apoiar decisões e porque o usuário / parte interessada / cidadão pode reproduzir o procedimento de decisão, modificar os pesos e realizar análises de sensibilidade para avaliar a força de decisão e a robustez (MCINTOSH et al., 2011).

Golfam et al., (2019) demonstram a ampla utilização de EDSS baseado em métodos de MCDM para resolver problemas de gestão de recursos hídricos. Al-Kloub et al. (1997) por exemplo usaram o método PROMETHEE (Método da Organização de Classificação de Preferência para Avaliação de Enriquecimento) para o desenvolvimento de estratégias na priorização de projetos de água com diferentes objetivos e restrições na Jordânia. Já o método AHP foi usado por Jaber & Mohsen (2001) para o desenvolvimento de um SSD para a avaliação e seleção de potenciais suprimentos de água não convencionais na Jordânia. Ghorbannezhad et al. (2013) aplicaram o mesmo método para determinar as alternativas e a sensibilidade dos principais fatores que afetam o meio ambiente e o consumo de água e energia na fabricação de papel reciclado. Zyoud et al. (2016) demonstraram a eficácia das abordagens do MCDA para apoio à decisão no gerenciamento de perdas de água combinando a teoria dos conjuntos *fuzzy* com os métodos AHP e TOPSIS. Golfam et al. (2019) também utilizaram uma combinação dos métodos AHP e TOPSIS para determinar o cenário mais bem adaptado as mudanças climáticas na agricultura na bacia do rio Gharanghu no Irã para o período de 30 anos (2040-2069). Usando uma abordagem *fuzzy* do método TOPSIS, Salehi et al. (2018) desenvolveram um modelo de tomada de decisão para a reabilitação de redes de água. No Brasil, Sakaguti Junior (2016) apresentou um SSD para Análise Quantitativa e Qualitativa de Corpos d'Água das Bacias dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiáí.

Oliveira (2009) demonstrou em um modelo simples de suporte a decisão para recursos hídricos, chamado OUTORGAWEB, as vantagens dessa abordagem como auxílio a tomada de decisão do gestor em um sistema voltado a resolver problemas de conflito de uso para a outorga de recursos hídricos, um dos instrumentos da PNRH. Esse sistema usava uma combinação de métodos MCDM como lógica *fuzzy* e AHP para gerar soluções hierarquizadas de forma personalizável tornando esse um sistema flexível para os mais diferentes tipos de bacias.

No entanto Diez & McIntosh (2009, 2011) demonstraram que apesar dos possíveis benefícios, muitos problemas ainda existem no desenvolvimento de um EDSS, entre eles o alto índice de projetos cancelados (LEGRISSET al., 2003), a dificuldade de ajustar simulações que possam ser usadas na formulação de políticas públicas (MCINTOSH, 2005) e o alto custo de desenvolvimento (GIUPPONI et al., 2007).

Esses problemas não são exclusivos dos sistemas EDSS, mas dos sistemas de informação em geral, quando são adotados processos de desenvolvimento que resultam em softwares caros, de difícil manutenção e com pouco utilidade para os usuários finais (BARTIÉ, 2002).

McIntosh et al. (2011) relataram as conclusões de um encontro de desenvolvedores de EDSS ocorrido em 2010, identificando e agrupando os desafios do desenvolvimento de um EDSS em quatro áreas principais:

1. Engajamento do usuário final na fase de desenvolvimento (BASCO-CARRERA et al., 2017)
2. Adoção dos sistemas EDSS
3. Custos e tecnologias envolvidas
4. Mensuração para avaliação do sucesso de um EDSS

Ressaltam também que a literatura não fornece um guia para pesquisadores / desenvolvedores, partes interessadas e formuladores de políticas que: (i) descreve os problemas e desafios enfrentados pelos desenvolvedores de EDSS e (ii) oferece boas

práticas de desenvolvimento de sistemas com recomendações que possam ajudar a superar essas dificuldades e complicações. O modelo dos ‘dez passos iterativos’ de Jakeman et al. (2006) ajuda a fornecer um guia, mas não examina a interface do usuário, a usabilidade ou a incorporação de modelos nos sistemas de suporte à decisão.

Para minimizar esses problemas é discutida recentemente a adoção de técnicas de desenvolvimento mais ágil (SOMMERVILLE, 2012) como SCRUM<sup>1</sup> (CRUZ et al., 2019) e Programação Extrema (SANTOS et al., 2018) entre outros. Essas técnicas priorizam a participação dos usuários finais na maioria dos processos de desenvolvimento, garantindo assim uma maior absorção de seus conhecimentos e uma melhor adequação do produto final ao domínio da aplicação. O uso de arquiteturas de software que permita a reutilização de código em várias partes do sistema pode criar ainda sistemas menores e mais concisos, facilitando o trabalho de manutenção e evolução do sistema diminuindo os seus custos.

Além dessas técnicas de desenvolvimento há os métodos de gestão de projetos e processos que focalizam não só na fase de desenvolvimento até a entrega inicial do produto, mas implementam um processo cíclico, contemplando também as fases de manutenção e evolução do sistema. Exemplos são os métodos *Project Management Institute®* - PMI (MORAES et al., 2017), *Capability Maturity Model* - CMM (Rocha et al., 2018), *Rational Unified Process* - RUP (SANTOS et al., 2018) e *Information Technology Infrastructure Library* - ITIL (TAYLOR, 2018) que proporcionam, quando executados com sucesso, sistemas com melhor aceitação e menor risco de abandono.

## 2.4 O MODELO SWAT

O SWAT (*Soil and Water Assessment Tools*) (ARNOLD et al., 2012) é um modelo hidrológico para simulação de todo o ciclo da água dentro de uma bacia hidrográfica, principalmente desenvolvido para fazer previsão dos impactos do uso e ocupação do solo sobre o escoamento, produção e transporte de sedimentos e qualidade de água em complexas bacias hidrográficas de diferentes escalas espaciais.

---

<sup>1</sup> Termo retirado do rúgbi

Foi desenvolvido na linguagem FORTRAN e tem seu código fonte referente a versão 2009 (revisão 528) disponível no site do modelo (<https://swat.tamu.edu/>). Possui uma versão com reengenharia completa, porém sem alterações nos algoritmos básicos na representação dos processos. Chamado de SWAT+ (BIEGER et. al, 2017), encontra-se ainda em fase de consolidação.

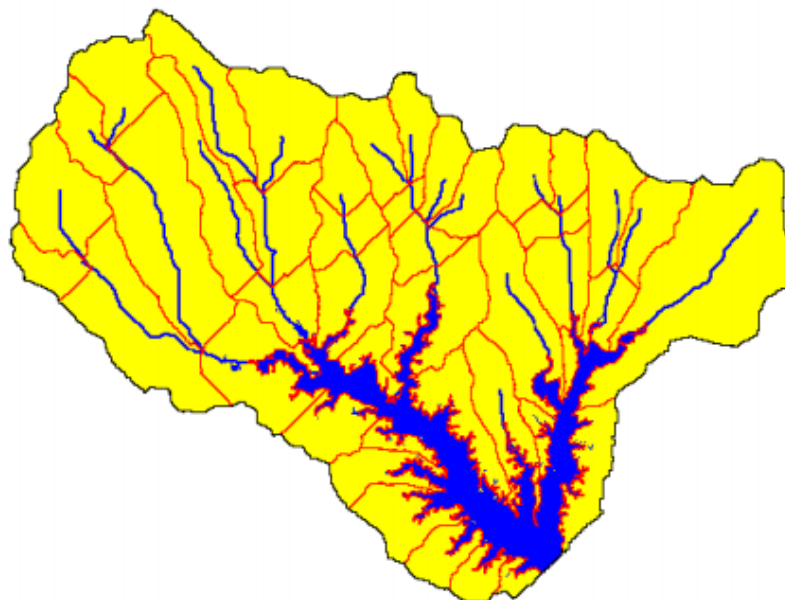
O modelo é baseado em equações físicas bem estabelecidas na literatura que utilizam como entrada dados comumente disponíveis pelas agências governamentais ou instituições acadêmicas como dados climáticos, tipos de solo, modelo digital de elevação, uso e cobertura da terra e suas práticas de manejo e dados sobre captações e lançamentos pontuais. Gera como saídas séries temporais dos elementos do ciclo hidrológico quantitativo e qualitativo nas fases terrestre e aquática, possibilitando assim o estudo das suas mudanças ao longo do tempo.

Sua versatilidade em termos temáticos, escalas espaço-temporais e adaptabilidade a diferentes regiões climáticas fizeram com que esse modelo, ao longo dos seus 35 anos de desenvolvimento, fosse utilizado nas mais diversas bacias hidrográficas ao redor do mundo. Os mais de 3200 artigos científicos<sup>2</sup> publicados entre 1984 e 2019 abordam tanto questões conceituais sobre o modelo (ARNOLD et al., 2012; BRESSIANI et al., 2015; TAN et al., 2019; FU et al., 2019; POKHREL et al., 2018) quanto aplicações (SHUKLA & GEDAM, 2019; MAGALHÃES et al., 2018), com estudos sobre procedimentos de calibração (ADLA et al., 2019; ASL-ROUSTA & MOUSAVI, 2019; CHILKOTI et al., 2018) ou abordando somente as partes terrestres (TELKAT et al., 2019) e aquáticas do modelo (TAFFARELLO et al., 2018).

---

<sup>2</sup> SWAT Literature DataBase em [https://www.card.iastate.edu/swat\\_articles/](https://www.card.iastate.edu/swat_articles/)

O modelo é semidistribuído, dividindo uma bacia hidrográfica em um conjunto de sub-bacias com um único trecho de rio (Figura 2).



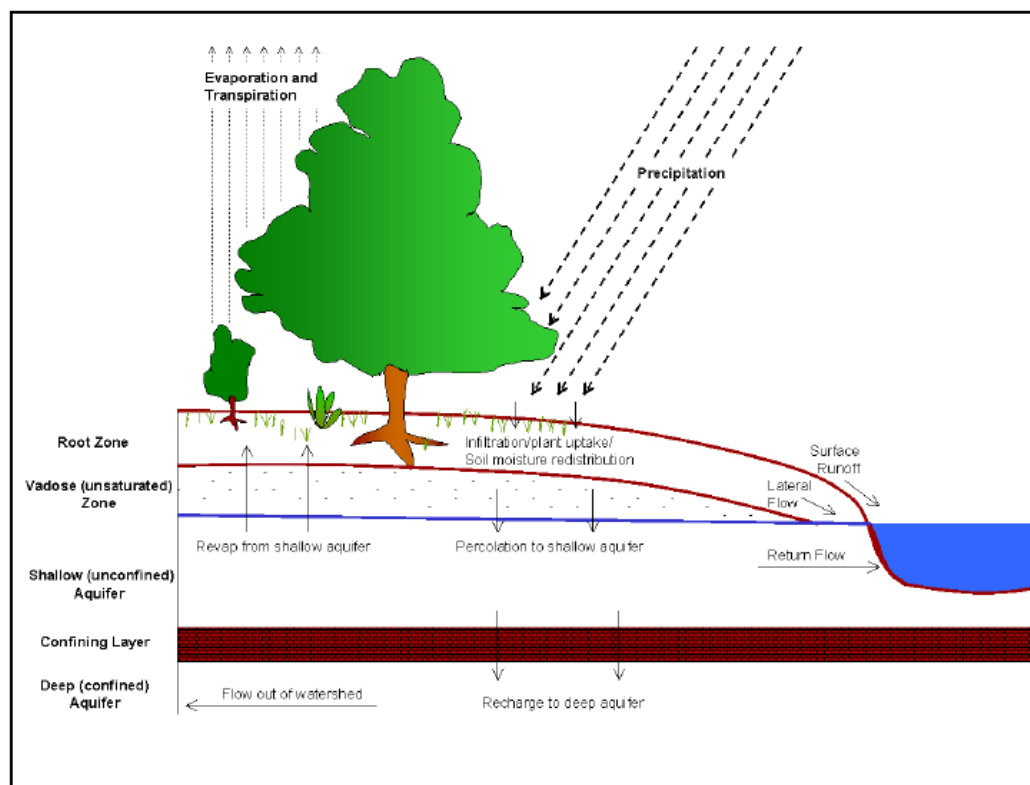
**FIGURA 2** - Bacia Hidrográfica dividida em sub-bacias.

**FONTE:** ARNOLD (2010)

Para representação da fase terrestre, cada sub-bacia é dividida em partes menores chamadas de HRU ou Unidade de Resposta Hidrológica (*Hydrologic Response Unit*). Uma HRU representa subáreas de características similares de tipo de solo, declividade e uso e cobertura vegetal.

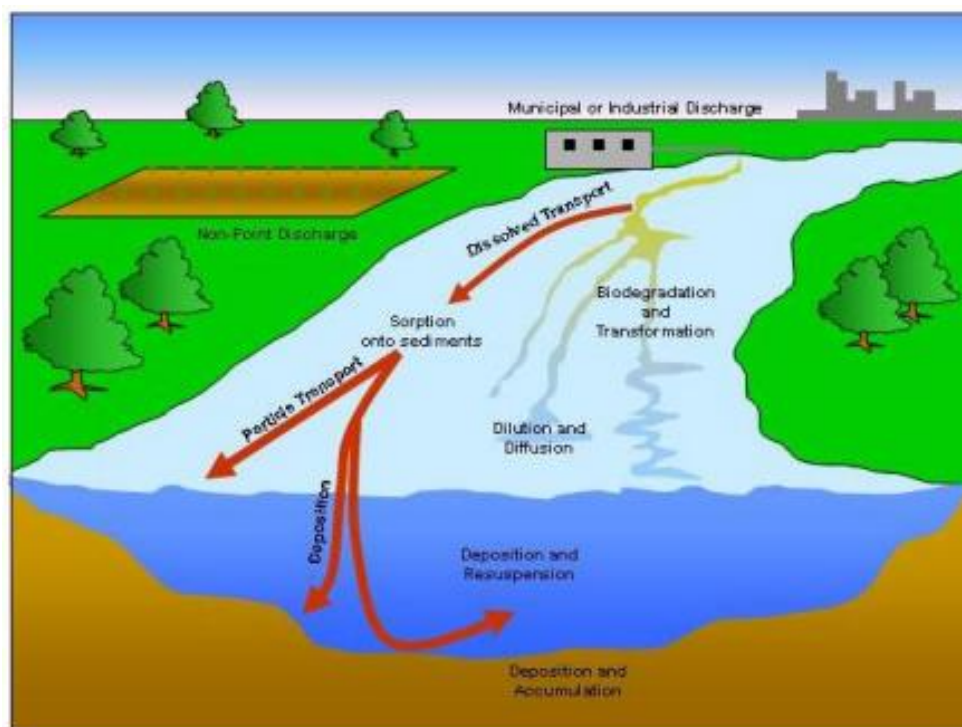
Na fase terrestre são representados os processos desde o momento da entrada da água na bacia através da precipitação, que incluem a sua captura pela vegetação, seu retorno parcial para atmosfera através da evapotranspiração, infiltração podendo

alcançar os aquíferos profundos além dos escoamentos superficiais e subsuperficiais, até alcançar os leitos de corpos hídricos como rios, lagos ou reservatórios (Figura 3).



**FIGURA 3**-Processos da fase terrestre representados no SWAT.  
**FONTE:** ARNOLD (2010)

A fase aquática que compreende o movimento da água dentro dos leitos e suas trocas com o subsolo e atmosfera. Pode ser representada a captação ou o lançamento de efluentes. É representada a propagação da água, sedimentos, nutrientes e compostos orgânicos. O transporte de elementos químicos pode ocorrer de forma dissolvida ou por sorção em sedimentos, sofrendo ainda transformações, biodegradação ou sedimentação nos leitos (Figura 4).



**FIGURA 4-** Processos da fase aquática representados no SWAT.

**FONTE:** ARNOLD (2010)

Apesar de gerar um conjunto de informações consistentes resultantes dos processos físicos simulados pelo modelo, o SWAT não apresenta essas informações em um formato facilmente compreensível para todas as partes interessadas envolvidas no processo de gestão de bacias hidrográficas (RAJIB et al., 2016; MCDONALD et al., 2019) tornando o seu uso quase que restrito somente ao meio acadêmico. Para subsidiar a sua utilização operacional na gestão de bacias hidrográficas foram desenvolvidos primeiros *frameworks* baseados na WEB, para apresentação das saídas do SWAT de forma mais simplificada e intuitiva aos gestores (McDonald et al., 2019; Rajib et al., 2016).

O modelo SWAT é composto unicamente por um executável sem promover interfaces de interação com o usuário. Uma vez executado, o modelo lê um conjunto de arquivos no formato texto de entrada, os processa e gera um outro conjunto de arquivos no formato texto de saída.

Para usar o modelo em uma bacia hidrográfica específica, o usuário deve fornecer os arquivos de entrada. Pela complexidade das entradas, a utilização de edição de texto não é recomendável, ainda mais porque existem programas criados

especificamente para esse fim como o ARCSWAT, um *plugin* para o ArcMap (ESRI) ou o QSWAT uma interface para o QGIS.

Um outro importante exemplo é o projeto HAWQS (FANT et al., 2017) ou Sistema Hidrológico e de Qualidade de Água (*The Hydrologic and Water Quality System*) desenvolvido pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA) e pela Texas A&M University para prover uma plataforma web que facilite a interação dos usuários com o modelo SWAT. É um projeto desenvolvido para se adequar as necessidades da Secretaria de Águas da Agência de Proteção Ambiental do Estados Unidos (USEPA-OW).

Após uma configuração inicial dos arquivos de entrada é possível executar o SWAT e gerar simulações. Como o modelo envolve um grande conjunto de variáveis inter-relacionadas que dificulta a sua configuração adequadamente para uma bacia, o modelo deve ser calibrado. Esse procedimento pode ser feito utilizando um software especial chamado SWAT-CUP que analisa os resultados gerados pelo SWAT frente a dados observados, ajustando os valores dos arquivos de entrada utilizando métodos heurísticos, minimizando os desvios.

Em bacias hidrográficas devidamente calibradas, o SWAT possibilita a criação de cenários prevendo impactos futuros em decorrência de alterações na bacia, tais como nas condições climáticas, modificações do uso da terra (UOT) ou a inclusão de novos tipos de usos múltiplos da água, tais como instalação de captações, lançamentos de efluentes ou construção de barragens. Dessa forma, possui potencial para subsidiar a tomada de decisão em sistemas complexos, cuja previsibilidade extrapola a capacidade do analista em RH.

#### **2.4.1 Principais arquivos de entradas e saídas do SWAT**

Como mencionado anteriormente o SWAT trabalha lendo informações contidas em um conjunto de arquivos de entrada, processando-os durante a sua execução e gravando os resultados em um conjunto de arquivos de saída. Tanto os arquivos de entrada quanto os de saída são arquivos no formato TXT e é a partir deles que o sistema SWAT\_Gestão se comunica com o SWAT.

Os principais arquivos de entrada estão elencados nos Quadros 1 a 3, ordenados por sua discretização espacial. Já os arquivos de saída estão elencados no Quadro 4. Os detalhes das alterações feitas pelo sistema SWAT\_GESTÃO são descritas em detalhe em seguida.

#### 2.4.1.1 *Nível da Bacia*

As configurações dos arquivos aqui elencados refletem na simulação de toda a bacia hidrográfica (QUADRO 1).

**QUADRO 1** - Arquivos de entrada no nível da Bacia. A última coluna refere a documentação oficial do SWAT sobre as entradas e saídas do modelo (ARNOLD et. al., 2011)

| Arquivo   | Descrição                                                                                           | Item da documentação (Arnold et al., 2011) |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|
| file.cio  | Configuração <i>master</i> da bacia                                                                 | Capítulo 3                                 |
| fig.fig   | Definição da topologia da rede hidrográfica, a ordem de inclusão dos arquivos de entrada no sistema | Capítulo 2                                 |
| *.bsn     | Configuração das características que impactam em toda a bacia                                       | Capítulo 4                                 |
| *.pcp     | Dados de precipitação                                                                               | Capítulo 6                                 |
| *.tmp     | Dados de temperatura do ar                                                                          | Capítulo 7                                 |
| plant.dat | Informações de cobertura de solo e crescimento de plantas                                           | Capítulo 14                                |

#### 2.4.1.2 *Nível Sub-bacia*

Arquivos cujas configurações refletem na simulação somente na sub-bacia a qual ele refere. (QUADRO 2)

**QUADRO 2** - Lista de arquivos de entrada no nível da Sub-Bacia. A última coluna refere a documentação oficial do SWAT sobre as entradas e saídas do modelo (ARNOLD et. al., 2011)

| Arquivo                   | Descrição                                           | Item da documentação (Arnold et al., 2011) |
|---------------------------|-----------------------------------------------------|--------------------------------------------|
| *.sub                     | Configuração da sub-bacia                           | Capítulo 5                                 |
| *.wus                     | Consumo de água dentro da sub-bacia pelos usuários. | Capítulo 21                                |
| *.rte                     | Características do rio que passa na sub-bacia       | Capítulo 25                                |
| recnst.dat,<br>recmon.dat | Dados de lançamento de efluentes                    | Capítulo 31                                |

#### 2.4.1.3 Nível HRU

Arquivos cujas configurações refletem na simulação somente na HRU a qual ele refere (QUADRO 3).

**QUADRO 3** - Lista de arquivos no nível da HRU. A última coluna refere a documentação oficial do SWAT sobre as entradas e saídas do modelo (ARNOLD et. al., 2011)

| Arquivo | Descrição                          | Item da documentação (Arnold et al., 2011) |
|---------|------------------------------------|--------------------------------------------|
| *.hru   | Características da HRU             | Capítulo 19                                |
| *.mgt   | Dados sobre o manejo no UOT da HRU | Capítulo 20                                |

#### 2.4.1.4 – Arquivos de Saída

Após cada simulação o SWAT gera um conjunto de arquivos de saída que são alterados de acordo com as entradas modificadas para cada cenário (Quadro 04)

**QUADRO 4** - Lista de arquivos de saída do SWAT.

| Arquivo    | Descrição                                                                                                                      | Item da documentação (Arnold et al., 2011) |
|------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|
| output.std | Arquivo com os valores da série temporal de vazão e de carga de elementos somados de todas as sub-bacias da Bacia Hidrográfica | Capítulo 32                                |

|            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |  |
|------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
| output.hru | Arquivo com os valores da série temporal de vazão e de carga de elementos em cada HRU existente na bacia hidrográfica.                                                                                                                                                                                                                                    |  |
| output.sub | Soma os valores da série temporal de todas <i>HRU's</i> existentes em cada sub-bacia. Esses valores correspondem a fase terrestre da sub-bacia e serve de entrada para a fase aquática.                                                                                                                                                                   |  |
| output.rte | Arquivo com os valores da série temporal de vazão e de carga de elementos correspondente a fase aquática da sub-bacia. Cada sub-bacia possui um canal principal que recebe como entrada a soma dos valores da fase terrestre dessa sub-bacia, da saída dos canais principais das sub-bacias a montante e dos lançamentos das fontes pontuais de poluição. |  |

#### 2.4.2 Estrutura do arquivo fig.fig

O SWAT executa as suas simulações seguindo uma ordem que começa nas sub-bacias mais a montante da bacia e vai progredindo com seus cálculos e adicionando fontes de poluição pontual ou reservatórios se necessário até o exutório final. Essa ordem é importante porque os valores de saída de uma determinada sub-bacia servem como valores de entrada para a sub-bacia a sua jusante. O arquivo que armazena a ordem de execução das simulações do SWAT é o arquivo fig.fig.

A Figura 5 apresenta a formatação de um arquivo fig.fig, no qual cada comando ocupa de uma a duas linhas do arquivo com seus parâmetros de entrada e saída. Esses comandos são inseridos nesse arquivo em ordem de dependência, ou seja, aqueles comandos que não dependem de nenhum outro são executados primeiro e depois são executados aqueles cujas dependências já tenham sido executadas anteriormente.

**Command formats:**

|          | icode       | ihout       | inum1        | inum2       | inum3       | rnum1         | inum4       |
|----------|-------------|-------------|--------------|-------------|-------------|---------------|-------------|
|          | column 1    | column 2    | column 3     | column 4    | column 5    | column 6      | column 7    |
|          | space 11-16 | space 17-22 | space 23-28  | space 29-34 | space 35-40 | space 41-46   | space 47-55 |
| subbasin | 1           | HYD_STOR    | SUB_NUM      |             |             |               | GIS_CODE    |
|          |             | SUBFILE     |              |             |             |               |             |
| route    | 2           | HYD_STOR    | RCH_NUM      | HYD_NUM     |             | FLOW_OVN      |             |
|          |             | RTEFILE     | SWQFILE      |             |             |               |             |
| routes   | 3           | HYD_STOR    | RES_NUM      | HYD_NUM     |             |               |             |
|          |             | RESFILE     | LWQFILE      |             |             |               |             |
| transfer | 4           | DEP_TYPE    | DEP_NUM      | DEST_TYPE   | DEST_NUM    | TRANS_AMT     | TRANS_CODE  |
| add      | 5           | HYD_STOR    | HYD_NUM1     | HYD_NUM2    |             |               |             |
| rechour  | 6           | HYD_STOR    | FILEHR_NUM   |             |             |               |             |
|          |             | FILE_HR     |              |             |             |               |             |
| recmon   | 7           | HYD_STOR    | FILEMON_NUM  |             |             | DRAINAGE_AREA |             |
|          |             | FILE_MON    |              |             |             |               |             |
| recyear  | 8           | HYD_STOR    | FILEYR_NUM   |             |             | DRAINAGE_AREA |             |
|          |             | FILE_YEAR   |              |             |             |               |             |
| save     | 9           | HYD_NUM     | FILEMASS_NUM | PRINT_FREQ  | PRINT_FMT   |               |             |
|          |             | FILE_MASS   |              |             |             |               |             |
| recday   | 10          | HYD_STOR    | FILEDAY_NUM  |             |             | DRAINAGE_AREA |             |
|          |             | FILE_DAY    |              |             |             |               |             |
| reccnst  | 11          | HYD_STOR    | FILECNST_NUM |             |             | DRAINAGE_AREA |             |
|          |             | FILE_CNST   |              |             |             |               |             |
| structur | 12          | HYD_STOR    | HYD_NUM      |             |             | AERATION_COEF |             |
|          | 13          |             |              |             |             |               |             |
| saveconc | 14          | HYD_NUM     | FILECONC_NUM | PRINT_FREQ  |             |               |             |
|          |             | FILE_CONC   |              |             |             |               |             |
|          | 15          |             |              |             |             |               |             |
| autocal  | 16          | HYD_NUM     | FILECAL_NUM  | PRINT_FREQ  |             |               |             |
|          |             | FILE_ACAL   |              |             |             |               |             |
| finish   | 0           |             |              |             |             |               |             |

**FIGURA 5-** Estrutura do arquivo fig.fig

FONTE: ARNOLD (2010)

Nessa estrutura, as posições de 1 a 10 em cada linha são destinadas ao nome do comando a ser executado pelo SWAT e possui somente função informativa já que o dado usado pelo SWAT para saber qual ação executar consta na coluna 1 cobrindo as posições de 11 a 16. O modelo SWAT permite atualmente até 15 tipos diferentes de comandos (Figura 5).

Cada um desses comandos realiza um determinado processamento que gera um conjunto de dados de saída, que são armazenados na memória para poderem ser utilizados como dados de entrada para um comando posterior. A localização desses dados na memória receberá um código de identificação. Esse código é um código

numérico incrementável em 1 e que é inserido nesse arquivo na coluna 2, nas posições de 17 a 22 com o nome de HYD\_STOR ou HYD\_NUM.

No SWAT\_Gestão só são avaliados os cinco comandos, detalhados a seguir:

- *Subbasin* (Comando 1) -Esse comando faz com que o SWAT realize todos os cálculos da fase terrestre de uma sub-bacia e a atribuição dos resultados ao seu canal principal. O identificador da sub-bacia é o campo *sub\_num* na terceira coluna do arquivo. Para que o SWAT possa fazer os cálculos ele tenha acesso ao arquivo de entrada com as características dessa sub-bacia. O nome do arquivo fica armazenado no campo *SUBFILE*, na linha posterior ao do comando *subbasin*. Com esse nome de arquivo, o SWAT pode ir ao diretório do cenário, localizá-lo, abri-lo e usar os seus dados como entrada. O resultado do cálculo é armazenado na memória e recebe um código de identificação que será inserido nessa linha no campo *HYD\_STOR*.
- *Route* – Esse comando faz com que o SWAT realize todos os cálculos da fase aquática do canal principal da sub-bacia. O identificador do canal principal é o campo *RCH\_NUM* na terceira coluna e é igual ao código da respectiva sub-bacia. Além desse identificador esse comando recebe outros três parâmetros de entrada: 1 – O campo *HYD\_NUM* na coluna 4 armazena o identificador da posição da memória onde se encontram os valores calculados do canal principal e depende do valor do *HYD\_STOR*. 2 – O campo *RTEFILE* localizado na linha abaixo do comando *route* contém o nome do arquivo com as características físicas do canal principal dessa sub-bacia. 3 – O campo *SWQFILE* contém o nome do arquivo com os dados de qualidade de água do canal principal da sub-bacia. Após o cálculo desse comando, os dados de saída são armazenados na memória e o localizador desses dados é colocado no campo *HYD\_STOR*.
- *Routres* – Esse comando é utilizado para o SWAT fazer os cálculos dos processos em reservatórios quando eles existirem. O reservatório tem um identificador único e incremental em 1 que não coincide necessariamente com o código identificador da sub-bacia ao qual ele pertence pois nem

toda sub-bacia possuirá um reservatório. Esse identificador do reservatório é representado pelo campo RES\_NUM na terceira coluna. Além desse identificador esse comando recebe outros três parâmetros de entrada: 1 – O campo HYD\_NUM na coluna 4 armazena o identificador da posição da memória onde se encontram os valores calculados de todos os elementos que esse canal principal depende, ou seja, o número do HYD\_STOR. 2 – O campo RESFILE localizado na linha abaixo do comando *routres* contém o nome do arquivo com as características físicas do reservatório. 3 – O campo LWQFILE contém o nome do arquivo com os dados de qualidade de água do reservatório. Após o cálculo desse comando os dados de saída são armazenados na memória e o localizador desses dados é colocado no campo HYD\_STOR.

- *Reccnst, recmon* – Esses comandos são utilizados para informar o SWAT da inserção de uma fonte de poluição pontual relacionados somente ao lançamento de efluentes. Os dados de lançamento dessa fonte são inseridos no arquivo cujo nome está armazenado no campo FILE\_CNST ou FILE\_MON na linha posterior a linha do comando. No comando *reccnst* os dados são sumarizados em valores de média diária anual e no *recmon* em valores de média diária mensal. A fonte de poluição pontual tem um identificador único e incremental em 1 que não coincide necessariamente com o código identificador da sub-bacia ao qual ele pertence pois nem toda sub-bacia possui fontes de poluição pontual. Esse identificador é representado pelo campo FILECNST\_NUM ou FILEMON\_NUM na terceira coluna. Os dados desse arquivo são importados e serão armazenados na memória com o localizador colocado no campo HYD\_STOR.
- *Add* – Todos os outros comandos anteriores fazem o SWAT realizar cálculos específicos para cada fase do ciclo hidrológico na Bacia. O comando *add* define a topologia da rede hidrográfica, roteando os resultados dos comandos anteriores pela rede hidrográfica. Em cada comando anteriormente listado o seu resultado é armazenado em uma variável chamada HYD\_STOR na segunda coluna. O comando *add*

processa dois valores HYD\_STOR vindo de dois comandos anteriores, soma os seus valores e coloca o seu resultado no seu HYD\_STOR. Dessa forma é definido quais são as sub-bacias a montante de uma determinada sub-bacia e a qual sub-bacia uma fonte de poluição pontual ou um reservatório pertence.

O fluxo em cada sub-bacia sempre começa com o comando *subbasin* para cálculos na fase terrestre. Se a sub-bacia não for uma cabeceira, ou seja, não tiver sub-bacias a montante, o comando *add* é usado para somar os resultados dos cálculos do comando *subbasin* com os resultados do comando *route* das sub-bacias a montante. Caso a sub-bacia tiver uma fonte de poluição pontual informada pelo comando *recnst* ou *recmon* de acordo com a periodicidade da simulação, os valores das cargas dessa fonte também são somados usando o comando *add*. Depois do somatório o roteamento do fluxo em uma sub-bacia encerra-se com o comando *route* que leva os cálculos para serem usados como entrada na sub-bacia a jusante.

## 2.5 ÍNDICE DE QUALIDADE DE ÁGUA CCME-WQI

Índices de qualidade da água (*Water Quality Index* - WQI) resumem em um número único a qualidade da água de corpos hídricos a partir da agregação das medidas de diversos parâmetros de qualidade da água (como por exemplo: oxigênio dissolvido, pH, nitrato, fosfato, amônia, cloreto, dureza, metais, etc.) (LUMB et al., 2011). Podem incluir uma lista de parâmetros pré-definidos ou ser configurados de acordo com as características específicas de uma região. Valores mais altos geralmente indicam uma melhor qualidade da água do corpo hídrico analisada.

WQIs tem uma importância preponderante na análise de sustentabilidade de bacias hidrográficas e na sintetização das condições qualitativas dos seus recursos hídricos e são assim usados em muitos países como uma ferramenta de auxílio à gestão. Atualmente o índice utilizado pela ANA é o IQA que foi desenvolvido para avaliar a qualidade da água para abastecimento público após tratamento convencional<sup>3</sup>. Esse índice é calculado utilizando os seguintes parâmetros:

---

<sup>3</sup> ANA. Agência Nacional de Águas. Indicadores de qualidade. [S. l.], [201-]. Disponível em: <https://www.ana.gov.br/panorama-das-aguas/qualidade-da-agua/indicadores-de-qualidade>. Acesso em: 9 jul. 2020.

temperatura da água, pH, oxigênio dissolvido, sólido total, demanda bioquímica de oxigênio, coliformes termotolerantes, nitrogênio total, fósforo total e turbidez. O uso desses parâmetros é adequado na avaliação da qualidade de água em regiões, onde os impactos sobre os RH são principalmente provenientes de lançamento de esgoto doméstico ou de origem industriais (ANA, 2005) e não originados pela atividade agropecuária, por ponderar pouco a elevação das cargas de nutrientes e desconsiderar importantes poluentes típicos nessas áreas (ex.: metais pesados, pesticidas, compostos orgânicos). Dessa forma, foram propostos índices adaptáveis para as condições socioambientais específicas de uma bacia hidrográfica (TERRADO et al., 2010).

No Canadá um novo índice de qualidade foi introduzido nos anos 90, denominado CCME-WQI (*Canadian Council of Ministers of The Environment – Water Quality Index*). Foi desenvolvido pelo Ministério de Meio-Ambiente da Província da Colúmbia Britânica com melhoramentos feitos na Província de Alberta incorporando características do *Alberta Agricultural Water Quality Index* (Wright et al. 1999).

O CCME-WQI utiliza um conjunto de parâmetros de qualidade de água cujo número e composição podem ser escolhidos de acordo com as características dos mananciais em estudo. Para seu cálculo é necessário definir para cada parâmetro um valor de referência. Os parâmetros considerados são avaliados sobre três (03) perspectivas a saber:

- Escopo - percentual de parâmetros de qualidade de água com ao menos um valor fora dos padrões em relação a quantidade total de parâmetros (Equação 1).:

$$F_1 = \left( \frac{\text{Número de parâmetros com falhas}}{\text{Total de parâmetros}} \right) * 100 \quad \text{Eq. 1}$$

- Frequência - percentual da quantidade de valores fora dos padrões em relação a quantidade total de valores do conjunto de dados (Equação 2):

$$F_2 = \left( \frac{\text{Número de testes com falhas}}{\text{Total de testes}} \right) * 100 \quad \text{Eq. 2}$$

- Amplitude - representa a medida do quanto esses valores estão fora do padrão e são calculados em três etapas:

a. Para cada valor verifique:

i. Se o valor é maior que o padrão e o padrão era para ser o valor máximo então calcule a variável *excursion* (Equação 3):

$$\text{excursion}_i = \left( \frac{\text{Valor Falha}_i}{\text{Valor Padrão}_j} \right) - 1 \quad \text{Eq. 3}$$

No qual “Valor Falha<sub>i</sub>” é o valor acima do padrão e “Valor Padrão<sub>j</sub>” é o valor padrão do parâmetro j de qualidade de água a ser verificado.

ii. Se o valor é menor que o padrão e o padrão era para ser o valor mínimo então calcule a variável *excursion* (Equação 4):

$$\text{excursion}_i = \left( \frac{\text{Valor Padrão}_j}{\text{Valor Falha}_i} \right) - 1 \quad \text{Eq. 4}$$

No qual “Valor Falha<sub>i</sub>” é o valor abaixo do padrão e “Valor Padrão<sub>j</sub>” é o valor padrão do parâmetro j de qualidade de água a ser verificado.

b. Depois de determinar todas as *excursions* de todos os parâmetros, é calculada a soma normalizada dessas *excursions* chamada de nse (Equação 5):

$$\text{nse} = \frac{\sum_{i=1}^n \text{excursion}_i}{\text{Número de testes}} \quad \text{Eq. 5}$$

c. O último passo é usar uma fórmula assintomática para escalonar o valor de nse ficar na mesma escala usada nos fatores de escopo e frequência que é de 0 a 100 (Equação 6):

$$F_3 = \frac{nse}{0.01 * nse + 0.01} \quad \text{Eq. 6}$$

Com os três fatores calculados é possível calcular o CCME-WQI (Equação 7):

$$CCMEWQI = 100 - \left( \frac{\sqrt{F_1^2 + F_2^2 + F_3^2}}{1.732} \right) \quad \text{Eq. 7}$$

No cálculo o divisor de 1,732 normaliza o valor final na faixa de 0 a 100, sendo 0 o pior e 100 o melhor valor de qualidade de água.

Pode-se categorizar esse resultado em cinco a categorias:

- Excelente (valores de 100 a 95) - a qualidade da água é protegida com uma virtual ausência de ameaça ou deficiência; condições muito próximas de níveis naturais ou imaculados;
- Bom (valores de 94 a 80) - qualidade da água é protegida com apenas um pequeno grau de ameaça ou prejuízo; as condições raramente partem de níveis naturais ou desejáveis;
- Médio (valores de 79 a 65) - a qualidade da água é geralmente protegida, mas ocasionalmente ameaçada ou prejudicada; as condições às vezes partem de níveis naturais ou desejáveis;
- Marginal (valores de 64 a 45) - a qualidade da água é frequentemente ameaçada ou prejudicada; as condições frequentemente partem a partir de níveis naturais ou desejáveis;
- Ruim (valores de 44 a 0) - a qualidade da água é quase sempre ameaçada ou prejudicada; condições geralmente partem de níveis naturais ou desejáveis;

Tem como desvantagem o fato de considerar que todos os parâmetros analisados possuem o mesmo grau de importância (Mohebbi et al., 2013) além de não levar em consideração o grau de incerteza dos dados observados (Yan et al., 2016). Isso tem levado ao surgimento de adaptações desse modelo que minoram essas desvantagens usando por exemplo a lógica *fuzzy* (Feng et al., 2018).

Frente de outros índices de qualidade de água, como o IQA, tem, porém, duas vantagens relevantes para seu uso em um SSD, projetado para ser aplicável em regiões hidrográficas heterogêneas com diferentes intensidades e tipos de usos múltiplos e com inconsistências e falhas frequentes no monitoramento : i) a possibilidade de incluir e retirar parâmetros de qualidade de água e ii) a robustez frente a existência de falhas no conjunto de dados avaliados sem necessidade de modificar a metodologia do cálculo. Entende-se ainda que devido a sua adimensionalidade pode ser utilizado para sintetizar a qualidade de água junto com outros efeitos sobre a disponibilidade hídrica em geral, como por exemplo, modificações da vazão por captações. Almeida (2007) realizou um comparativo entre os índices de qualidade IQA e CCME-WQI no Rio Cuiabá comprovando as vantagens do uso do CCME-WQI em relação ao IQA.

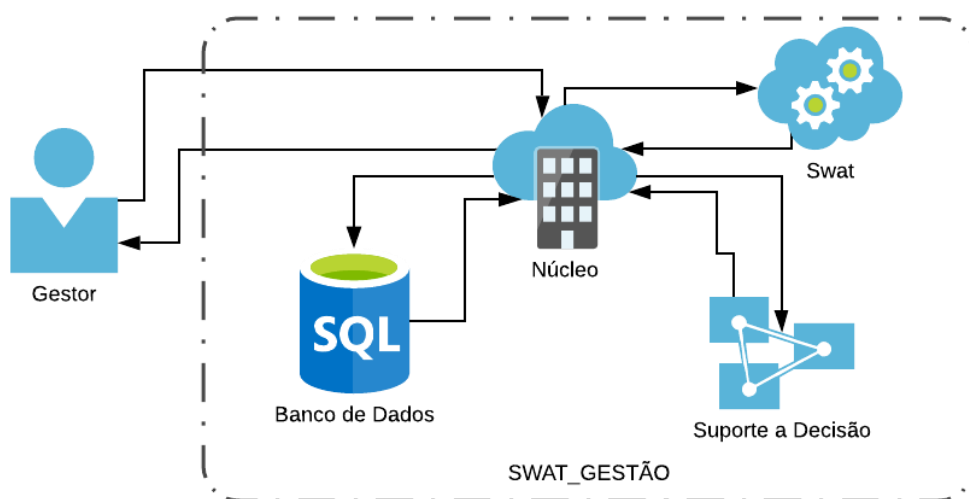
### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 CONCEPÇÃO DO SISTEMA SWAT\_GESTÃO E SEUS PRÉ-REQUISITOS

##### 3.1.1 Arquitetura geral

O SSD aqui desenvolvido chamado SWAT\_GESTÃO é um sistema WEB a ser aplicável para subsidiar o diagnóstico sinótico de alterações hidrológicas e da qualidade de água superficial e assistir na tomada de decisões para minimizar impactos causados sobre os RH em múltiplas escalas. Sua arquitetura foi projetada para poder tanto subsidiar a Outorga de RH quanto a avaliação conjuntiva de atividades múltiplas que resultam em mudanças do ciclo hidrológico e que impactam a qualidade de água, seja por captações/lançamentos pontuais e seja por poluição difusa, servindo dessa forma para um embasamento técnico de PRH.

O SWAT\_Gestão é composto por quatro principais componentes: i) Núcleo do sistema, ii) Banco de Dados, iii) SWAT e iv) Sistema de Suporte à Decisão (Figura 6).



**FIGURA 6** - Concepção geral do SWAT\_Gestão.

O componente central do Núcleo gerencia os processos internos do sistema que abrangem interações com o Banco de Dados, o modelo eco-hidrológico SWAT

e o módulo de Suporte a Decisão, que é acionado, quando forem detectadas alterações da disponibilidade dos RH além de limites pré-determinados para a bacia hidrográfica em questão. O SWAT é utilizado para simular Cenários de Base, Atual, Analisado e Alternativos (para definições, vide Quadro 5), estimando parâmetros quantitativos e qualitativos em função dos usos múltiplos (projetados) na bacia. Dispara ainda os cálculos para confeccionar o índice de qualidade de água CCME-WQI (*Canadian Council of Ministers of the Environment – Water Quality Index*) em cada trecho da rede hidrográfica em função dos parâmetros definidos pelo usuário do sistema.

Para o desenvolvimento foi utilizada a Ferramenta *Case* Genexus da Artech Inc (ARTECH, 2012). Esta ferramenta permite o desenvolvimento ágil de sistemas usando técnicas como o desenvolvimento baseado em conhecimento e o desenvolvimento incremental. Os códigos fontes são escritos em uma linguagem proprietária dentro de seu ambiente de desenvolvimento e são ligados em um projeto chamado de “Base de Conhecimento” por agregar todas as informações que o sistema necessita para se tornar funcional. Para que os aplicativos possam ser executados, a ferramenta compila esse código fonte na linguagem alvo escolhida pelo desenvolvedor podendo ser as linguagens Java e .Net para sistemas Web ou Java e *Objective-C* para *Smart Devices*. Permite também acessar diversos sistemas SGDBs (Sistema Gerenciador de Banco de dados) como MS-SQL, ORACLE, PostGreSql, MySql entre outros.

Foi utilizada a versão 16 update 02 do Genexus com a compilação do código fonte na linguagem .Net acessando o banco de dados MS-SQL 2017. Outra vantagem da ferramenta é a possibilidade de incluir componentes desenvolvidos pela comunidade que auxiliam o processo de desenvolvimento. No sistema desenvolvido foram utilizados três componentes disponíveis:

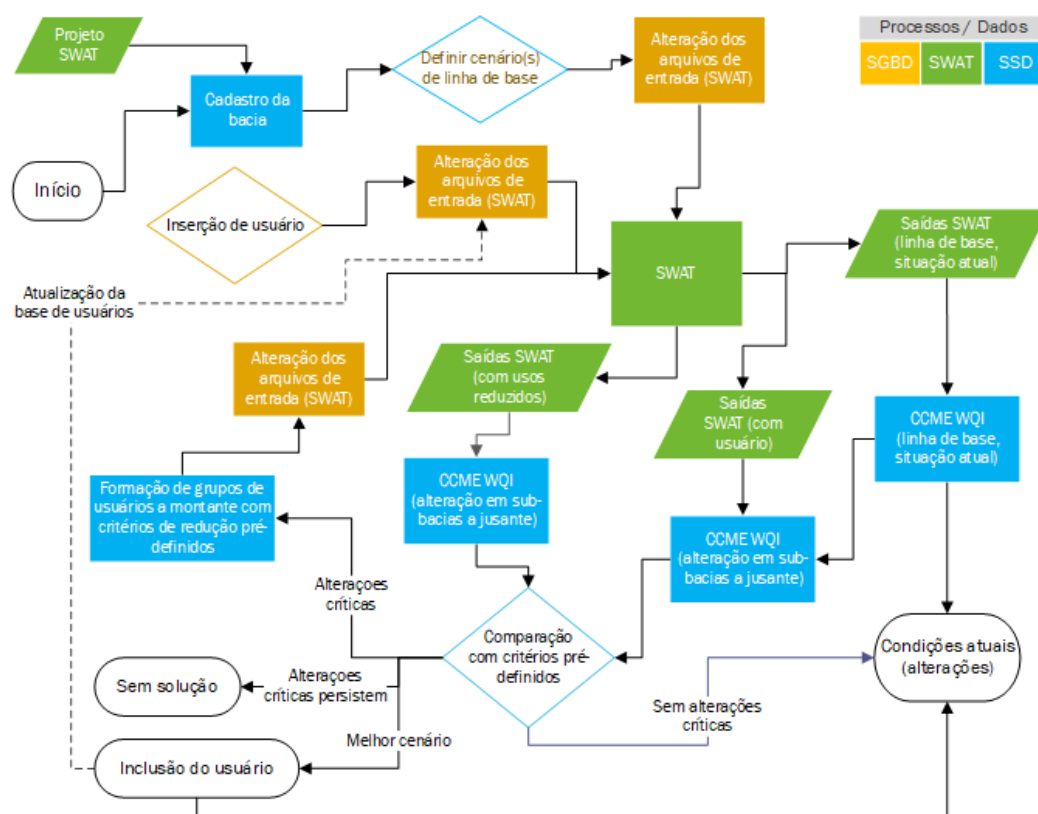
- ZipTools – Componente que permite compactar e descompactar arquivos selecionados
- *WorkWithPlus* da empresa Dvelop Software para auxiliar no design das páginas do sistema

- *Map Control* - Componente para visualização de camadas espaciais vetoriais do formato shape na API Google Maps

O sistema SWAT\_Gestão necessita um projeto SWAT (versão 2009) funcional da bacia hidrográfica a ser analisada com os seus respectivos arquivos de entrada. Como o sistema utiliza a API *GoogleMaps* para espacialização dos resultados das análises deve ser disponível também um arquivo vetorial das sub-bacias gerados pelos pré-processadores do *ArcSwat* em formato *Json*. A disponibilidade de outras camadas no mesmo formato, como por exemplo uma representação da rede hidrográfica e da rede viária são desejáveis para permitir a visualização de aspectos físicos e socioambientais pelo usuário.

### **3.1.2 Funcionamento básico do sistema**

O sistema disponibiliza ao gestor interfaces para ter acesso às principais informações armazenadas nos arquivos de entrada e saída do SWAT. A partir do espelhamento destas entradas é evitado a possibilidade de gerar inconsistências ou descalibrar o projeto base do SWAT utilizado (Figura 7).



**FIGURA 7** - Fluxograma multifuncional dos processos, dados e decisões no SWAT\_Gestão.

A primeira atividade a ser realizada é o cadastramento de uma bacia. Nesse processo, o gestor fornece o caminho de localização dos arquivos a serem utilizados, que em seguida são importados pelo SWAT\_Gestão para um diretório dentro do sistema para sua manipulação. Para facilitar a importação, o sistema compacta esses arquivos usando o componente *ZIPTools* gerando um único arquivo que fará o upload até o diretório de destino, onde ele é descompactado em seguida. Após a importação, o sistema analisa a consistência desses arquivos, buscando por informações essenciais ao funcionamento do sistema e armazena essas informações no seu banco de dados.

Antes de iniciar a execução do sistema é necessário estabelecer os valores de referência a partir da simulação de um Cenário Base, utilizado para fazer as comparações entre o cenário atual da bacia e cenários futuros a serem analisados. Quadro 5 apresenta um detalhamento de alguns termos/conceitos importantes utilizados com frequência nas seguidas exposições sobre o funcionamento do sistema. Esses cenários futuros, em seguida chamados de Cenário Analisado, podem

consistir em uma possível inclusão de um novo usuário de captação/lançamento de efluentes no caso da Outorga. Para fazer projeções estratégias referente de possíveis impactos adicionais ou reduzidas para subsidiar um PRH, o gestor pode alterar também, em termos percentuais, as cargas introduzidas em cada sub-bacia de acordo com a parametrização do projeto SWAT.

**QUADRO 5** - Conceitos importantes para entender o processo de configuração de ambiente no sistema SWAT-GESTÃO

| Conceito              | Detalhes                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|-----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Cenário Base          | Cenário que simula a bacia hidrográfica sem qualquer influência antrópica. É utilizado para gerar os valores de referência necessários para quantificar o índice de qualidade de água do CCME-WQI, tanto no Cenário Atual quanto nos Cenários Analisados.                                      |
| Cenário Atual         | Cenário simulado de acordo com a condição socioambiental atual, usado na comparação de possível degradação da qualidade de água segundo o CCME-WQI em relação aos Cenários Analisado e Alternativos.                                                                                           |
| Valores de Referência | Valores limítrofes de cada parâmetro avaliado na formação do CCME-WQI. São calculados individualmente para cada sub-bacia a partir do valor mediano de uma simulação mensal de 10 anos usando o cenário base.                                                                                  |
| Cenário Analisado     | Cenário gerado a partir de uma ou diversas alterações da bacia, cujos resultados invocam ou não o componente SSD do sistema SWAT-GESTÃO. Pode ser a inclusão de uma nova fonte de poluição pontual, alteração de cargas de lançamento ou alteração das cargas difusas geradas em mudanças etc. |
| Cenário Alternativo   | Cenário gerado pelo módulo de Suporte a Decisão que procura alternativas que possa suavizar a degradação simulada pelo Cenário Analisado.                                                                                                                                                      |

O primeiro passo então é definir os valores de referência que serão usados para calcular o índice de qualidade de água CCME-WQI de cada sub-bacia. Esse processo é mais detalhadamente descrito no item [3.5.2](#) e inicia-se com a criação do Cenário Base onde são retirados do modelo todas as fontes de poluição pontuais existentes, assim como são alterados HRUs com os usos da terra antrópicas (pastagem, lavoura) para a vegetação natural (Cerrado). Com este Cenário Base é gerada uma simulação mensal de 10 anos no SWAT e captados os valores dos parâmetros previstos para serem incluídos no cálculo do CCME-WQI em condições

pristinas. A mediana de cada parâmetro em cada sub-bacia é armazenada como respectivo Valor de Referência.

Em seguida é simulado no SWAT o Cenário Atual com as fontes de poluição pontuais e o UOT atuais. O CCME-WQI atual é determinado a partir da comparação dos valores dos parâmetros nos Cenário Base e Atual.

A partir desse momento o sistema SWAT\_Gestão pode ser utilizado pelo gestor para analisar o impacto de qualquer alteração que possa ocorrer na bacia, sejam captações ou lançamentos, mudanças nos sistemas de tratamento de efluentes existentes ou alteração do UOT.

O SWAT\_Gestão, através da sua interface permite modificar os arquivos de entrada correspondentes na base do SWAT como o arquivo de consumo de água (*Consumptive Water Use*) da sub-bacia (\*.wus) e o arquivo de poluição pontual dessa sub-bacia para criar novos cenários a serem simulados pelo SWAT. Após a simulação, SWAT\_Gestão importa os atributos quantitativos e qualitativos do canal (arquivo OUTPUT.RCH) e gera o índice CCME-WQI das sub-bacias. Os índices CCME-WQI dos Cenários Atual e Analisado são comparados para diagnosticar eventuais alterações nas sub-bacias. Caso nenhuma sub-bacia tenha o seu CCME-WQI degradado, o módulo de suporte de decisão não é acionado. Caso contrário, ou seja, se uma ou mais sub-bacias tiverem o seu CCME-WQI degradado em relação ao Cenário Atual, o SWAT\_Gestão identifica quais são as sub-bacias afetadas a jusante das mesmas, destacando entre as sub-bacias identificadas aquela com maior grau de degradação. É nessa sub-bacia que o Suporte à Decisão inicia a busca por soluções com o objetivo de limitar seus impactos.

As sub-bacias a montante, se houver, da sub-bacia cujo a alteração gerou a criação do cenário a ser simulado não são avaliadas na identificação de variação do grau de degradação. Essas sub-bacias não sofreram qualquer impacto com essa alteração dessa simulação, porém são consideradas pelo módulo de Suporte à Decisão na busca de alternativas pois em tese já podem acarretar impactos relevantes, responsáveis parcialmente na violação das condições em uma determinada bacia.

Se o gestor decidir executar o módulo de Suporte à Decisão, o SWAT\_Gestão primeiramente analisa nas sub-bacias afetadas e também a sua montante, alternativas que possam diminuir o impacto da degradação do índice CCME-WQI. Na implementação atual do sistema, foram pré-determinadas três alternativas que são avaliadas:

- Se uma ou várias *HRUs* de uma sub-bacia dentro das sub-bacias analisadas pelo SSD não possuírem faixa de mata ciliar designada nos arquivos de entrada do SWAT, é considerada a inclusão de uma faixa de 50 m de mata ciliar;
- Se uma ou várias *HRUs* da sub-bacia dentro das sub-bacias analisadas pelo SSD possuírem como cobertura predominante de tipo pastagem ou agricultura, a cobertura será alterar para Cerrado;
- Se uma ou várias sub-bacias dentro das sub-bacias analisadas pelo SSD possuírem outras fontes de poluição pontuais (FPP) a alternativa avaliada é uma diminuição das suas cargas de lançamento em 10%.

São somente algumas das alternativas que podem ser exploradas através das configurações de simulação do SWAT. Estas foram escolhidas primordialmente para testar o funcionamento computacional do SWAT\_Gestão, garantindo-lhe um gasto limitado na execução do SSD.

Com esta lista de alternativas, o módulo de Suporte à Decisão cria grupos, combinando até três alternativas diferentes que possam, a partir da soma dos seus possíveis impactos benéficos nas sub-bacias afetadas, equalizar ou ao menos diminuir o impacto negativo causado pelas alterações. Para cada grupo criado, o SWAT\_Gestão gera um Cenário Alternativo, alterando os arquivos de entrada do SWAT para refletir as mudanças sugeridas e executa o módulo SWAT. Após a execução, o SWAT\_Gestão importa e analisa o arquivo OUTPUT.RCH calculando o CCME-WQI para cada uma das sub-bacias.

Depois calculados os índices de qualidades de água em todos os cenários alternativos gerados é feita a comparação dos índices e o sistema lista ao gestor os cenários alternativos ordenados decrescentemente de acordo com o valor do índice CCME-WQI de cada cenário.

Com isso o gestor da bacia hidrográfica dispõe de subsídios para a sua tomada de decisão, permitindo ou não aceitar a alteração analisada ou escolher entre a lista de grupos de alternativas ordenadas pelo módulo de Suporte à Decisão, avaliando qual seria a mais adequada para que essa alteração seja efetivada com o menor impacto no índice de qualidade CCME-WQI.

### 3.2 ALTERAÇÕES FEITAS PELO SISTEMA SWAT\_GESTÃO

São detalhados em seguida as características dos arquivos de entrada (QUADRO 1, QUADRO 2, QUADRO 3) que o sistema SWAT\_Gestão altera para efetuar simulações com o modelo SWAT:

1. FILE.CIO - Arquivo com as configurações gerais a serem utilizadas pelo SWAT na simulação do cenário. Contêm informações como opções do modelo, nome dos arquivos de entrada de dados climáticos, nome de arquivos de banco de dados, especificações dos arquivos de saída etc.

Nesse arquivo o sistema SWAT\_Gestão faz alterações somente em seis linhas:

- a) linha 8 - Número de anos de simulação a ser executado.
  - b) linha 9 - Ano de início da simulação.
  - c) linha 59 - Periodicidade da simulação podendo ter os seguintes valores:
    - 0 - Para diário
    - 1 - Para mensal
    - 2 - Para anual
2. FIG.FIG - Arquivo que representa a topologia da rede hidrográfica e suas sub-bacias. É preenchido com um conjunto de comandos e seus argumentos onde os principais são:
    - *subbasin* - define quais cálculos devem ser executados na fase terrestre da sub-bacia e cujo identificador é informado como argumento. O resultado desses cálculos é armazenado no nó de entrada do canal principal que passa por essa sub-bacia.
    - *add* - utilizado para fazer a somatória dos resultados dos cálculos dos elementos existentes na bacia como junção de sub-bacias, adição de

lançamento de fontes diretas de efluentes no canal principal da sub-bacia etc.

- *reccnst* - Inclui as vazões e cargas acumuladas de lançamento de efluentes em uma sub-bacia. Nesse comando os dados possuem resolução temporal anual. Tem como um dos seus argumentos o nome do arquivo com os dados anuais de lançamentos pontuais das sub-bacias gerados pelo sistema SWAT\_Gestão.
- *recmon* – Semelhante ao *reccnst* porém com periodicidade mensal
- *recday* - Semelhante ao *reccnst* porém com periodicidade diária
- *route* - Informa ao SWAT para fazer todos os cálculos referentes a fase aquática do canal principal da sub-bacia. Esse comando sempre é executado após o comando *subbasin* e os comandos *add*. Possui como entrada os dados na entrada do canal principal da sub-bacia e retorna os cálculos obtidos na saída desse canal que são usados como entradas no canal principal da sub-bacia a jusante.
- *finish* - Comando que informa ao modelo SWAT que alcançou o exutório da bacia e que pode ser finalizada a simulação para este período.

O SWAT\_Gestão utiliza o arquivo Fig.fig em três momentos durante a execução:

- No cadastramento da bacia hidrográfica quando o sistema registra todas as sub-bacias, seus reservatórios, captações e lançamentos de efluentes. Replica no sistema SWAT\_Gestão a mesma organização dos elementos que fazem parte da bacia hidrográfica no SWAT.
  - Na geração dos valores de referência a serem utilizados pelo sistema, para geração dos Cenários Base e Atual.
  - Quando no Cenário Analisado há inclusão ou exclusão de uma fonte de poluição pontual. Nessas situações são alterados os arquivos de poluição pontual dessa fonte.
3. ARQUIVOS \*.WUS - Cada sub-bacia possui um arquivo com a extensão WUS com a somatória mensal das retiradas de água, diferenciadas em quatro tipos:
- Retirada em reservatório

- Retirada no canal principal
- Retirada no aquífero raso
- Retirada no aquífero profundo

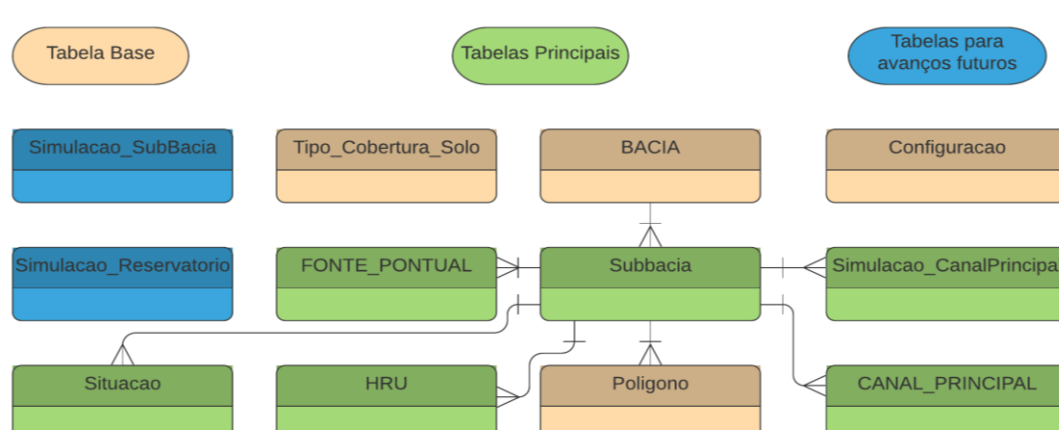
O sistema SWAT\_Gestão, na atual versão, só analisa de valores de retirada no canal principal. Os valores ali armazenados estão multiplicados por  $10^4$  para restringir no arquivo o número de casas decimais em 1. Na importação dessa informação, o sistema SWAT\_Gestão faz as devidas conversões.

4. ARQUIVOS Poluição Pontual (*Point source files*) - O SWAT simula as cargas difusas provenientes da fase terrestre do modelo. Já as captações e lançamentos pontuais devem ser informados para simulação da fase aquática, agregados por sub-bacia. Os dados podem ser informados em resolução temporal de hora, dia, mês, acumulado por ano ou como média anual dependendo da temporariedade escolhida para a simulação. O SWAT\_Gestão utiliza esses arquivos para inserir os dados de lançamento de efluentes no canal principal da sub-bacia na simulação inclusão/alteração ou exclusão de fontes de poluição pontual na sub-bacia.

### **3.3 BANCO DE DADOS DO SWAT\_GESTÃO**

#### **3.3.1 Diagrama de entidade e relacionamento**

Para controlar o fluxo de informações, o SWAT\_Gestão possui um Banco de Dados com 12 tabelas, cujo diagrama de entidade e relacionamento das Tabelas é apresentado na Figura 8.



**FIGURA 8-** Diagrama de Entidade e Relacionamento do sistema.

As principais tabelas utilizadas pelo sistema são a de SUBBACIA, Simulacao\_CanalPrincipal, Situacao e Fonte\_Pontual. A descrição dessas tabelas e sua funcionalidade é detalhada em seguida.

### 3.3.2 Descrição das tabelas

#### 3.3.2.1 Configuração do SWAT\_Gestão (Configuracao)

A tabela de configuração geral do SWAT\_Gestão é gerada a partir de uma interface WWW que determina a estrutura de diretórios dos três componentes do sistema. Inclui a localização da executável do SWAT e dos arquivos de entrada e saída das bacias a serem avaliadas. Possui um único campo especificando o diretório do executável do SWAT e para onde são transferidos os arquivos do projeto SWAT original (Quadro 6).

**QUADRO 6** - Dicionário de Dados da tabela de Configuração do Sistema

| Nome da Tabela | Configuracao       |                                                                                                                              |
|----------------|--------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Nome do Campo  | Tipo               | Descrição                                                                                                                    |
| CONFSWATDIR    | Character<br>(300) | Diretório onde se encontra o executável do SWAT e onde será salvo os arquivos a serem usados pelo SWAT durante as simulações |

### 3.3.2.2 Tipos de Uso e Cobertura de Solo (Tipo\_Cobertura\_Solo)

Esta tabela é importada dos arquivos de entrada do SWAT, contendo os tipos de uso e cobertura de solo reconhecidos pelo SWAT com os parâmetros referentes para cada tipo. Reflete a estrutura do arquivo plant.dat que é encontrado no Capítulo 14 da documentação dos arquivos de entrada e saída do SWAT (ARNOLD et al., 2011) (Quadro 7).

**QUADRO 7** - Dicionário de Dados da tabela dos tipos de cobertura e uso de solo

| Nome da Tabela | Tipo_Cobertura_Solo |                                                           |
|----------------|---------------------|-----------------------------------------------------------|
| Nome do Campo  | Tipo                | Descrição                                                 |
| COBSOLONUM     | Númerico (6)        | Identificador para cada tipo de cobertura de solo         |
| COBSOLONOM     | Caracter (4)        | Código de cada tipo de solo segundo o SWAT                |
| COBSOLOCLASS   | Númerico (1)        | Código de Classificação do Solo                           |
| CobSoloUpNE    | Númerico (18.6)     | Captação de Nitrogênio na Emergência da Cobertura do Solo |
| CobSoloUPN5M   | Númerico (18.6)     | Captação de Nitrogênio com 50% da maturidade              |
| CobSoloUPNM    | Númerico (18.6)     | Captação de Nitrogênio na maturidade                      |
| CobSoloUPPE    | Númerico (18.6)     | Captação de Fósforo na Emergência da Cobertura do Solo    |
| CobSoloUPP5M   | Númerico (18.6)     | Captação de Fósforo com 50% da maturidade                 |
| CobSoloUPPM    | Númerico (18.6)     | Captação de Fósforo na maturidade                         |

### 3.3.2.3 Bacia

A tabela Bacia armazena os dados de configuração de uma bacia hidrográfica a ser analisada com informações que terão impacto em todos os elementos constantes nessa base. O sistema permite analisar uma ou mais bacias hidrográficas (Quadro 8).

O campo BACIASWATDir contém o caminho dentro do servidor do sistema SWAT\_Gestão, onde estão armazenados os arquivos de entrada e saída do projeto SWAT, utilizado como base para a bacia hidrográfica.

BACIAODVer, BACIADBOVer, BACIAFosfVer, BACIANitroVer, BACIASediVer e BACIAVazaoVer são campos do tipo booleano que indicam se um determinado parametro de avaliação (na ordem: Oxigênio Dissolvido, DBO, Fósforo Total, Nitrogênio Total, Sedimentos e Vazão) será ou não incluído nos cálculos para

o índice de qualidade CCME-WQI, permitindo ao gestor escolher entre os itens disponíveis.

O campo BACIAAnaPerc armazena um percentual máximo de alteração em relação aos valores de referência que o sistema considerará como sendo alterações irrelevantes. Somente o número de falhas acima desse limite é contabilizado para o cálculo do CCME-WQI.

O campo BACIAMinVazao armazena o valor médio mínimo mensal de vazão em uma sub-bacia para que esta seja considerada apta a ser analisada pelo sistema. A determinação do seu valor limite depende da confiança da calibração da bacia em sub-bacias com pouca vazão onde pequenas alterações podem causar grandes impactos.

As concentrações de referência (p. ex. Nitrogênio, Fósforo, DBO etc.) são determinados por padrão para menor vazão mensal. O usuário, porém, pode redefinir estes limites cujos valores são armazenados nos campos BaciaConcSed, BaciaNitroConc, BaciaFosfConc, BaciaDBOConc e BaciaOD. Se p.ex. a concentração do Nitrogênio Total no mês com menor vazão é inferior ao valor de BaciaNitroConc, então o sistema SWAT\_Gestão usará o valor de BaciaNitroConc como referência, caso contrário, usará o valor da concentração de Nitrogênio Total no mês com menor vazão.

#### **QUADRO 8 - Dicionário de Dados da Tabela de Bacia**

|                |                |                                                                                                                                                                      |
|----------------|----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Nome da Tabela | BACIA          |                                                                                                                                                                      |
| Nome do Campo  | Tipo           | Descrição                                                                                                                                                            |
| BACIAID        | Numérico (4)   | Identificador único da Bacia                                                                                                                                         |
| BACIANome      | Caracter (60)  | Nome da Bacia                                                                                                                                                        |
| BACIASWATDir   | Caracter (300) | Diretório onde estará armazenado os arquivos de leitura a serem processados pelo SWAT. Essa pasta será armazenada dentro da pasta cadastrada no atributo CONFSWATDIR |
| BACIAODVer     | Booleano       | Indica se é para incluir a análise de Oxigênio Dissolvido na avaliação de qualidade                                                                                  |
| BACIADBOVer    | Booleano       | Indica se é para incluir a análise de DBO na avaliação de qualidade                                                                                                  |
| BACIAFosfVer   | Booleano       | Indica se é para incluir a análise de Fósforo Total na avaliação de qualidade                                                                                        |
| BACIANitroVer  | Booleano       | Indica se é para incluir a análise de Nitrogênio Total na avaliação de qualidade                                                                                     |
| BACIASediVer   | Booleano       | Indica se é para incluir a análise de Sedimentos na avaliação de qualidade                                                                                           |

|                |                 |                                                                                                           |
|----------------|-----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| BACIAVazaoVer  | Booleano        | Indica se é para incluir a análise de Vazão na avaliação de qualidade                                     |
| BACIAAnaPerc   | Numérico (6.2)  | Percentual de alteração em relação ao valor de referência para ser considerado na avaliação de qualidade. |
| BaciaConcSed   | Numérico (18.8) | Valor mínimo de concentração de sedimentos a ser usado como referência                                    |
| BaciaNitroConc | Numérico (18.8) | Valor mínimo de concentração de nitrogênio a ser usado como referência                                    |
| BaciaFosfConc  | Numérico (18.8) | Valor mínimo de concentração de fósforo a ser usado como referência                                       |
| BaciaDBOConc   | Numérico (18.8) | Valor mínimo de concentração de DBO a ser usado como referência                                           |
| BaciaODConc    | Numérico (18.8) | Valor máximo de concentração de Oxigênio Dissolvido a ser usado como referência                           |
| BACIAMinVazao  | Numérico (18.8) | Vazão mínima de referência necessária para que a sub-bacia possa ser utilizada pelo sistema               |

### 3.3.2.4 Sub-bacia (Subbacia)

Uma das principais tabelas do sistema armazena todas as informações que caracterizam cada uma das sub-bacias existentes na bacia hidrográfica analisada. (Quadro 9). Nessa tabela são armazenados dados principalmente dos arquivos de entrada fig.fig referentes a sub-bacia específica e do arquivo de configuração da sub-bacia (\*.sub). Armazena também os dados gerados no Cenário Base da sub-bacia e que são usados no cálculo do CCME-WQI.

Do arquivo fig.fig são captados os seguintes dados:

- código da sub-bacia no modelo SWAT (SUBBACIANUM);
- códigos das sub-bacias a montante e que desaguam nessa sub-bacia (SUBBACIAPriAnteCod, SUBBACIASegAnteCod). Sub-bacias que são cabeceiras possuem um valor igual a zero;
- código da sub-bacia a jusante, na qual ocorre o deságue do canal dessa sub-bacia (SUBBACIADesagueCOD). A sub-bacia de exutório possui valor igual a zero.
- Os nomes dos arquivos de configuração da sub-bacia (SUBBACIAArqSub), configuração do canal principal da sub-bacia

(SUBBACIAArdRch), dados de qualidade de água do canal principal da sub-bacia (SUBBACIAArqQlt), lançamento de efluentes por fontes de poluição pontual (SUBBACIAArqPointSource) se houver e dados sobre reservatórios, se houver, como o código de identificação do reservatório (SUBBACIARseNum), nome do arquivo de configuração do reservatório (SUBBACIAArqRsCarac) e nome do arquivo de dados de qualidade de água do reservatório (SUBBACIAArqRsQualt).

O campo SUBBACIANumHidro é um campo que só tem função no momento de recriação da estrutura do arquivo fig.fig, sem uso em outras circunstâncias. Ele é importante para controlar qual o último número de armazenamento hidrológico (HYD\_STOR) está configurado para essa sub-bacia conforme explicado na seção [2.4.2](#).

Outro campo que é importante para o processo de recriação da estrutura hidrográfica da bacia no arquivo fig.fig é o campo SUBBACIAOrdemGer para que o sistema saiba em qual ordem uma sub-bacia deve ser analisada em relação as outras, como descrito na seção [2.4.2](#). Sub-bacias na cabeceira onde os valores de SUBBACIAPriAnteCod e SUBBACIASegAnteCod são iguais a zero terão o valor desse campo igual a 1. Sub-bacias que não são cabeceiras terão esse valor como o resultado da soma dos campos SUBBACIAOrdemGer das duas sub-bacias a sua montante. No momento da recriação do arquivo fig.fig as sub-bacias são recriadas por ordem crescente do valor do campo SUBBACIAOrdemGer. Primeiro são listadas todas as sub-bacias com o campo SUBBACIAOrdemGer igual a 1, depois as iguais a 2 e assim por diante. Dessa forma é possível garantir que uma sub-bacia só será processada após as sub-bacias a sua montante terem sido processadas.

No arquivo de configuração da sub-bacia (\*.sub) busca-se o valor da área de drenagem da sub-bacia (SUBBACIADrenagemArea) e o tamanho total da área da sub-bacia (SUBBACIATamArea).

O sistema SWAT-Gestão permite a inclusão de mais de uma fonte de poluição pontual em uma sub-bacia permitindo a individualização da sua captação e/ou lançamento. Para a execução de um novo cenário no SWAT, porém, estas captações e/ou lançamentos de efluentes devem ser totalizadas. Para este fim a tabela

possui alguns campos totalizadores como o SUBBACIAUserQtd que mostra o total de empreendimentos captando água e/ou lançando efluentes no canal principal, o campo SubBaciaUsoMensalRetRio que armazena a somatória das captações de água pelos empreendimentos no canal principal e o campo SubBaciaUsoMensalLanEfl que contém a somatória das vazões de lançamento de efluentes por esses empreendimentos.

Os campos SubbaciaSituacaoRefVazao, SubbaciaSituacaoRefConcSed, SubbaciaSituacaoRefConcNitro, SubbaciaSituacaoRefConcFosf, SubbaciaSituacaoRefConcDBO, SubbaciaSituacaoRefConcOD são usados para armazenar os valores de referência de cada um dos parâmetros avaliados para calcular o índice de qualidade CCME-WQI de cada sub-bacia em cada simulação. Eles são gerados como parte do subprocesso [3.4.2](#) através do valor mediano de cada item gerados em uma simulação mensal de 10 anos sobre o Cenário Base.

**QUADRO 9 - Dicionário de Dados da Tabela de Sub-bacias**

| Nome da Tabela         | SUBBACIA       |         |                                                                                   |
|------------------------|----------------|---------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| Nome do Campo          | Tipo           | Fórmula | Descrição                                                                         |
| SUBBACIACOD            | Numérico (4)   |         | Identificador da Sub-bacia no sistema                                             |
| SUBBACIANUM            | Numérico (6)   |         | Identificador da Sub-bacia no SWAT                                                |
| BACIAID                | Numérico (4)   |         | Código da Bacia na qual a sub-bacia se encontra                                   |
| SUBBACIAPriAnteCod     | Numérico (6)   |         | Código da Primeira Sub-Bacia a montante                                           |
| SUBBACIASegAnteCod     | Numérico (6)   |         | Código da Segunda Sub-Bacia a montante                                            |
| SUBBACIADesagueCOD     | Numérico (6)   |         | Código da Sub-Bacia a jusante                                                     |
| SUBBACIAOrdemGer       | Numérico (3)   |         | Ordem da sub-bacia a ser analisada no SWAT descrita no arquivo fig.fig            |
| SUBBACIAArqSub         | Caracter (13)  |         | Nome do arquivo de entrada das características da Sub-bacia                       |
| SUBBACIAArdRch         | Caracter (13)  |         | Nome do arquivo de entrada das características do Canal Principal da Sub-bacia    |
| SUBBACIAArqQlt         | Caracter (13)  |         | Nome do arquivo de entrada de qualidade da água do canal principal                |
| SUBBACIADrenagemArea   | Numérico (6.3) |         | Área de Drenagem                                                                  |
| SUBBACIAArqPointSource | Caracter (13)  |         | Nome do arquivo de entrada com dados das fontes pontuais de poluição da Sub-Bacia |
| SUBBACIANumHidro       | Numérico (3)   |         | Número de armazenamento importante para a recreação da estrutura da Sub-bacia     |
| SUBBACIARseNum         | Numérico (6)   |         | Código de identificação do Reservatório caso houver na sub-bacia                  |

|                              |                  |                              |                                                                                        |
|------------------------------|------------------|------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| SUBBACIAArqRsCarac           | Caracter (13)    |                              | Nome do arquivo de entrada com dados de caracterização do reservatório caso houver     |
| SUBBACIAArqRsQualt           | Caracter (13)    |                              | Nome do arquivo de entrada de qualidade da água do reservatório se houver              |
| SUBBACIAUserQtd              | Numérico (4)     | count(UsuarioID)             | Quantidade de usuários de fontes pontuais de poluição da sub-bacia                     |
| SubBaciaUsoMensalRetRio      | Numérico (18,10) | SUBBaciaTotal(SUBBACIACOD,1) | Total de Vazão de Retirada do canal principal pelos usuários                           |
| SubBaciaUsoMensalLanEfl      | Numérico (18,10) | SUBBaciaTotal(SUBBACIACOD,5) | Total de Vazão de Lançamento de efluente no canal principal                            |
| SUBBACIATamArea              | Numérico (18,6)  |                              | Tamanho da área da sub-bacia                                                           |
| SubbaciaSituacaoRefVazao     | Numérico (18,10) |                              | Vazão da simulação base do Sistema. Média diária em m <sup>3</sup> /s                  |
| SubbaciaSituacaoRefConcSed   | Numérico (18,10) |                              | Concentração de sedimentos da simulação base do Sistema. Média diária em mg/l          |
| SubbaciaSituacaoRefConcNitro | Numérico (18,10) |                              | Concentração de nitrogênio total da simulação base do Sistema. Média diária em mg/l    |
| SubbaciaSituacaoRefConcFosf  | Numérico (18,10) |                              | Concentração de fósforo total da simulação base do Sistema. Média diária em mg/l       |
| SubbaciaSituacaoRefConcDBO   | Numérico (18,10) |                              | Concentração de DBO da simulação base do Sistema. Média diária em mg/l                 |
| SubbaciaSituacaoRefConcOD    | Numérico (18,10) |                              | Concentração de oxigênio dissolvido da simulação base do Sistema. Média diária em mg/l |

### 3.3.2.5 Polígono (Polígono)

Esta tabela é utilizada para armazenar os poligonais da área da sub-bacia para poder gerar a *layer* da sub-bacia no *Google Maps* (Quadro 10).

**QUADRO 10** - Dicionário de Dados da Tabela de polígono das sub-bacias.

| Nome da Tabela            | Polígono      |                                                 |
|---------------------------|---------------|-------------------------------------------------|
| Nome do Campo             | Tipo          | Descrição                                       |
| SUBBACIACOD               | Numérico (4)  | Identificador da Sub-bacia no sistema           |
| SUBBACIAPoligonoID        | Numérico (4)  | Identificar do vértice do polígono da sub-bacia |
| SUBBACIAPoligonoLongitude | Caracter (25) | Longitude do ponto do polígono                  |
| SUBBACIAPoligonoLatitude  | Caracter (25) | Latitude do ponto do polígono                   |

### 3.3.2.6 Canal Principal (Canal\_Principal)

A tabela é necessária para armazenar as entidades geométricas (linhas) do canal principal da sub-bacia para visualização pela API *Google Maps* (Quadro 11).

**QUADRO 11** - Dicionário de Dados da Tabela dos trechos do Canal Principal

| Nome da Tabela         | Canal_Principal |                                                        |
|------------------------|-----------------|--------------------------------------------------------|
| Nome do Campo          | Tipo            | Descrição                                              |
| SUBBACIACOD            | Numérico (4)    | Identificador da Sub-bacia no sistema                  |
| SUBBACIALinhaID        | Numérico (4)    | Identificar do vértice do canal principal da sub-bacia |
| SUBBACIALinhaLongitude | Caracter (25)   | Longitude do ponto do canal principal                  |
| SUBBACIALinhaLatitude  | Caracter (25)   | Latitude do ponto do canal principal                   |

**3.3.2.7 HRU**

No SWAT, a Unidade de Resposta Hidrológica (HRU) é uma porção da sub-bacia que possui o mesmo tipo de UOT, o mesmo tipo de solo e a mesma classe de declividade do terreno sendo a menor unidade de avaliação de cada Sub-Bacia. Cada sub-bacia pode ter mais de uma HRU e a tabela “HRU” armazena as informações de cada HRU na bacia (Quadro 12). O número de HRU, o nome dos arquivos das suas características (SUBBACIAHRUARq) e das suas práticas de manejo (SUBBACIAHRUMgm) estão localizados no arquivo de característica (\*.sub) da sub-bacia a qual uma HRU pertence.

Dentro do arquivo das características da HRU (\*.hru) o sistema capta o percentual da área da HRU dentro da sua Sub-bacia (SUBBACIAHRUAreaPerc). Já no arquivo do manejo da HRU (\*.mgt), o sistema capta o identificador do UOT (SUBBACIAHRUPlanCod) e o valor em metros da faixa de mata ciliar existente nessa HRU (SUBBACIAHRUCiliarArea).

**QUADRO 12** - Dicionário de Dados da Tabela de HRU

| Nome da Tabela     | HRU           |                                                                            |
|--------------------|---------------|----------------------------------------------------------------------------|
| Nome do Campo      | Tipo          | Descrição                                                                  |
| SUBBACIACOD        | Numérico (4)  | Identificador da Sub-bacia no sistema                                      |
| SUBBACIAHRUNum     | Numérico (4)  | Identificador da HRU na sub-bacia                                          |
| SUBBACIAHRUARq     | Caracter (13) | Nome do arquivo de entrada com dados de caracterização da HRU na sub-bacia |
| SUBBACIAHRUMgm     | Caracter (13) | Nome do arquivo de entrada com dados de gerenciamento da HRU na sub-bacia  |
| SUBBACIAHRUPlanCod | Numérico (6)  | Identificador do tipo de cobertura de solo                                 |

|                       |                 |                                                        |
|-----------------------|-----------------|--------------------------------------------------------|
| SUBBACIAHRUAreaPerc   | Numérico (10.2) | Percentual da HRU em relação a área total da sub-bacia |
| SUBBACIAHRUCiliarArea | Numérico (18.6) | Tamanho da área de mata ciliar da HRU na sub-bacia     |

### 3.3.2.8 Armazenamento de fontes pontuais (FONTE\_PONTUAL)

Essa tabela armazena os dados das fontes de poluição pontuais cadastradas na bacia hidrográfica. (Quadro 13)

**QUADRO 13** - Dicionário de dados da tabela com dados das Fontes Pontuais de Poluição

| Nome da Tabela                 | FONTE_PONTUAL   |                                     |                                                                          |
|--------------------------------|-----------------|-------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| Nome do Campo                  | Tipo            | Fórmula                             | Descrição                                                                |
| UsuarioID                      | Numérico (6)    |                                     | Identificador da fonte de poluição pontual                               |
| SUBBACIACOD                    | Numérico (4)    |                                     | Identificador da Sub-bacia no sistema                                    |
| UsuarioCargaDISOX              | Numérico (18.6) |                                     | Carga em média diária em kg de oxigênio dissolvido                       |
| UsuarioCargaCBOD               | Numérico (18.6) |                                     | Carga em média diária em kg de DBO                                       |
| UsuarioCargaNO2                | Numérico (18.6) |                                     | Carga em média diária em kg de Nitrito                                   |
| UsuarioCargaNH3                | Numérico (18.6) |                                     | Carga em média diária em kg de Amônia                                    |
| UsuarioCargaNO3                | Numérico (18.6) |                                     | Carga em média diária em kg de Nitrato                                   |
| UsuarioCargaOrgFosf            | Numérico (18.6) |                                     | Carga em média diária em kg de Fósforo Orgânico                          |
| UsuarioCargaMinFosf            | Numérico (18.6) |                                     | Carga em média diária em kg de Fósforo Mineral                           |
| UsuarioCargaOrgNitro           | Numérico (18.6) |                                     | Carga em média diária em kg de Nitrogênio Orgânico                       |
| UsuarioCargaSed                | Numérico (18.6) |                                     | Carga em média diária em ton de Sedimentos                               |
| UsuarioCargaLanVazao           | Numérico (18.6) |                                     | Vazão em média diária em m <sup>3</sup> de lançamento de efluente        |
| UsuarioCargaRetRch             | Numérico (18.6) |                                     | Vazão em média diária em m <sup>3</sup> de retirada de água              |
| UsuarioRetiradaSegVazao        | Numérico (18.6) | UsuarioCargaRetRch/86400            | Conversão da média diária de retirada de água em m <sup>3</sup> /s       |
| UsuarioLancamentoSegVazao      | Numérico (18.6) | UsuarioCargaLanVazao/86400          | Conversão da média diária de lançamento de efluente em m <sup>3</sup> /s |
| UsuarioTotalNitrogenioSegCarga | Numérico (18.6) | (UsuarioCargaNO2 + UsuarioCargaNH3) | Conversão da soma das cargas de nitrogênio em média diária para kg/s     |

|                             |                    |                                                      |                                                                      |
|-----------------------------|--------------------|------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
|                             |                    | UsuarioCargaNO3 +<br>UsuarioCargaOrgNitro)/8640      |                                                                      |
| UsuarioTotalFosforoSegCarga | Numérico<br>(18.6) | (UsuarioCargaOrgFosf +<br>UsuarioCargaMinFosf)/86400 | Conversão da soma das cargas de<br>fósforo em média diária para kg/s |
| UsuarioSedimentoSegCarga    | Numérico<br>(18.6) | UsuarioCargaSed/86400                                | Conversão da carga de sedimento em<br>média diária para ton/s        |

### 3.3.2.9 Simulação do Canal Principal (Simulacao\_CanalPrincipal)

É a principal tabela do sistema que armazenará as informações calculadas pelo SWAT sobre a dinâmica no canal principal de cada sub-bacia. Seus valores são obtidos pelo arquivo OUTPUT.RCH de uma simulação. Cada registro se refere a um determinado canal principal de um cenário e contém como identificar único o campo SimulaSeq que é incremental em 1. O campo SimulaSubBaciaNum conterá o código da sub-bacia no SWAT a qual o canal pertence e o atributo Simula\_Controle controla para qual cenário pertence esse registro.

- Se igual a 1 significa o Cenário Atual de comparação
- Se igual a 2 significa o Cenário Analisado da sub-bacia
- Se maior que 2 para cada registro é um Cenário Alterado, criado pelo módulo de Suporte a Decisão para busca por soluções dentre dos limites predefinidos

As informações aqui armazenadas envolvem os valores dos itens avaliados pelo sistema tanto na entrada da sub-bacia quanto na sua saída. (Quadro 14).

Os valores de entrada são as vazões ou concentrações dos itens avaliados pelo sistema no nó de entrada do trecho de uma sub-bacia que são resultado dos valores de saída das sub-bacias a montante, valores resultantes da fase terrestre da própria sub-bacia (descarga superficial, fluxo lateral e do subsolo) e valores referentes a captações e/ou lançamento de efluentes.

Os valores de saída são os valores dos itens avaliados pelo sistema no nó de saída do trecho de uma sub-bacia e são o resultado das entradas modificados pelos processos internos que ocorrem durante o percurso do canal principal da sub-bacia. Para os objetivos do sistema são usados atualmente somente os valores de saída.

O SWAT simula as cargas de nitrogênio diferenciadas em nitrogênio orgânico, nitrato, nitrito e amônia, que são somadas pelo SWAT\_Gestão a partir de

um campo do tipo fórmula para obtenção do Nitrogênio Total (SimulaOutTotalNitro). O mesmo ocorre para determinar Fósforo Total que é disponibilizado pelo SWAT em cargas de fósforo orgânico e mineral (SimulaOUTTotalFosforo).

Os valores de vazão são armazenados pelo SWAT em m<sup>3</sup>/s, mesma unidade utilizada pelo sistema SWAT\_Gestão. Como as avaliações de componentes químicos no SSD são baseadas em concentrações (mg/l), é efetuada transformação das cargas a partir do campo tipo fórmula chamado SimulaFatorConversao.

#### QUADRO 14 - Dicionário de Dados da Tabela de Simulação no Canal Principal

| Nome da Tabela       | Simulacao_CanalPrincipal |                                                                       |                                                                                                                                          |
|----------------------|--------------------------|-----------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Nome do Campo        | Tipo                     | Fórmula                                                               | Descrição                                                                                                                                |
| SimulaSeq            | Numérico (6)             |                                                                       | Identificador do registro na tabela                                                                                                      |
| SimulaSubBaciaNum    | Numérico (6)             |                                                                       | Código da Sub-bacia no SWAT                                                                                                              |
| Simula_Controle      | Numérico (2)             |                                                                       | Código do tipo do cenário:<br>1 – Cenário atual<br>2 – Cenário analisado<br>3.. N – Cenários de simulação do modelo de Suporte a Decisão |
| SimulaFatorConversao | Numérico (18.10)         | 1000/(SimulaOutRetRio*86400)<br>IF SimulaOUTRetRio> 0;<br>0 OTHERWISE | Transformação da carga de kg/dia para concentração de mg/l                                                                               |
| SimulaOutRioVazao    | Numérico (18.10)         |                                                                       | Média diária da vazão de saída do canal principal em m <sup>3</sup> /s                                                                   |
| SimulaOutORGN        | Numérico (18.10)         |                                                                       | Carga diária de Nitrogênio Orgânico na saída da sub-bacia em kg/dia                                                                      |
| SimulaOUTORGP        | Numérico (18.10)         |                                                                       | Carga diária de Fósforo Orgânico na saída da sub-bacia em kg/dia                                                                         |
| SimulaOUTNO3         | Numérico (18.10)         |                                                                       | Carga diária de Nitrato na saída da sub-bacia em kg/dia                                                                                  |
| SimulaOUTNH4         | Numérico (18.10)         |                                                                       | Carga diária de Amônia na saída da sub-bacia em kg/dia                                                                                   |
| SimulaOUTNO2         | Numérico (18.10)         |                                                                       | Carga diária de Nitrito na saída da sub-bacia em kg/dia                                                                                  |
| SimulaOUTMINP        | Numérico (18.10)         |                                                                       | Carga diária de Fósforo Mineral na saída da sub-bacia em kg/dia                                                                          |
| SimulaOUTCBOD        | Numérico (18.10)         |                                                                       | Carga diária de DBO na saída da sub-bacia em kg/dia                                                                                      |
| SimulaOUTDISOX       | Numérico (18.10)         |                                                                       | Carga diária de Oxigênio Dissolvido na saída da sub-bacia em kg/dia                                                                      |
| SimulaOutSed         | Numérico (18.10)         |                                                                       | Carga diária de Sedimentos na saída da sub-bacia em ton/dia                                                                              |

|                       |                     |                                                                     |                                                                     |
|-----------------------|---------------------|---------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| SimulaOutTotalNitro   | Numérico<br>(18.10) | SimulaOUTORGN +<br>SimulaOUTNO3 +<br>SimulaOUTNH4 +<br>SimulaOUTNO2 | Carga diária de Total de Nitrogênio na saída da sub-bacia em kg/dia |
| SimulaOUTTotalFosforo | Numérico<br>(18.10) | SimulaOUTORGP +<br>SimulaOUTMINP                                    | Carga diária de Total Fósforo na saída da sub-bacia em kg/dia       |
| SimulaFofTotalVazao   | Numérico<br>(18.10) | SimulaOUTTotalFosforo<br>*SimulaFatorConversao                      | Concentração de fósforo na saída da sub-bacia em mg/l               |
| SimulaDBOTotalVazao   | Numérico<br>(18.10) | SimulaOUTCBOD*SimulaFator<br>Conversao                              | Concentração de DBO na saída da sub-bacia em mg/l                   |
| SimulaNO3Vazao        | Numérico<br>(18.10) | SimulaOUTNO3*SimulaFatorCo<br>nversao                               | Concentração de Nitrato na saída da sub-bacia em mg/l               |
| SimulaNOrgaVazao      | Numérico<br>(18.10) | SimulaOUTORGN*SimulaFator<br>Conversao                              | Concentração de Nitrogênio Orgânico na saída da sub-bacia em mg/l   |
| SimulaTotalNitroVazao | Numérico<br>(18.10) | SimulaOutTotalNitro<br>*SimulaFatorConversao                        | Concentração de Nitrogênio na saída da sub-bacia em mg/l            |
| SimulaNH4Vazao        | Numérico<br>(18.10) | SimulaOUTNH4*SimulaFatorCo<br>nversao                               | Concentração de amônia na saída da sub-bacia em mg/l                |
| SimulaNO2Vazao        | Numérico<br>(18.10) | SimulaOUTNO2*SimulaFatorCo<br>nversao                               | Concentração de Nitrito na saída da sub-bacia em mg/l               |
| SimulaDISOXVazao      | Numérico<br>(18.10) | SimulaOUTDISOX*SimulaFator<br>Conversao                             | Concentração de Oxigênio Dissolvido na saída da sub-bacia em mg/l   |
| SimulaOutSedVazao     | Numérico<br>(18.10) | SimulaOutSed*SimulaFatorConv<br>ersao *1000                         | Concentração de Sedimentos na saída da sub-bacia em mg/l            |

### 3.3.2.10 Simulação das Sub-Bacias (Simulacao\_Subbacia)

Os resultados das simulações da fase terrestre da sub-bacia no SWAT são gravados no arquivo OUTPUT.SUB. Os dados dessa tabela são replicados nesta tabela do sistema (Quadro 15).

**QUADRO 15** - Dicionário de dados da tabela de simulação da fase terrestre da Sub-Bacia

| Nome da Tabela       | Simulacao_Subbacia  |                     |                                      |
|----------------------|---------------------|---------------------|--------------------------------------|
| Nome do Campo        | Tipo                | Fórmula             | Descrição                            |
| SimulaSubSeq         | Numérico<br>(6)     |                     | Identificador do registro na tabela. |
| SimulaSubSubBaciaNum | Numérico<br>(6)     |                     | Identificador da Sub-Bacia no SWAT   |
| SimulaSubAreaKm2     | Numérico<br>(18.10) |                     | Área da Sub-Bacia em Km <sup>2</sup> |
| SimulaSubAreaHa      | Numérico<br>(18.10) | SimulaSubAreaKm2/10 | Área da Sub-Bacia em ha              |

|                          |                     |                                                                         |                                                                                                                    |
|--------------------------|---------------------|-------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| SimulaSubSURFVazao       | Numérico<br>(18.10) |                                                                         | Média diária da vazão superficial de água em mm/ha                                                                 |
| SimulaSubSURFM3Vazao     | Numérico<br>(18.10) | $(\text{SimulaSubSURFVazao} * \text{SimulaSubAreaKm2}) / 86400$         | Conversão da vazão superficial para m³/s de toda área da sub-bacia                                                 |
| SimulaSubLanTotalVazao   | Numérico<br>(18.10) |                                                                         | Média diária do total de água que entra no canal principal vindo da sub-bacia em mm/ha                             |
| SimulaSubLanTotalM3Vazao | Numérico<br>(18.10) | $(\text{SimulaSubLanTotalVazao} * \text{SimulaSubAreaHa} * 10) / 86400$ | Conversão do total de água que entra no canal principal vindo da sub-bacia para m³/s de toda área da sub-bacia     |
| SimulaSubSedimentoHa     | Numérico<br>(18.10) |                                                                         | Média diária da carga de sedimentos que entram no canal principal em ton/ha                                        |
| SimulaSubSedimento       | Numérico<br>(18.10) | $\text{SimulaSubSedimentoHa} * \text{SimulaSubAreaHa} * 1000$           | Conversão do sedimento que entra no canal principal vindo da sub-bacia para ton de toda área da sub-bacia          |
| SimulaSubTotalNitroHa    | Numérico<br>(18.10) |                                                                         | Média diária da carga de nitrogênio total que entra no canal principal em kg/ha                                    |
| SimulaSubTotalNitrogenio | Numérico<br>(18.10) | $\text{SimulaSubTotalNitroHa} * \text{SimulaSubAreaHa} * 1000$          | Conversão do nitrogênio que entra no canal principal vindo da sub-bacia para kg de toda área da sub-bacia          |
| SimulaSubTotalFosfoHa    | Numérico<br>(18.10) |                                                                         | Média diária da carga de fósforo total que entra no canal principal em kg/ha                                       |
| SimulaSubTotalFosforo    | Numérico<br>(18.10) | $\text{SimulaSubTotalFosfoHa} * \text{SimulaSubAreaHa} * 1000$          | Conversão do fósforo que entra no canal principal vindo da sub-bacia para kg de toda área da sub-bacia             |
| SimulaSubDBOHa           | Numérico<br>(18.10) |                                                                         | Média diária da carga de DBO que entra no canal principal em kg/ha                                                 |
| SimulaSubDBO             | Numérico<br>(18.10) | $\text{SimulaSubDBOHa} * \text{SimulaSubAreaHa} * 1000$                 | Conversão do DBO que entra no canal principal vindo da sub-bacia para kg de toda área da sub-bacia                 |
| SimulaSubDIOXHa          | Numérico<br>(18.10) |                                                                         | Média diária da carga de Oxigênio Dissolvido que entra no canal principal em kg/ha                                 |
| SimulaSubDIOX            | Numérico<br>(18.10) | $\text{SimulaSubDIOXHa} * \text{SimulaSubAreaHa} * 1000$                | Conversão do Oxigênio Dissolvido que entra no canal principal vindo da sub-bacia para kg de toda área da sub-bacia |

### 3.3.2.11 Tabela Situação (Situacao)

Nesta tabela é armazenado o valor do índice de qualidade CCME-WQI (SUBBACIAQualValor). O campo SUBBACIAQualIndex faz a categorização do índice de qualidade nas 5 categorias listadas no método CCME-WQI, utilizando o valor armazenado em SUBBACIAQualValor. (Quadro 16)

**QUADRO 16** - Dicionário de Dados da Tabela Situação

|             |                 |  |                                    |
|-------------|-----------------|--|------------------------------------|
| SUBBACIACOD | Numérico<br>(6) |  | Identificador da Sub-Bacia no SWAT |
|-------------|-----------------|--|------------------------------------|

|                     |                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                               |
|---------------------|-----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| SubbaciaSituacaoSeq | Numérico<br>(6) |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | Identificador do registro na tabela.                                                                                          |
| SUBBACIAQualValor   | Numérico<br>(3) |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | Valor da análise de qualidade segundo o padrão CCME-WQI                                                                       |
| SUBBACIAQualIndex   | Numérico<br>(1) | 1 IF SUBBACIAQualValor >=95<br>and SUBBACIAQualValor <= 100;<br>2 IF SUBBACIAQualValor >=80<br>and SUBBACIAQualValor <= 94;<br>3 IF SUBBACIAQualValor >=65<br>and SUBBACIAQualValor <= 79;<br>4 IF SUBBACIAQualValor >=45<br>and SUBBACIAQualValor <= 64;<br>5 IF SUBBACIAQualValor >=0 and<br>SUBBACIAQualValor <= 44; | Categorização do valor da qualidade em 5 classes sendo:<br>1 – Excelente<br>2 - Bom<br>3 – Mediano<br>4 – Marginal<br>5 -Ruim |

### 3.3.2.12 Simulação de reservatórios (Simulacao\_Reservatorio)

No SWAT cada sub-bacia pode ter no máximo um reservatório. Se presente, é executado um módulo que representa os processos específicos desse tipo de corpo de água. Entradas e saídas deste módulo são armazenadas no arquivo OUTPUT.RSV importado para essa tabela que é uma cópia desse arquivo para ser usada pelo sistema (Quadro 17).

**QUADRO 17** - Dicionário de dados da tabela de simulações de reservatórios

| Nome da Tabela       | Simulacao_Reservatorio |         |                                                                               |
|----------------------|------------------------|---------|-------------------------------------------------------------------------------|
| Nome do Campo        | Tipo                   | Fórmula | Descrição                                                                     |
| SimulaResSeq         | Numérico<br>(6)        |         | Identificador do Registro na tabela                                           |
| SimulaResNum         | Numérico<br>(6)        |         | Identificador do Reservatório no SWAT                                         |
| SimulaResSubbaciaNum | Numérico<br>(6)        |         | Identificador da Sub-bacia no SWAT a qual o reservatório está atrelado.       |
| SimulaResVolume      | Numérico<br>(18.10)    |         | Volume de água no reservatório em m <sup>3</sup>                              |
| SimulaResINVazao     | Numérico<br>(18.10)    |         | Média diária de entrada de vazão no reservatório em m <sup>3</sup> /s         |
| SimulaResOUTVazao    | Numérico<br>(18.10)    |         | Média diária de saída de vazão no reservatório em m <sup>3</sup> /s           |
| SimulaResINOrgNitro  | Numérico<br>(18.10)    |         | Média diária de carga de entrada de Nitrogênio Orgânico do reservatório em kg |
| SimulaResOUTOrgNitro | Numérico<br>(18.10)    |         | Média diária de carga de saída de Nitrogênio Orgânico do reservatório em kg   |
| SimulaResINOrgFosfo  | Numérico<br>(18.10)    |         | Média diária de carga de entrada de Fósforo Orgânico do reservatório em kg    |

|                             |                     |                                                                                     |                                                                            |
|-----------------------------|---------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| SimulaResOUTOrgFosfo        | Numérico<br>(18.10) |                                                                                     | Média diária de carga de saída de Fósforo Orgânico do reservatório em kg   |
| SimulaResINNO3              | Numérico<br>(18.10) |                                                                                     | Média diária de carga de entrada de Nitrato do reservatório em kg          |
| SimulaResOUTNO3             | Numérico<br>(18.10) |                                                                                     | Média diária de carga de saída de Nitrato do reservatório em kg            |
| SimulaResINNO2              | Numérico<br>(18.10) |                                                                                     | Média diária de carga de entrada de Nitrito do reservatório em kg          |
| SimulaResOUTNO2             | Numérico<br>(18.10) |                                                                                     | Média diária de carga de saída de Nitrito do reservatório em kg            |
| SimulaResINNH4              | Numérico<br>(18.10) |                                                                                     | Média diária de carga de entrada de Amônia do reservatório em kg           |
| SimulaResOUTNH4             | Numérico<br>(18.10) |                                                                                     | Média diária de carga de saída de Amônia do reservatório em kg             |
| SimulaResINMinFosf          | Numérico<br>(18.10) |                                                                                     | Média diária de carga de entrada de Fósforo Mineral do reservatório em kg  |
| SimulaResOUTMinFosf         | Numérico<br>(18.10) |                                                                                     | Média diária de carga de saída de Fósforo Mineral do reservatório em kg    |
| SimulaResINDBOCarga         | Numérico<br>(18.10) |                                                                                     | Média diária de carga de entrada de DBO do reservatório em kg              |
| SimulaResOUTDBOCarga        | Numérico<br>(18.10) |                                                                                     | Média diária de carga de saída de DBO do reservatório em kg                |
| SimulaResINODCarga          | Numérico<br>(18.10) |                                                                                     | Média diária de carga de entrada de OD do reservatório em kg               |
| SimulaResOUTODCarga         | Numérico<br>(18.10) |                                                                                     | Média diária de carga de saída de DO do reservatório em kg                 |
| SimulaResINSedimentos       | Numérico<br>(18.10) |                                                                                     | Média diária de carga de entrada de sedimentos do reservatório em ton      |
| SimulaResOUTSedimentos      | Numérico<br>(18.10) |                                                                                     | Média diária de carga de saída de sedimentos do reservatório em ton        |
| SimulaResINTotalNitrogenio  | Numérico<br>(18.10) | SimulaResINNH4 +<br>SimulaResINNO2 +<br>SimulaResINNO3 +<br>SimulaResINOrgNitro     | Média diária de carga de entrada de Nitrogênio Total do reservatório em kg |
| SimulaResOUTTotalNitrogenio | Numérico<br>(18.10) | SimulaResOUTNH4 +<br>SimulaResOUTNO2 +<br>SimulaResOUTNO3 +<br>SimulaResOUTOrgNitro | Média diária de carga de saída de Nitrogênio Total do reservatório em kg   |
| SimulaResINTotalFosforo     | Numérico<br>(18.10) | SimulaResINMinFosf +<br>SimulaResINOrgFosfo                                         | Média diária de carga de entrada de Fósforo Total do reservatório em kg    |
| SimulaResOUTTotalFosforo    | Numérico<br>(18.10) | SimulaResOUTMinFosf +<br>SimulaResOUTOrgFosfo                                       | Média diária de carga de saída de Fósforo Total reservatório do em kg      |

### 3.4 PROCESSOS IMPLEMENTADOS NO SWAT\_GESTAO

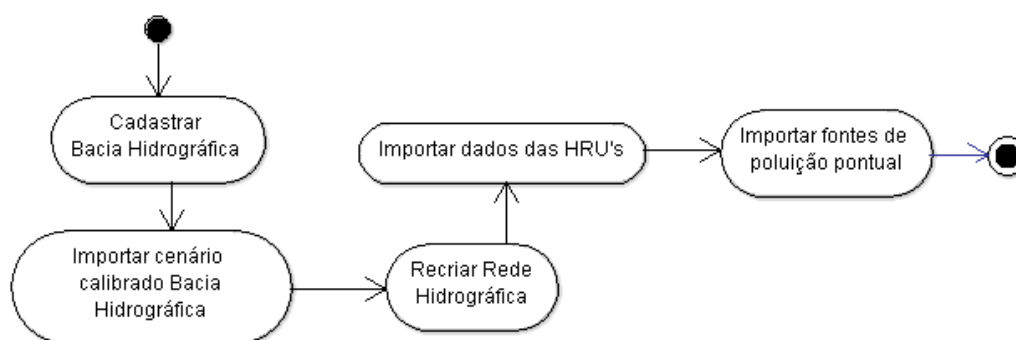
Quatro processos principais podem ser acionados pelo gestor na utilização do sistema:

- [Cadastramento de uma Bacia Hidrográfica \(3.4.1\)](#)
- [Gerar cenário base e cenário atual \(3.4.2\)](#)
- [Simular a inserção de uma fonte de poluição pontual \(3.4.3\)](#)
- [Executar modelo de Suporte à Decisão \(3.4.4\)](#)

Todos os outros processos existentes no sistema SWAT\_Gestão estão contidos nesses quatro principais processos que são detalhados em seguida.

### 3.4.1 Cadastramento de uma Bacia Hidrográfica

O primeiro evento necessário para iniciar o uso do SWAT\_Gestão é cadastrar uma bacia hidrográfica no sistema. Para esse cadastro precisa de um projeto original do SWAT, representando o Cenário Atual da bacia hidrográfica. A partir dos arquivos de entrada desse projeto, o sistema reconstrói a topologia da rede hidrográfica e suas respectivas sub-bacias, inserindo dados de efluentes e captações além de importa as entidades geométricas das sub-bacias e canais para seu gerenciamento pela API do *Google Maps* (Figura 9).



**FIGURA 9-** Fluxograma para cadastro de uma bacia hidrográfica.

#### 3.4.1.1 Cadastrar Bacia Hidrográfica

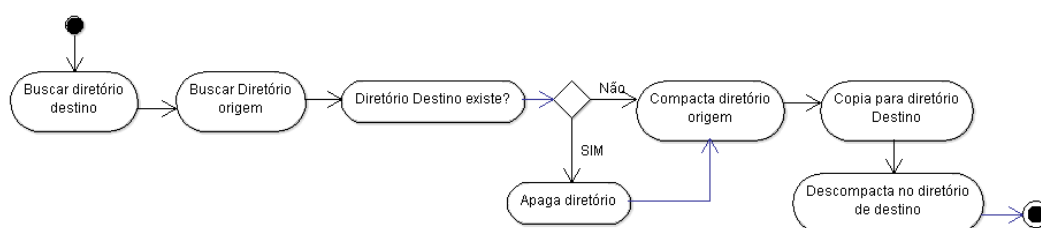
Essa atividade envolve o cadastramento de algumas informações importantes da Bacia Hidrográfica a partir de uma interface simples (Figura 10).

**FIGURA 10**-Interface gráfica para cadastro de uma Bacia Hidrográfica.

Somente duas informações são necessárias: O nome da sub-bacia e o caminho onde está localizado o projeto SWAT original da bacia hidrográfica. Não havendo erro após a confirmação, o sistema procederá a importação do Cenário Atual para a pasta no sistema dedicada ao SWAT.

#### **3.4.1.2 Importar arquivos do projeto SWAT original**

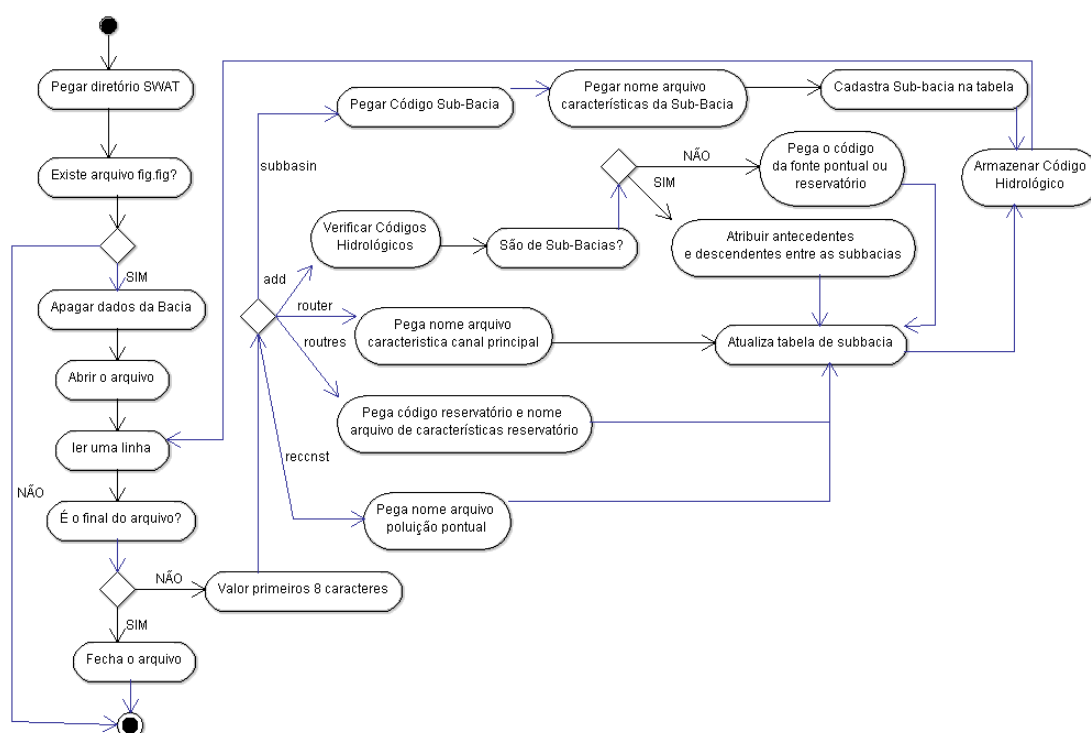
Esse processo copia os arquivos de entrada do projeto original do SWAT para a pasta pré-definida do sistema. O caminho desses arquivos foi inserido pelo gestor na atividade anterior. Com o caminho informado, o sistema procede com a compactação do conteúdo da pasta indicada, usando o *User Control ZipTools* para facilitar o transporte. Após a compactação o arquivo resultante é copiado para dentro da pasta contida no caminho informado nas configurações gerais do sistema e é descompactado (Figura 11).



**FIGURA 11**- Processos para importação de um projeto original do SWAT.

### 3.4.1.3 Recriar Rede Hidrográfica

Para replicar a topologia da Bacia Hidrográfica no sistema utiliza-se o conteúdo do arquivo fig.fig. Este arquivo contém a sequência de comandos que representam cada uma das etapas que o modelo SWAT utiliza para realizar uma simulação. Inicia-se com a simulação da fase terrestre e segue com a representação dos processos hidrológicos e biogeoquímicos no canal principal de cada sub-bacia. Os resultados são utilizados em seguida como entradas na próxima sub-bacia a jusante e assim em diante conforme mostra a figura 12.



**FIGURA 12-** Procedimento para criação da topologia da bacia hidrográfica

O processo inicializa, verificando se no diretório configurado para ter o projeto original do SWAT existe um arquivo chamado fig.fig. Caso não exista então é apresentado um erro e o processo é encerrado. Caso exista, esse arquivo é aberto e analisado linha por linha tendo uma ação diferente para cada comando:

- Se encontrado o comando *subbasin* é captado o código da sub-bacia e o nome do arquivo no SWAT que contém as informações de caracterização

dessa sub-bacia e criado um registro na tabela de sub-bacia com esses valores

- Se é encontrado o comando *route* é captado o código da sub-bacia a qual o canal principal pertence e o nome do arquivo que contém as informações tanto de caracterização do canal principal e suas características simuladas (vazão, qualidade de água) e atualizado o registro na tabela de sub-bacia com essas informações.
- Se é encontrado o comando *routres* é captado o código do reservatório, o nome do arquivo com as características do reservatório assim como o de qualidade da água dele e armazena para saber a qual sub-bacia esse reservatório estará atrelado.
- Se é encontrado o comando *reccnst* é captado o código da fonte de poluição pontual e o nome do arquivo com seus valores de lançamento e armazena para saber a qual sub-bacia essa fonte pertence.
- Se é encontrado o comando *add* é captado os dois códigos de armazenamento nas colunas 3 e 4. Caso esse comando seja antecedido de um comando *route* quer dizer que duas sub-bacias estão sendo unidas para desaguar em uma terceira. Deve encontrar a sub-bacia de deságue e atualizar seu registro informando as sub-bacias a montante dela. Nessas sub-bacias a montante também é preciso atualizar o registro com o código da sub-bacia de deságue. Caso esse comando não seja antecedido de um comando *route* então a sub-bacia é atualizada com os dados da fonte de poluição pontual e/ou do reservatório da sub-bacia.

Esse processo cadastra todas as sub-bacias existentes na bacia hidrográfica e mantendo a sua ordem topológica.

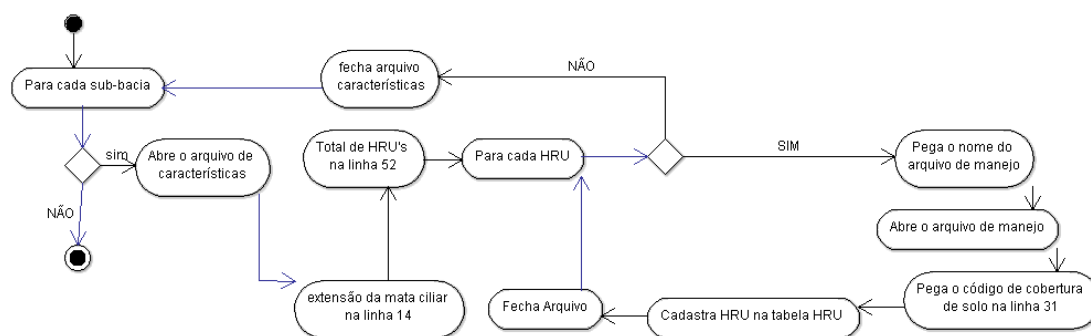
#### **3.4.1.4 Importar fontes de poluição pontuais e captação de água**

Depois de recriar a estrutura topológica da bacia hidrográfica, esse procedimento faz uma busca na tabela de sub-bacia, identificando todas as sub-bacias que possuem fontes de poluição pontuais e/ou de captação de água no seu canal principal. Em caso positivo, o sistema SWAT\_Gestão busca os nomes dos arquivos de consumo de água e/ou arquivo de fonte de poluição pontual cadastrada. O sistema

lê esses arquivos e retira todas as informações de lançamento ali constantes armazenando-as na tabela de FONTE\_PONTUAL informando a qual sub-bacia pertencem esses lançamentos ou dados de captação.

### 3.4.1.5 Importar dados das HRUs

No modelo SWAT a fase terrestre de uma sub-bacia é dividida em sub-regiões com características semelhantes de solo, UOT e declividade chamados de *HRU*. Uma sub-bacia pode ter uma ou mais *HRUs*. Na implementação somente duas informações são captadas: o UOT e a largura da faixa da mata ciliar. Essas informações são contidas no arquivo de gerenciamento de cada *HRU* e o nome desse arquivo é armazenado dentro do arquivo das características da sub-bacia (\*.sub) no qual o nome foi informado no arquivo fig.fig. (Figura 13)



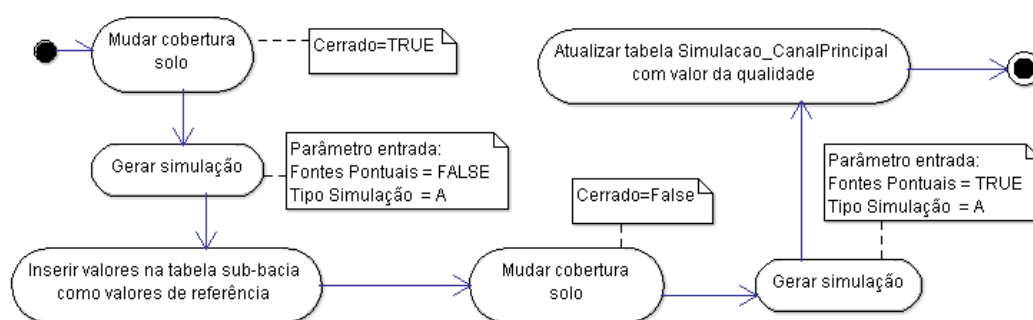
**FIGURA 13-Importação de dados das HRUs**

### 3.4.2 Gerar os Cenário de base e Cenário atual

O Sistema proposto necessita gerar um Cenário Base da bacia hidrográfica para servir de comparação frente os impactos que aconteceram na bacia ao longo do tempo. Na atual implementação, o Cenário Base elimina os atuais usos de agropecuária, porém mantém áreas com UOT de ocupação urbana atual. Não inclui captações ou lançamentos pontuais. A partir do subprocesso [3.4.2.1](#) com o parâmetro de entrada igual a *TRUE*, qualquer uso agropecuário nas *HRUs* da bacia hidrográfica é alterado para cobertura Cerrado, vegetação natural na maior parte das bacias na região do estudo de caso (item 4). Após esta mudança é chamado o subprocesso [3.4.2.2](#) que gera uma simulação com essas configurações passando como parâmetro de entrada o valor *FALSE* para a variável Fontes Pontuais e o valor A para a variável

Tipo Simulação. Os valores de referência usados para calcular o índice de qualidade CCME-WQI são adquiridos nessa etapa do processo a partir dos valores medianos gerados na simulação do SWAT de cada item avaliado em cada sub-bacia existente.

Com o cenário base gerado é preciso gerar o Cenário Atual da Bacia Hidrográfica que corresponde com a simulação atual do projeto SWAT de entrada. Para isso o subprocesso [3.4.2.1](#) é chamado novamente, desta vez com o parâmetro de entrada como *FALSE*. Após o subprocesso [3.4.2.2](#) também é novamente chamado agora com a variável Fonte Pontual igual a *TRUE* e Tipo Simulação igual a “A” como parâmetros de entrada. Os resultados são armazenados, atualizando a tabela *Simulacao\_CanalPrincipal*. (Figura 14)



**FIGURA 14-** Processos para a geração do Cenário Base e do Cenário Atual.

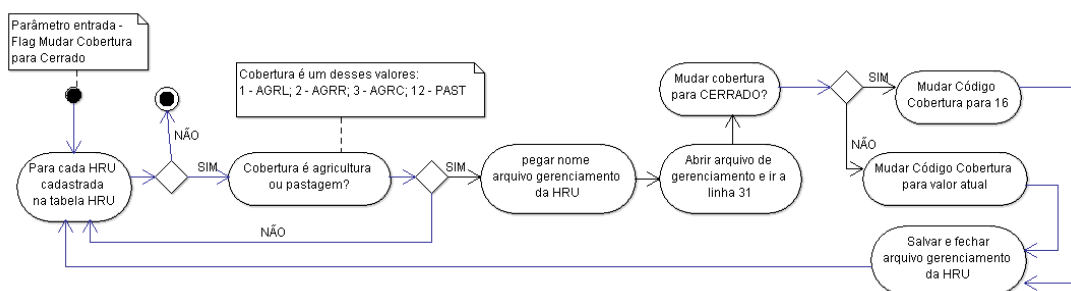
### 3.4.2.1 Mudar UOT

Esse processo visa simular a alteração da UOT em uma ou várias *HRUs* para analisar os impactos dessas alterações a partir de uma nova execução do SWAT.

Durante o processo [3.4.1](#) um dos subprocessos importa os dados das *HRUs* e lê as informações sobre a UOT de cada *HRU*, utilizando os arquivos de manejo do uso do solo das *HRUs* (\*.mgt). Essa informação é armazenada na tabela *HRU*.

Esse processo, se chamado, recebe uma variável do tipo booleana como parâmetro. Quando essa variável tiver o valor igual a *TRUE*, o sistema percorre a tabela *HRU* para encontrar *HRUs* com coberturas de solo do tipo agricultura (Códigos 1, 2 e 3) e pastagem (Código 12) de acordo com as classes disponíveis pelo Banco de Dados *master* do SWAT. Para todas as *HRUs* encontradas nessa situação

o sistema altera o respectivo arquivo de gerenciamento de solo (\*.mgt) para a cobertura natural predominante original da região (Código 16). Caso o valor da variável for *FALSE* então o sistema utiliza o respectivo arquivo de gerenciamento de solo (\*.mgt), mantendo a cobertura de solo na tabela *HRU* do projeto SWAT original (Figura 15).



**FIGURA 15-** Detalhamento do processo de mudança de cobertura de solo.

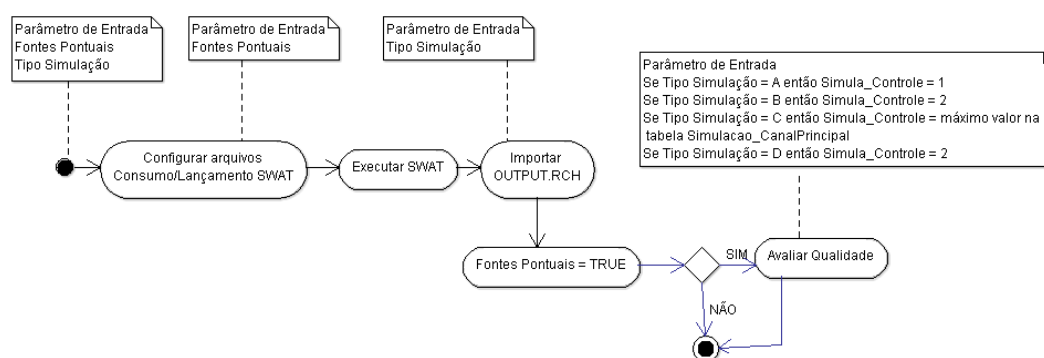
### 3.4.2.2 Gerar Simulação

Esse processo prepara as simulações de cenários para sua execução no SWAT. Recebe como parâmetro de entrada uma variável booleana para indicar se devem ser inseridos nos arquivos de entrada as fontes de poluição pontual e de captação. Uma variável indica o tipo de simulação:

1. Tipo Simulação = A - Simulação de Cenário Atual da bacia hidrográfica
2. Tipo Simulação = B - Simulação de inclusão de uma nova fonte de poluição pontual (Cenário Analisado)
3. Tipo Simulação = C - Simulação de suporte à decisão (Cenário Alterado)
4. Tipo Simulação = D - Simulação a alteração percentual de aumento ou diminuição na carga de poluição lançada pela fonte de poluição pontual e difusa já existente em uma sub-bacia (Cenário Analisado).

Primeiramente é chamado o subprocesso [3.4.2.3](#), passando como parâmetro de entrada a variável booleana que informa se é para incluir ou não as fontes de poluição pontual. Esse subprocesso prepara os arquivos de entrada para o SWAT. Em seguida o modelo SWAT é executado, chamando o seu executável como um comando do tipo *shell*. Após a execução do SWAT é chamado o processo [3.4.2.4](#)

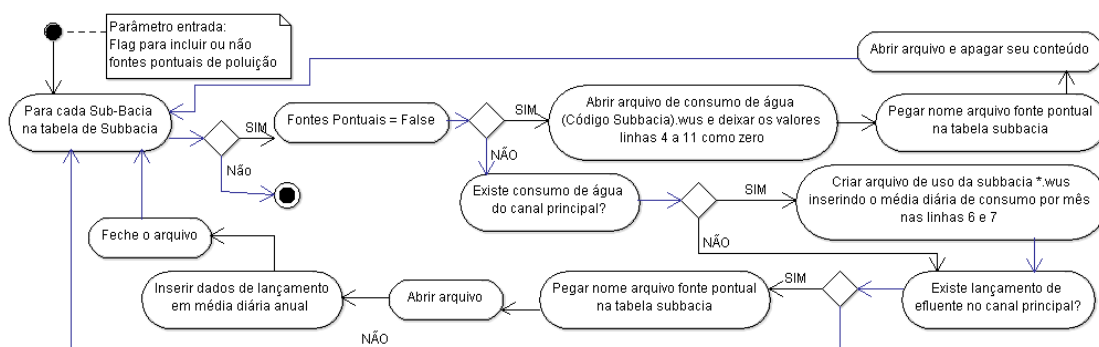
para importar os resultados calculados pelo SWAT no Banco de Dados do SWAT\_Gestão. Esse subprocesso recebe como parâmetro o tipo de simulação que foi gerada. Ao final deste subprocesso é chamado o subprocesso [3.4.2.5](#) para avaliar a qualidade da água do acordo com o CCME-WQI da simulação a partir da comparação com o cenário base. Esse subprocesso só não é chamado se a variável booleana de fontes pontuais for igual a *FALSE* indicando que essa simulação é justamente a do cenário base usada por esse subprocesso como referência (Figura 16).



**FIGURA 16-** Detalhamento do processo de gerar simulação.

### 3.4.2.3 Configurar arquivos de captações/lançamentos do SWAT

Esse processo altera os arquivos de captação (\*.wus) e os arquivos de lançamento de efluentes (fontes de poluição pontuais) das sub-bacias. Recebe como parâmetro uma variável do tipo booleana que indica se é preciso inserir as informações de consumo/lançamento ou não. Caso essa variável tenha o valor de *FALSE*, o sistema zera todos os arquivos de consumo (\*.wus) e/ou os arquivos das fontes de poluição pontuais. Caso seu valor seja *TRUE* então o sistema altera esses arquivos com os valores contidos na tabela FONTE\_PONTUAL de cada sub-bacia. (Figura 17)



**FIGURA 17-** Detalhamento do processo de configurar arquivos de captação/lançamento do SWAT.

#### 3.4.2.4 Importar Output.rch

O OUTPUT.RCH é principal saída do SWAT analisada pelo SWAT\_Gestão. Contém os valores simulados de vazão e da qualidade de água nas entradas e saídas do canal principal de cada sub-bacia. O sistema importa esses valores para a tabela de Simulacao\_CanalPrincipal para realizar comparações entre os cenários. Cada sub-bacia pode ter mais de um registro nessa tabela, representando cada uma das simulações a serem analisadas. O campo que estabelece esse controle é o Simula\_controle que pode assumir um dos seguintes valores:

- Simula\_controle = 1 - Representa a simulação do Cenário Atual da sub-bacia
- Simula\_controle = 2 - Representa a simulação com a inclusão de uma determinada fonte de poluição pontual ou alteração percentual das cargas de poluição de uma fonte de poluição pontual existente (Cenário Analisado).
- Simula\_controle > 2 - Representa simulações do sistema de suporte à decisão onde cada registro é uma simulação proposta pelo sistema a ser escolhida pelo gestor (Cenário Alterado).

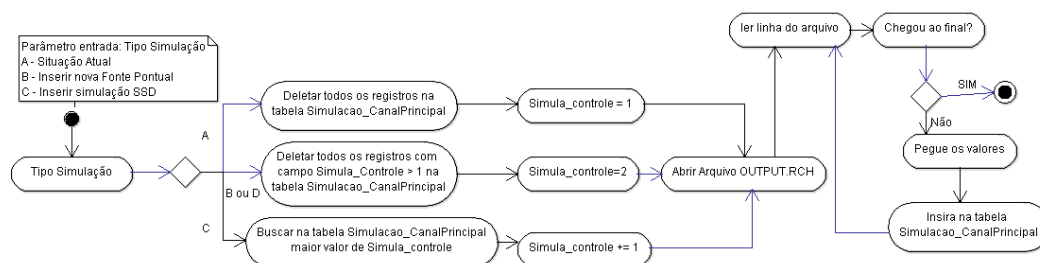
Esse processo recebe como parâmetro uma variável que pode receber três (03) diferentes valores representando cada um dos tipos de registros armazenados na tabela Simulacao\_CanalPrincipal.

Se a variável recebida for igual a 'A', é gravado o Cenário Atual do canal principal e o sistema deleta todos os registros da tabela Simulacao\_CanalPrincipal. Depois atribui ao campo Simula\_controle o valor 1, abre o arquivo OUTPUT.RCH, retira os seus valores e os insere na tabela de Simulacao\_CanalPrincipal.

Se a variável recebida for igual a 'B' é gravado um cenário com a inclusão de uma nova fonte de poluição pontual e o sistema deleta todos os registros da tabela Simulacao\_CanalPrincipal que não sejam os do Cenário Atual (Simula\_controle=1). Depois atribui ao campo Simula\_controle o valor 2, abre o arquivo OUTPUT.RCH, retira os seus valores e os insere na tabela de Simulacao\_CanalPrincipal.

Se a variável recebida for igual a 'C' então é gravado um cenário proposto (Cenário Alterado) pelo módulo de suporte à decisão. Nesse caso o sistema conta o número de registros existentes na tabela Simulacao\_CanalPrincipal para a sub-bacia, incrementa esse valor em 1 e atribui o resultado ao campo Simula\_controle. Depois abre o arquivo OUTPUT.RCH, retira os seus valores e os insere na tabela de Simulacao\_CanalPrincipal.

Se a variável recebida for igual a 'D' é gravado um cenário com a alteração percentual das cargas de poluição de uma fonte de poluição pontual e/ou difusa existente e o sistema deleta todos os registros da tabela Simulacao\_CanalPrincipal que não sejam os do Cenário Atual (Simula\_controle=1). Depois atribui ao campo Simula\_controle o valor 2, abre o arquivo OUTPUT.RCH, retira os seus valores e os insere na tabela de Simulacao\_CanalPrincipal. (Figura 18)



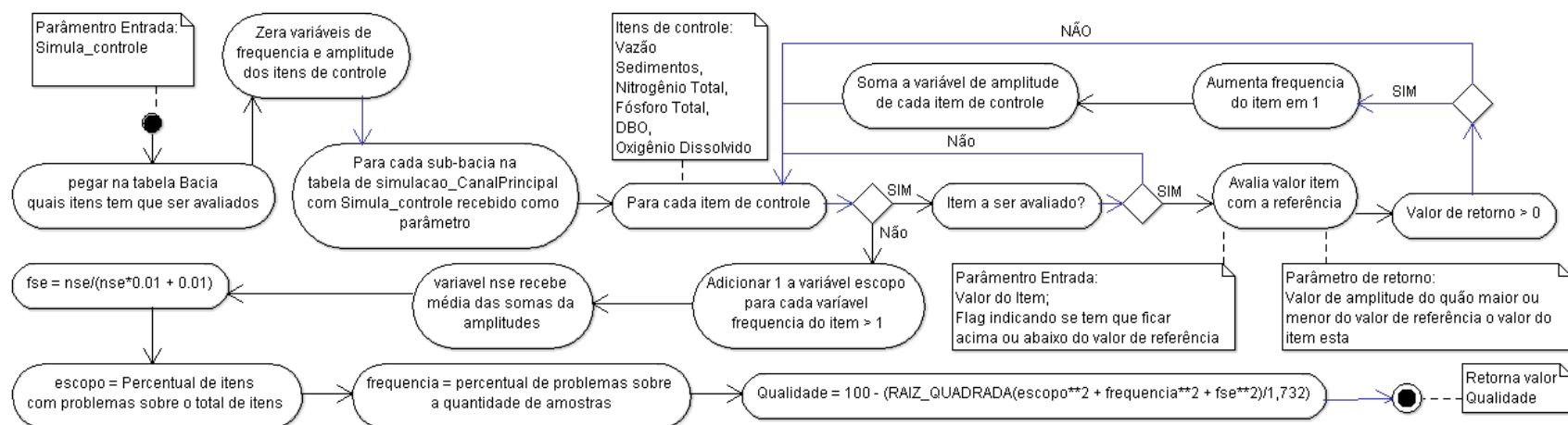
**FIGURA 18-** Detalhamento do processo de Importar OUTPUT.RCH.

#### **3.4.2.5 Avaliar a Qualidade pelo CCME-WQI**

Para avaliar a qualidade de água no canal da sub-bacia para uma determinada simulação, o sistema utiliza o método CCME-WQI (Wright et al. 1999). Esse método permite analisar uma lista flexível de parâmetros de qualidade de água (na sua proposta original d) em 3 aspectos: escopo, frequência e amplitude e gera no final um número de 0 a 100 correspondente a qualidade dessa simulação frente a uma referência. Entende-se que, por sua adimensionalidade, poderia incluir outros itens como p.ex. vazões estatísticas ou métricas de organismos aquáticos etc.). No SWAT\_Gestão, os valores de referência são provenientes de uma simulação SWAT do Cenário Base, sem lançamentos de efluentes, captações e com o UOT de áreas agrícolas e de pecuária alteradas para Cerrado.

O processo recebe o valor de `simula_controle` da tabela `Simulacao_CanalPrincipal`, buscando os valores de saída da simulação desejada a ser comparada para cada sub-bacia onde cada componente do Index avaliado é comparado ao correspondente no cenário base. Se o valor desse item for diferente do correspondente no cenário base em um percentual acima do limite estabelecido na tabela de Bacia então o sistema computa esse valor segundo a metodologia CCME-WQI. Ao final desse processo é gerado o valor do índice CCME-WQI que é retornado como saída (Figura 19)

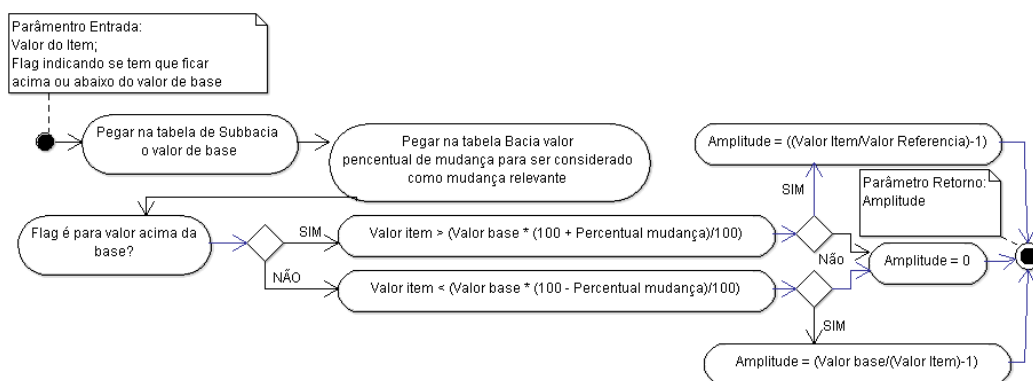




**FIGURA 19-**Fluxograma descrevendo o processo de Avaliar a Qualidade.

### 3.4.2.6 Avaliar componente do index com o valor da referência

Esse processo é chamado pelo processo [3.4.2.5](#) para efetuar a comparação entre o valor CCME-WQI do Cenário Atual com o valor correspondente do Cenário Base. Recebe como parâmetro o valor do componente a ser avaliado e uma flag indicando que ele não pode ser maior ou menor do que o valor de referência. É buscado na tabela de BACIA o percentual de alteração além do valor de referência aceitável. Caso o valor do componente esteja fora do percentual aceitável é calculado o desvio positivo ou negativo desse componente do valor de referência. Esse desvio, chamado de "Amplitude" é retornado como parâmetro de saída. Caso o desvio do valor do componente esteja dentro do percentual aceitável então é retornado um valor de ZERO (Figura 20).



**FIGURA 20-** Detalhamento do processo de Avaliar valor do componente do CCME-WQI com o valor de base.

### 3.4.3 Incluir uma nova fonte de poluição pontual

O sistema permite a inclusão de uma nova captação e/ou lançamento na bacia cadastrada. O gestor somente deve informar o número da respectiva sub-bacia, as vazões de retirada e as cargas diárias lançadas dos parâmetros de qualidade de água analisados pelo CCME-WQI (Figura 21).

Dados do Usuário

SubBacia N.

0

Nome

Vazão retirada do rio (Média diária em m3/dia)

0,00000000

Vazão efluente (Média diária em m3/dia)

0,00000000

Composição do Efluente ( Kg/dia)

Nitrogênio Orgânico

0,000000

Nitrato

0,000000

Amônia

0,000000

Nitrito

0,000000

Fósforo Orgânico

0,000000

Fósforo Mineral

0,000000

DBO

0,000000

Confirmar

Fechar

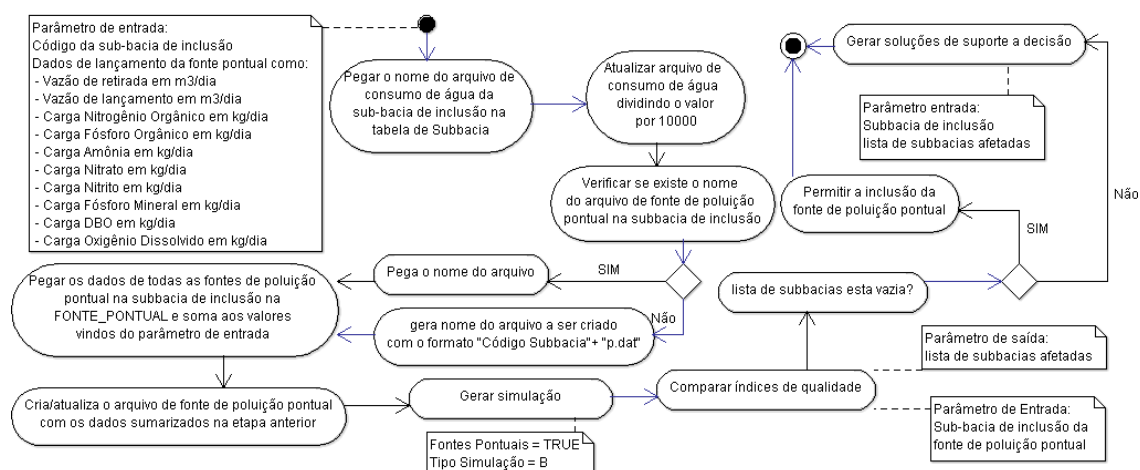
**FIGURA 21**-Tela de cadastro de uma fonte de poluição pontual.

Após a confirmação, o sistema busca para sub-bacia selecionada o nome do arquivo de captação de água (\*.wus) e insere o valor de retirada, obedecendo as transformações de unidades utilizadas pelo SWAT.

Em seguida é verificado se na sub-bacia existe um arquivo de fonte de poluição pontual. Caso exista esse arquivo, ele é aberto e os dados do lançamento são somados aos valores já cadastrados. Caso não exista, o arquivo é criado incluindo esses valores.

Após alterar os arquivos de captação e lançamento da sub-bacia escolhida, o sistema gera uma nova simulação para poder avaliar o impacto da captação e/ou lançamento. É chamado o subprocesso [3.4.2.2](#) para realizar a simulação no SWAT desse novo cenário, passando como parâmetro de entrada a variável Fonte Pontual igual a *TRUE* e a variável Tipo Simulação igual a B.

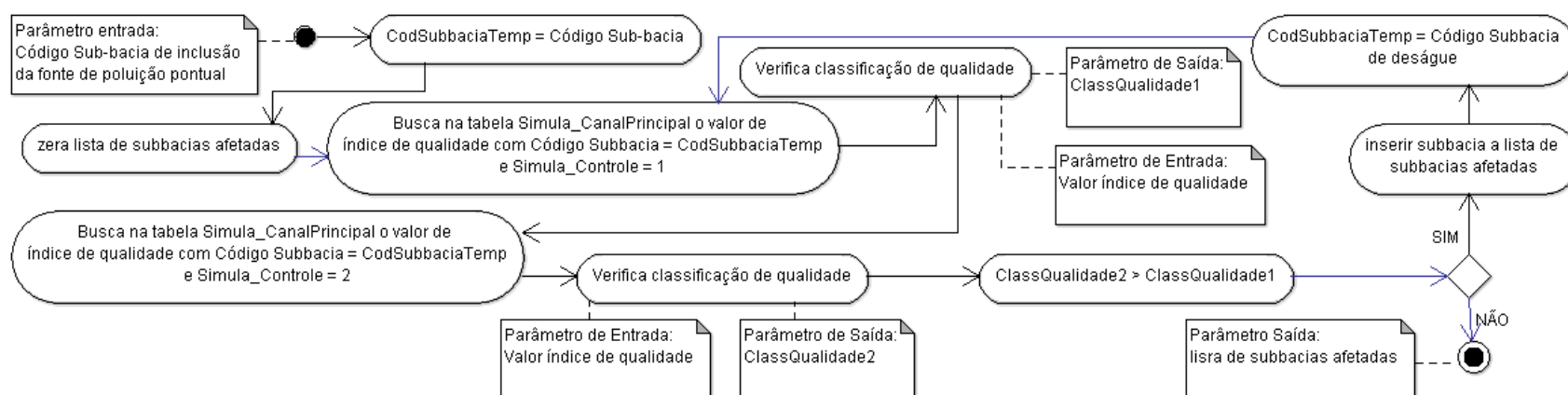
O índice de qualidade desta simulação é comparado com o valor do Cenário Atual a partir do subprocesso 3.4.3.1. Caso nenhuma sub-bacia seja afetada negativamente pela inclusão, então o sistema permite a inclusão. Caso uma ou mais sub-bacias sejam afetadas negativamente, o sistema sugere a execução do módulo de suporte à decisão (Figura 22).



**FIGURA 22-** Detalhamento do processo da inclusão de uma nova fonte de poluição pontual.

### 3.4.3.1 Comparar índices CCME-WQI

A simulação gerada pela tentativa de inclusão de uma nova fonte de poluição pontual gera um valor de CCME-WQI através do subprocesso 3.4.2.5. Esse processo compara esse índice com o índice de qualidade do Cenário Atual. A inclusão possui efeitos na própria sub-bacia e possivelmente também em sub-bacias a jusante. Assim o subprocesso compara os valores de CCME-WQI da sub-bacia de inclusão e em seguida para as próximas sub-bacias a jusante até encontrar uma sub-bacia que não tenha mais diferença entre os índices de qualidade dos dois cenários. Para que a deterioração seja considerada significativa os índices de qualidade do Cenário Atual e do Cenário Avaliado são categorizados no processo 3.4.3.2 em 5 níveis. Se o índice de qualidade categorizado da sub-bacia na simulação analisada for menor do que o índice de qualidade categorizado da mesma sub-bacia no cenário atual então é porque a deterioração é considerada relevante e o código dessa sub-bacia é incluído na lista de sub-bacias afetadas. Além disso, o sistema busca na tabela de SUBBACIA qual é a sub-bacia a montante a essa avaliada e repete o processo com ela (Figura 23).

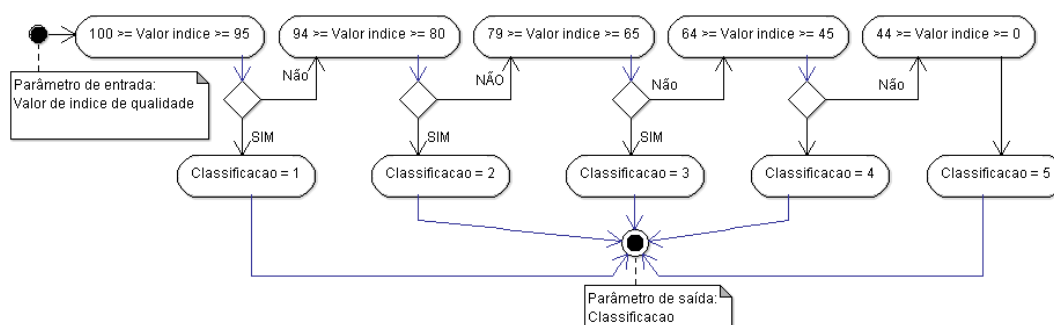


**FIGURA 23-**Fluxograma descrevendo o processo Comparar índices de qualidade.

O processo finaliza quando chega a uma sub-bacia a jusante que não possui mudanças significativas no seu índice de qualidade mostrando que o efeito da inclusão da captação/lançamento foi absorvido.

### 3.4.3.2 Verifica classificação do índice CCME-WQI

O método CCME-WQI gera como resultado um valor de 0 a 100 usado nesse sistema como índice de qualidade de uma sub-bacia em uma determinada simulação. Esse processo categoriza o valor do índice de qualidade em 5 faixas distintas e retorna o valor categórico do índice (Figura 24).



**FIGURA 24-** Detalhamento do processo Verifica classificação do índice CCME-WQI.

### 3.4.4 Módulo de Suporte à Decisão

O módulo de suporte à decisão é chamado sempre que a inserção de uma nova fonte de poluição pontual é simulada e se o resultado gerado pelo SWAT sugere que uma ou mais sub-bacias tiveram o índice de qualidade deteriorado significativamente, segundo as regras do sistema, em relação ao Cenário Atual.

O objetivo desse módulo é buscar soluções dentro da bacia hidrográfica que permitam a alteração desejada com o menor impacto possível.

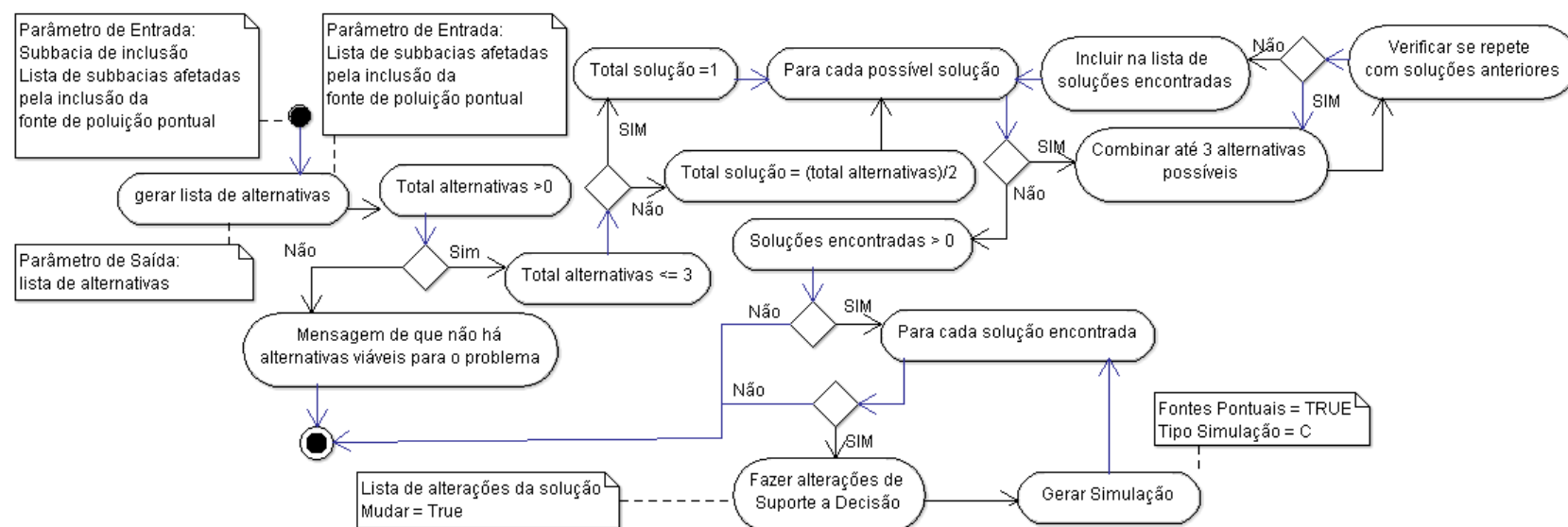
O módulo recebe como parâmetro de entrada a lista de sub-bacias com impactos superiores aos limites aceitos após a simulação de uma alteração, com destaque ao código da sub-bacia com maior variação de impacto. O subprocesso

[3.4.4.1](#) é chamado. Esse subprocesso tem a função de buscar as alternativas utilizadas pelo SSD não só nas sub-bacias contidas na lista recebida como parâmetro como também nas sub-bacias a montante. O retorno desse subprocesso é uma lista de alternativas que podem ser utilizadas pelo módulo de SSD para cumprir a sua função.

Com essa lista, o módulo procura agrupar essas alternativas em grupos reunindo até 3 alternativas diferentes, verificando sempre se não há repetições de alternativas entre os grupos criados.

Cada grupo criado por esse módulo se torna um Cenário Alternativo e, para a sua simulação, é chamado o subprocesso [3.4.4.2](#) com o parâmetro de entrada como *TRUE* para configurar nos arquivos de entrada os dados referentes a esse cenário. Após essa etapa o módulo chama o subprocesso [3.4.2.2](#) para criar uma simulação no SWAT com essas alterações passando como parâmetro de entrada o valor *TRUE* para a variável Fonte Pontual e o valor C para a variável Tipo de Simulação.

Com a realização de todas as simulações dos grupos gerados pelo módulo de suporte à decisão o processo é finalizado e os resultados são apresentados ao gestor (Figura 25).



**FIGURA 25-** Detalhamento do processo de Módulo de Suporte à Decisão.

#### **3.4.4.1 Gerar lista de alternativas**

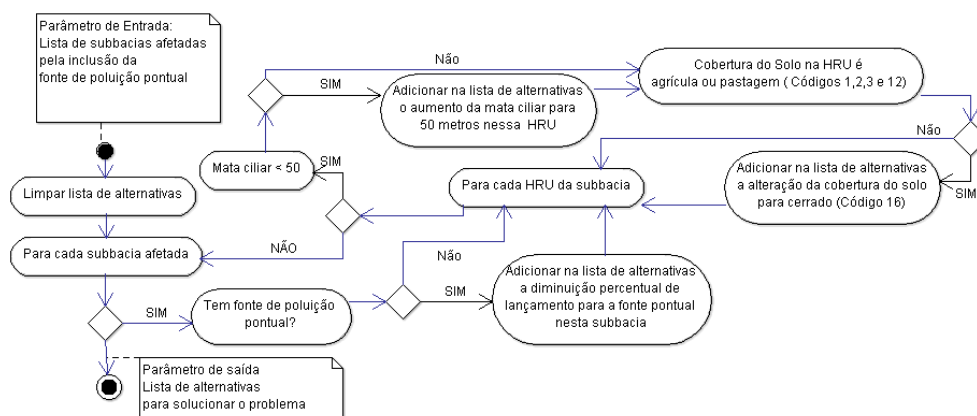
Esse processo é responsável por gerar uma lista ordenada de alternativas possíveis de alterações que podem ser feitas nas sub-bacias afetadas, permitindo a inclusão de uma nova fonte de poluição pontual, minimizando impactos na qualidade da sub-bacia frente ao Cenário Atual.

As possíveis alterações existentes no sistema atualmente são as seguintes:

- Aumento da faixa de mata ciliar para 50 m.
- Alteração da cobertura vegetal para cerrado quando ela for do tipo de agricultura ou pastagem
- Diminuição de 10% das cargas de lançamento de poluentes de fontes de poluição pontuais existentes nas sub-bacias afetadas.

Para cada sub-bacia contida na lista de sub-bacias afetadas, o sistema analisa as suas *HRUs* e se ela tem mata ciliar com menos de 50 m o sistema inclui a alternativa de aumentar para 50 m a faixa da mata ciliar dessa *HRU*. Depois é analisado qual é a cobertura do solo dessa *HRU* e se ela for do tipo agricultura (códigos 1,2 e 3) ou pastagem (código 12) e o sistema acrescenta a alternativa de mudar essa cobertura para cerrado (código 16). Por fim é verificado se essa sub-bacia possui fonte de poluição pontual e se sim também é acrescentada essa possibilidade na lista de alternativas.

Ao final desse processo é retornado a lista de alternativas possíveis a serem usadas pelo módulo de suporte à decisão (Figura 26).



**FIGURA 26**-Fluxograma descrevendo o processo de Gerar Lista de Alternativas.

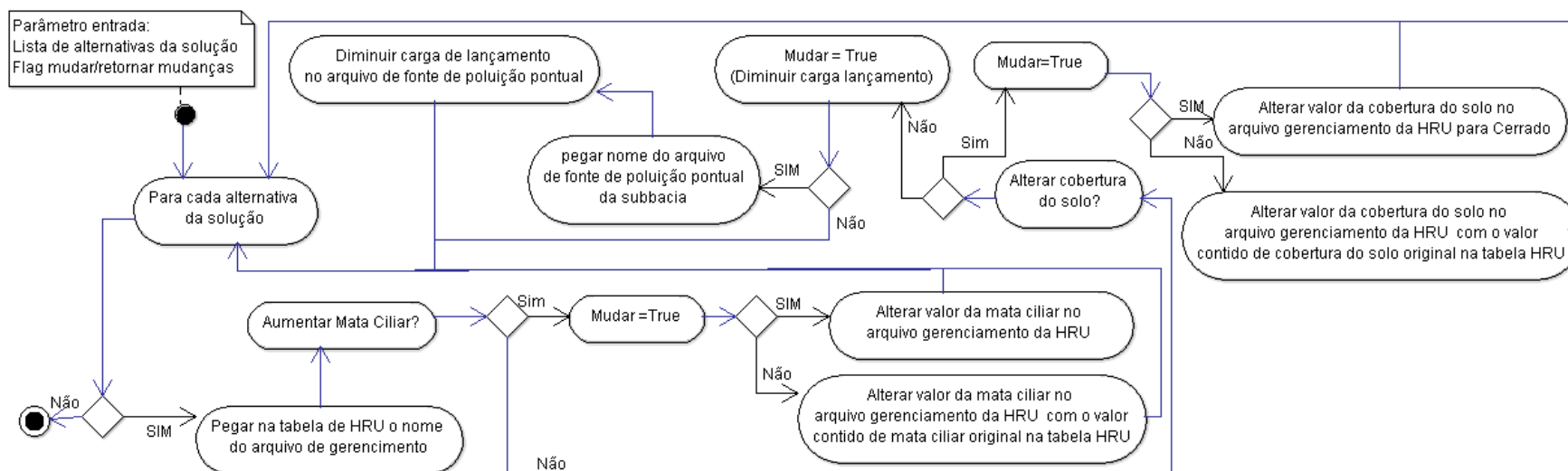
### 3.4.4.2 Fazer alterações de Suporte à Decisão

Este processo tem por objetivo realizar as mudanças propostas pelo módulo de Suporte à Decisão nos arquivos de entrada do SWAT. Recebe como parâmetro de entrada a lista de alternativas de um determinado grupo de solução e uma variável booleana informando se é para realizar as mudanças ou retornar aos valores originais dos arquivos de entrada.

O primeiro tipo de alteração buscada pelo sistema são HRUs sem dados referentes a mata ciliar nas sub-bacias impactadas pela inclusão simulada. Caso encontre, o sistema de suporte a decisão irá sugerir incluir 50m de mata ciliar dentro dessa HRU alterando o arquivo de gerenciamento de uso de solo da *HRU* (\*.mgt) com mudança do valor da opção *FILTERW* para 50.

Caso a alternativa seja de alterar o UOT e a flag de mudança for igual a *TRUE* então o arquivo de manejo do solo da *HRU* (\*.mgt) é aberto e alterado o código de cobertura de solo para 16 (Cerrado). Caso a flag esteja com o valor *FALSE* então o sistema abre o mesmo arquivo e altera o código de UOT para o valor contido na tabela *HRU* da *HRU* analisada.

Se a alternativa for de diminuição das cargas de fonte de poluição pontual contida em uma das sub-bacias afetadas (flag de mudança *TRUE*), o sistema busca o nome do arquivo dessa fonte de poluição pontual e diminui seus valores em 10%. Caso o flag de mudança for igual a *FALSE*, o sistema abre o mesmo arquivo e retorna os valores contidos na tabela de *FONTE\_PONTUAL* (Figura 27).

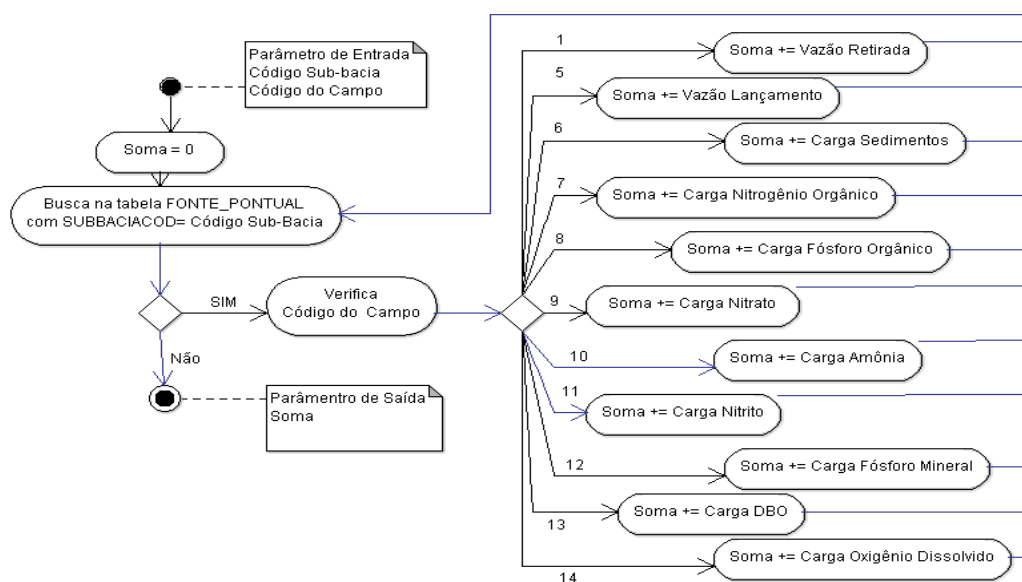


**FIGURA 27-** Detalhamento do processo Fazer alterações de Suporte à Decisão.

### 3.4.5 CALCULAR TOTAL DOS CONSTITUENTES EM UMA SUB-BACIA

Esse procedimento soma todas as fontes pontuais existentes por constituinte em uma sub-bacia, isso em decorrência da concepção computacional semidistribuída do SWAT.

Ao receber o código da sub-bacia e o código do item a ser somado, o SWAT\_Gestão busca os registros na tabela FONTE\_PONTUAL que possuem o mesmo código de sub-bacia informado. De posse desses registros, soma o item (constituente de qualidade de água, vazão etc.) de acordo com o código fornecido. Ao final desse processo o valor somado é enviado de volta para o objeto que chamou o procedimento. Esse procedimento é chamado como um campo fórmula na tabela de Sub-bacias (Figura 28).



**FIGURA 28** – Detalhamento do procedimento Soma Item em Sub-bacia.

## 4. ESTUDOS DE CASO

O SSD SWAT\_Gestão desenvolvido nesse trabalho pode ser usado para simular os impactos de alterações de fontes pontuais e difusas sobre características dos corpos hídricos de uma bacia hidrográfica buscando por alternativas otimizadas para minimizar esses impactos. Nos estudos de caso aqui avaliados foi dado enfoque na capacidade do sistema em tratar de problemas de qualidade de água. Salienta-se, porém, que o CCME-WQI pode ser configurado utilizando qualquer valor mensurável que caracteriza um manancial, sendo que na presente implementação esses valores são compostos por parâmetros simuláveis pelo SWAT.

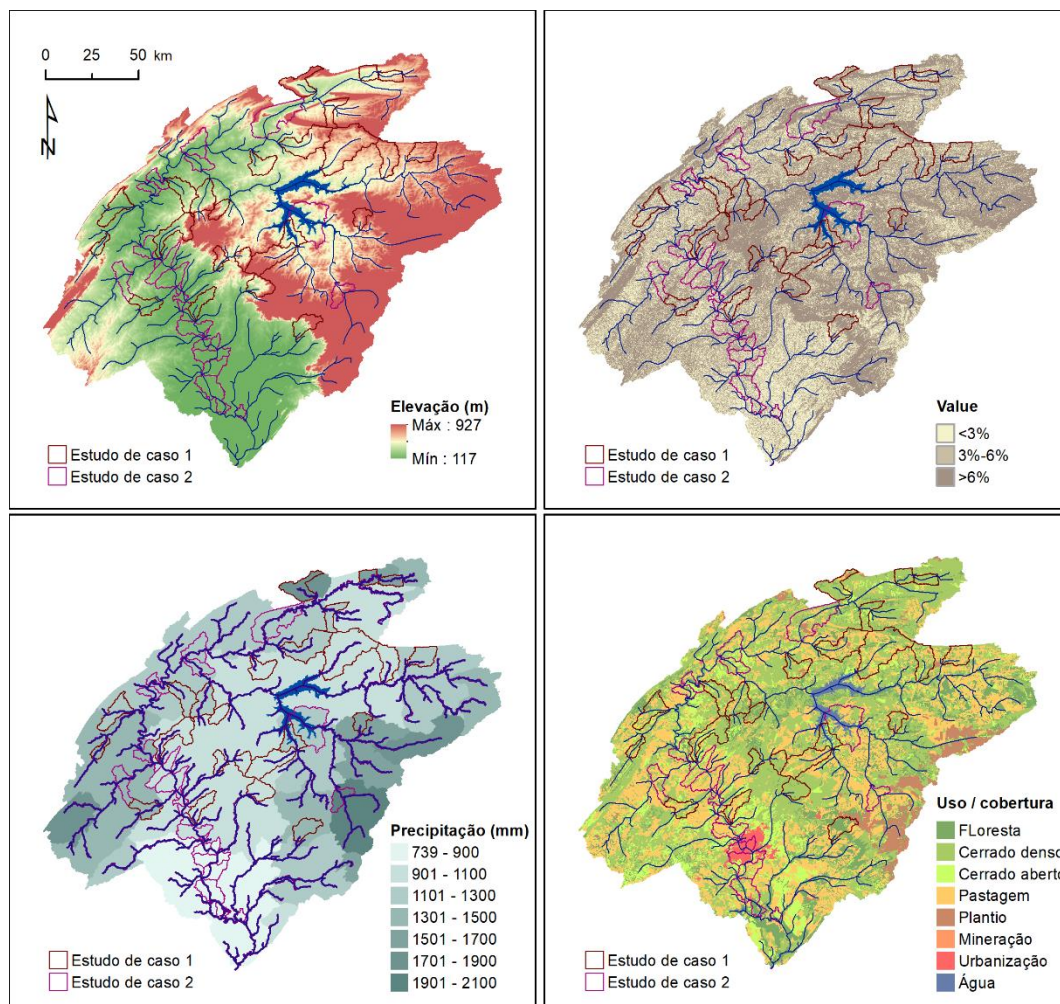
Ambos os estudos de caso foram realizados na bacia hidrográfica do Rio Cuiabá e baseados em uma modelação SWAT calibrada e validada, conduzida por Alkmim (2017), representando a situação atual da bacia.

O primeiro estudo demonstra e avalia a funcionalidade da aplicação para resolver conflitos oriundos por lançamentos de efluentes provenientes da instalação de novos empreendimentos sem considerar aportes provenientes por fontes difusas. Para essa forma de aplicação, típica para um procedimento técnico necessário para concessão de uma Outorga de RH, o SWAT\_Gestão já disponibiliza uma interface gráfica WEB para operar o sistema. Já o segundo estudo de caso avalia a sensibilidade do SWAT\_Gestão para encontrar soluções que minimizem impactos negativos sobre a qualidade de água na bacia estudada. Busca por soluções baseadas na minimização da poluição pontual e difusa, aplicando assim em um domínio típico para estudos que visam subsidiar o desenvolvimento de PRH. Os diferentes cenários aqui apresentados não foram gerados a partir de uma interface, mas a partir de processos empilhados (*batch*).

### 4.1 ÁREA DE ESTUDO, MODELAGEM BASE COM O SWAT E ESCOLHA DAS SUB-BACIAS PARA VALIDAÇÃO DO SWAT\_GESTÃO

A Bacia do Rio Cuiabá localiza-se na parte norte da Bacia do Alto Paraguai e é um dos principais formadores dessa bacia (PAZ, 2011). Foi delimitada, utilizando como exutório a estação fluviométrica da ANA “Barão de Melgaço” (66280000) já dentro da planície do Pantanal. Possui assim uma área de aproximadamente de

29.000 km<sup>2</sup>, estendendo-se entre os paralelos 14°18' S e 17°00' S e meridianos 54°40' W e 56°55' W (Figura 29).



**FIGURA 29** - Modelo numérico de terreno (a), declividade (b), precipitação anual (c) e UOT (d) da Bacia Hidrográfica do Rio Cuiabá. A distribuição das sub-bacias de avaliação nos dois estudos de caso e localização na bacia do Alto Rio Paraguai (BAP) são detalhadas na Figura 30.

O curso médio do rio Cuiabá é formado pela confluência do Rio Cuiabazinho com suas nascentes localizadas na Faixa de Dobramentos Paraguai-Araguaiana dentro da Depressão Cuiabana Dissecada e o rio Manso no leste da bacia, que possui as suas cabeceiras no Planalto de Guimarães dissecado e conservado em altitudes de até cerca de 900m. A área de contribuição do rio Cuiabazinho é formada principalmente por metassedimentos do Grupo Cuiabá. É coberta por solos pouco profundos e possui ainda boa parte da sua vegetação natural de Cerrado intacto. O uso da terra predominante é de pecuária com os rios não recebendo lançamentos

industriais ou domésticos relevantes. O Rio Manso, o principal afluente do Rio Cuiabá, recebe também contribuições de litologias sedimentares cenozóicas do Planalto, onde predominam solos profundos e bem drenados que são amplamente utilizados para plantio (Figura 29d).

O clima da região é do tipo Aw de Koeppen, Tropical semiúmido com precipitação anual entre 800 e 2100 mm (Figura 29c), com as máximas ao norte e leste da bacia na transição para o Planalto Central e as mínimas no sul e oeste onde diminui centripedamente em direção ao centro da planície. Possui sazonalidade definida por dois períodos distintos: de estiagem (abril a setembro) e de chuva (outubro a março). A temperatura média anual é de 26 °C, ocorrendo as máximas médias diárias em torno de 36 °C, em setembro, e as mínimas de 15 °C, em junho.

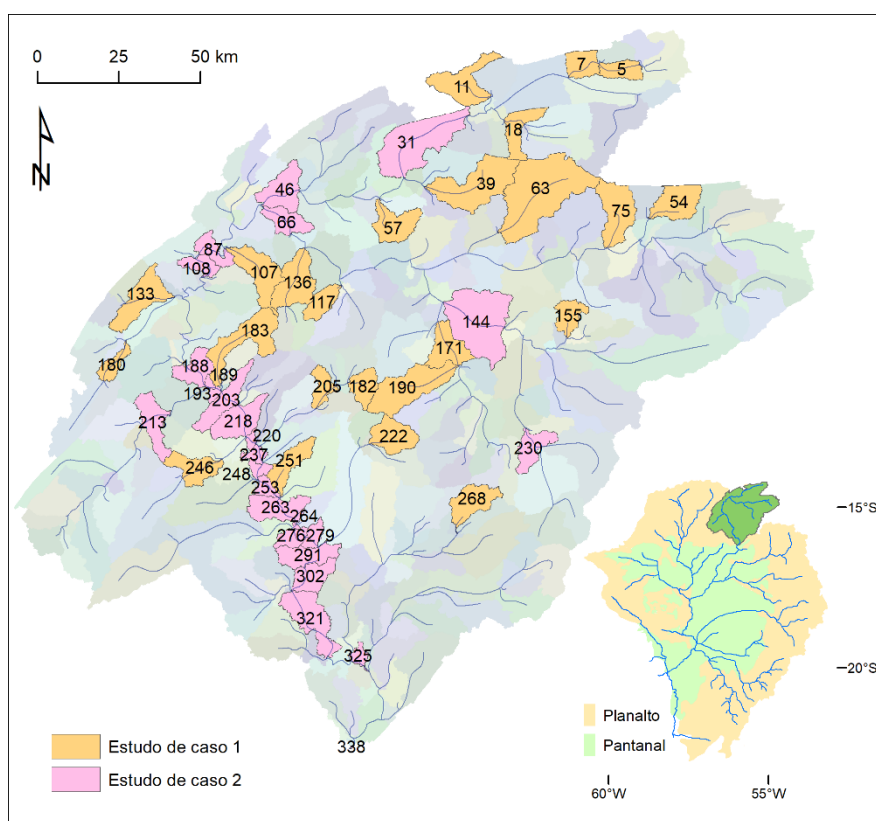
No projeto SWAT original (versão ArcSWAT 2009), parametrizado por Alkmim (2017), utilizou-se uma área de 50 km<sup>2</sup> como tamanho mínimo para delimitação de uma sub-bacia. A discretização foi efetuada a partir do Modelo Numérico de Elevação (MNE) SRTM, versão 4.0 (Figura 29a), resultando em 338 sub-bacias. Para formação dos HRUs foram diferenciadas oito classes de UOT (Figura 29b), três classes de declividade (Figura 29c) e um total de 12 tipos de solo. Metadados detalhados sobre fonte, escala e ano de referência destas camadas de entrada são dadas em Alkmim (2017).

A calibragem do modelo SWAT incluiu uma análise de sensibilidade para ajuste consecutivo das simulações de vazão, produção e transporte de sedimentos e qualidade de água, utilizando a aplicação SWATCUP (ABBASPOUR, 2007). Os detalhes sobre seleção dos parâmetros mais sensíveis e suas respectivas faixas de ajuste podem ser obtidos em Alkmim (2017). Os resultados da validação dos ajustes das simulações mensais expressos pelo Coeficiente de Determinação (R<sup>2</sup>) e o índice de Nash & Sutcliffe (NSE) são expostas na Tabela 3.

**Tabela 3** - Validação do projeto SWAT original, com simulação entre 2003 e 2012, utilizado como base dos estudos de caso 1 e 2 do SWAT\_Gestão (adaptado de acordo com Alkmim 2017)

| Calibração | Número estações | Origem das séries    | R2        | NSE       |
|------------|-----------------|----------------------|-----------|-----------|
| Vazão      | 6               | ANA / Hidroweb       | 0,67-0,99 | 0,82-0,86 |
| Sedimentos | 3               | ANA/CPRM<br>Hidroweb | 0,03-0,35 | 0,05-0,41 |
| Nitrato    | 5               | PRONEX / UFMT        | 0,01-0,04 | -4,13     |

De acordo com os valores do R2 e NSE, o desempenho do modelo para simulações mensais de sedimentos e Nitrato devem ser considerados não satisfatórios. O estudo de Alkmin (2017), porém, mostrou que as simulações reproduzem em termos relativos as variações entre os anos das concentrações observadas e representam adequadamente as alterações percentuais nas diferentes regiões da bacia em estudo. A escolha de sub-bacias para os dois estudos de caso seguiu critérios distintos. Para o primeiro estudo (EC1) foram escolhidas oito de um total de 105 sub-bacias que já possuem, no Cenário Atual, fontes de poluição pontual cadastradas, entre elas lançamentos de efluentes provenientes de esgoto doméstico, atividades industriais e pisciculturas (Figura 30) (ALKMIN, 2017).



**FIGURA 30-** Sub-bacias utilizadas para validação dos estudos de caso 1 e 2.

Foram consideradas sub-bacias distribuídas em diversas regiões da bacia, porém todas com canais principais com vazões médias anuais abaixo de  $25 \text{ m}^3/\text{s}$ . Sub-bacias com vazões maiores não foram escolhidas, já que cargas adicionais como geradas por empreendimentos de tamanhos usuais na região não resultariam em alterações consideráveis nas concentrações dos mananciais receptores.

Já para o segundo estudo de caso (EC2) foram escolhidas 27 sub-bacias com área de contribuição maiores e com vazões médias anuais superiores a  $20 \text{ m}^3/\text{s}$ . Esse critério foi adotado, porque para a calibração do SWAT foram somente disponíveis pontos de monitoramento com áreas de contribuição maiores de cerca de  $4.000 \text{ km}^2$  e que as análises apresentadas por Alkmim (2017) mostraram que ocorreram superestimativas das concentrações e cargas de poluentes nas cabeceiras da bacia.

Como o objetivo desse estudo de caso é avaliar a variação do impacto de acordo com as alterações nos percentuais de poluição existente foram escolhidas 27 sub-bacias que possuem atualmente fontes de poluição pontual cadastradas no sistema.

## 4.2 CENÁRIOS AVALIADOS

### 4.2.1 Inclusão de novas fontes de poluição pontual (EC1)

Para proceder na validação da aplicabilidade do SWAT\_Gestão no primeiro estudo de caso (EC1) foram primeiramente buscadas, junto a Diretoria de Recursos Hídricos da SEMA-MT, informações sobre os valores típicos de lançamento industriais de cargas de poluentes em seus efluentes provenientes do automonitoramento das mesmas (Tabela 4).

**Tabela 4** - Concentração em mg/l de poluentes lançados como efluentes por alguns tipos de empreendimentos do MT (SEMA, 2019)

|                |                     |      | Tipo de Empresa    |             |           |           |                  |                |               |
|----------------|---------------------|------|--------------------|-------------|-----------|-----------|------------------|----------------|---------------|
|                |                     |      | Refinaria de Grãos | Frigorífico | Laticínio | Biodiesel | Aterro Sanitário | Cana de Açúcar | Agroindustria |
| Constituintes  | Nitrat              | Min  | 0,22               | 0,201       | 0,75      | 6         | 0                | 0,22           | 0             |
|                |                     | Max  | 1,65               | 2,5         | 1,26      | 6         | 0                | 0,22           | 0             |
|                | Nitrito             | Min  | 0,01               | 0,001       | 0,01      | 0,09      | 0                | 0,01           | 0             |
|                |                     | Max  | 0,06               | 0,01        | 0,01      | 0,09      | 0                | 0,01           | 0             |
|                | Nitrogênio Orgânico | Min  | 4,05               | 166,7       | 11        | 144,3     | 0                | 18,3           | 0             |
|                |                     | Max  | 11,75              | 279,5       | 22,5      | 400       | 0                | 18,3           | 0             |
|                | Nitrogênio Amoníaco | Min  | 0,1                | 119,4       | 0,96      | 0         | 132              | 0              | 0             |
|                |                     | Max  | 8,63               | 212         | 16        | 0         | 132              | 0              | 0             |
|                | Fósforo Total       | Min  | 42,4               | 65,5        | 21        | 399,5     | 0,2              | 2,2            | 0             |
|                |                     | Max  | 664                | 142         | 91,3      | 480       | 0,2              | 2,2            | 0             |
|                | DBO                 | Min  | 52                 | 10          | 296       | 698       | 62               | 0              | 840           |
|                |                     | Max  | 1971               | 748         | 556       | 10767     | 85               | 0              | 840           |
|                | OD                  | Min  | 0,2                | 0,1         | 0,2       | 0         | 2,6              | 0              | 0             |
|                |                     | Max  | 7,4                | 3,6         | 0,2       | 0         | 3                | 0              | 0             |
| Sólidos totais | Min                 | 13,5 | 100                | 1850        | 2350      | 16        | 557              | 1167           |               |
|                | Max                 | 1514 | 1790               | 3150        | 3120      | 625       | 557              | 1167           |               |

Para cada sub-bacia escolhida para ser analisada foi inserido uma nova fonte de poluição pontual com a mesma concentração de poluentes lançados de um tipo de empreendimento escolhido aleatoriamente de acordo com os dados listados na Tabela 4.

Após cada inclusão o sistema SWAT\_Gestão realizou a avaliação do índice de qualidade de água segundo o método CCME-WQI para cada sub-bacia da Bacia Hidrográfica. Em dois dos quatro cenários foram utilizados seis constituintes para cálculo do CCME-WQI e em dois cenários três constituintes de acordo com a Tabela 5.

**Tabela 5** - Constituintes utilizados para cálculo do CCME-WQI nos quatro cenários avaliados no estudo de caso 1 (EC1).

| Constituinte CCME-WQI    | Cenário 1a, 2a | Cenário 1b, 2b |
|--------------------------|----------------|----------------|
| Vazão                    | *              |                |
| Sólidos totais suspensos | *              | *              |
| Nitrogênio Total         | *              | *              |
| Fósforo Total            | *              | *              |
| DBO                      | *              |                |
| Oxigênio Dissolvido      | *              |                |

Todos esses constituintes utilizados são simulados pelo modelo SWAT e disponibilizados em seus arquivos de saída.

Deve ser ressaltado que o projeto SWAT original disponível possui discretização reduzida (área mínima das sub-bacia > 50km<sup>2</sup>) e foi desenvolvido e calibrado para uma bacia de grande extensão (>25.000 km<sup>2</sup>). Simulações de vazão, produção e transporte de sedimentos e qualidade de água em sub-bacias com pequenas áreas de contribuição fazem com que sub-bacias de vazões baixas possuem incertezas elevadas. Por esta razão foram escolhidas sub-bacias com vazões médias anuais acima de no mínimo 1 m<sup>3</sup>/s e abaixo de 23,9 m<sup>3</sup>/s. A sua distribuição dentro da Bacia é espacializada na Figura 30 (item [4.1](#)).

Em seguida o SWAT\_Gestão compara os valores do CCME-WQI de cada sub-bacia no Cenário Atual e do Cenário Analisado. Avalia também, se o novo empreendimento (EC1\_1a, EC1\_1b) ou conjunto de empreendimentos (EC1\_2a, EC1\_2b) degrada a qualidade de água nas sub-bacias a jusante. Caso haja uma degradação entre os dois cenários, o SWAT\_Gestão propõe a execução do módulo de Suporte a Decisão. Uma vez executado sugere, se possível, soluções com medidas compensatórias que permitam incluir essa nova fonte de poluição pontual sem causar diminuições nos índices de qualidade além do pré-definido (Cenários Alternativos).

As medidas compensatórias analisadas na implementação atual do sistema (Aumento da faixa de mata ciliar, Alteração da cobertura vegetal para cerrado, Diminuição de 10% das cargas de lançamento nas sub-bacias afetadas) para a busca de soluções pelo SSD (Cenários Alternativos) são detalhadas na seção [3.4.4.1](#).

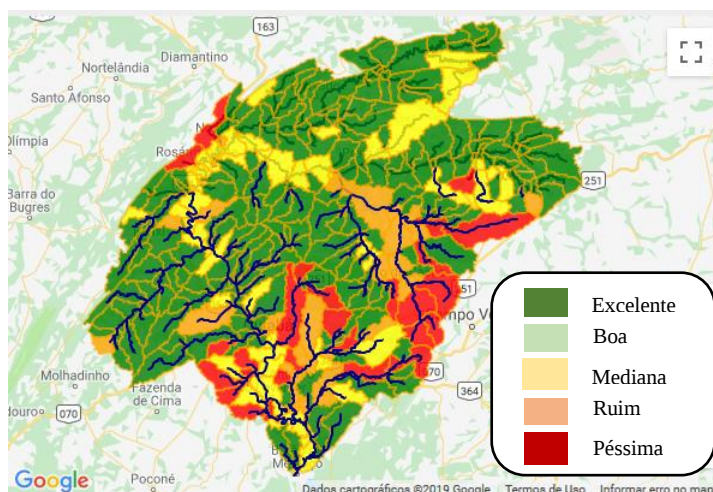
#### **4.2.1.1 Cenários Base e Atual**

Para todas as simulações com o SWAT\_Gestão são calculados primeiramente os CCME-WQI das sub-bacias para dois cenários: o Cenário de Base e o Atual. O Cenário Base é usado para calcular os valores de referência para cada item constituinte do CCME-WQI. Neste EC1, os valores de referência foram calculados através das cargas no mês mais seco em uma simulação mensal de 1 ano<sup>4</sup>. Foram

---

<sup>4</sup> Simulação de 4 anos sendo os 3 primeiros dedicados para aquecimento do modelo e aproveitando somente os dados do último ano.

excluídos todas fontes de poluição pontual / captação e os HRUs com UOT predominante de plantio e pecuária foram alteradas para vegetação natural de Cerrado. Esses valores de referência do Cenário Base são em seguida comparados com os valores mensais dos constituintes do CCME-WQI simulados para o Cenário Atual resultando assim no CCME-WQI das sub-bacias na situação atual (Figura 31).



**FIGURA 31** - Cenário Atual do CCME-WQI (seis constituintes) na Bacia do Rio Cuiabá no EC1.

Para visualização automatizada pela API Google Maps, o SWAT\_Gestão usa uma codificação em cinco cores, representando cada uma das classes do CCME-WQI. Segundo essa classificação, no Cenário Atual, 217 das 338 sub-bacias ainda possuem um índice de qualidade considerada excelente, nenhuma sub-bacia com a qualidade boa, 58 sub-bacias consideradas medianas, 31 consideradas ruins e 32 consideradas péssimas principalmente em sub-bacias onde ocorrem o lançamento de esgoto doméstico das cidades existentes na região como Nobres, Chapada dos Guimarães, Várzea Grande e Cuiabá e nas cabeceiras no Planalto Central, sob intenso uso agropecuário.

#### **4.2.1.2 Cenários de inclusão avaliados (Cenários Analisados)**

Todas as simulações foram realizadas a partir da inclusão de empreendimentos ou conjunto de empreendimentos fictícios, porém com concentrações de poluentes nos seus efluentes compatíveis com empreendimento reais encontradas na bacia (vide Tabela 4).

Foram simulados e avaliados quatro cenários de inclusão de empreendimentos com captações e lançamentos de efluentes (Cenários Analisados) conforme listados a seguir:

- Cenário 1a e 1b (EC1\_C1a, EC1\_C1b): Cenários pareados que consistem na inserção de um empreendimento em cada uma das oito sub-bacias com cargas variadas, porém compatíveis com cargas geradas por indústrias já existentes na bacia. As análises são baseadas uma vez com o CCME-WQI foi calculado a partir de seis constituintes (EC1\_C1a) ou com três constituintes (EC1\_C1b) do CCME-WQI (Tabela 5).
- Cenário 2a e 2b (EC1\_C2a, EC1\_C2b): Esses cenários pareados utilizam os lançamentos das 08 sub-bacias anteriores, mais os lançamentos de 16 sub-bacias adicionais para as quais foram atribuídas cargas poluentes atualmente não encontradas na bacia mas que poderiam ser gerados pela implantação de um parque industrial de 10-20 empreendimentos com diferentes composições de indústrias. Usa como no caso do EC1\_C2a seis constituintes e no EC1\_C2b três constituintes. Esses cenários foram gerados para avaliar a utilidade do módulo SSD em situações mais complexas do que encontradas atualmente no Estado e assim a aplicabilidade do SWAT\_Gestão também em bacias altamente industrializados como p.ex. no sudeste do país.

#### **4.2.1.2.1 EC1\_C1a e EC1\_C1b**

As cargas para os Cenários 1a e 1b (EC1\_C1a, EC1\_C1b) podem ser consideradas altas, porém, foram estipuladas de acordo com a Tabela 6 provenientes de trabalhos de automonitoramento recentes por empreendimentos na Bacia do Rio Cuiabá. Foi executada uma simulação para cada sub-bacia para analisar o impacto que essas novas inclusões trariam sobre o CCME-WQI. O módulo SSD é acionado somente caso o CCME-WQI do Cenário Avaliado diminua mais de 10% comparado com o Cenário Atual. O número de simulações realizadas pelo módulo de SSD (Coluna “Alternativas”, Tabela 7) depende neste caso do número de HRUs e número de lançamentos dentro da própria sub-bacias e de sub-bacias a jusante também

impactadas acima de 10% no seu índice de qualidade CCME-WQI pelo lançamento da sub-bacia em questão.

No EC1\_C1a, todos os constituintes possíveis foram analisados para determinar os índices de qualidade das sub-bacias existentes. Para o EC1\_C1b foram somente utilizados Nitrogênio Total, Fósforo Total e Sedimentos Totais Dissolvidos, isso porque o projeto base do modelo SWAT da Bacia do Rio Cuiabá foi calibrado para estes três parâmetros de qualidade de água.

**Tabela 6** - Cargas mínimas, máximas e médias dos empreendimentos utilizadas para as simulações dos cenários no SWAT para os cenários EC1\_2a e EC1\_2b.

|              | Retirada<br>(m <sup>3</sup> /s) | Lançamento<br>(m <sup>3</sup> /s) | Nitrogênio<br>Orgânico<br>(kg/dia) | Amônia<br>(kg/dia) | Nitrato<br>(kg/dia) | Nitrito<br>(kg/dia) | Fósforo<br>Orgânico<br>(kg/dia) | DBO<br>(kg/dia) | Oxigênio<br>Dissolvido<br>(kg/dia) | Sólidos<br>totais |
|--------------|---------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|--------------------|---------------------|---------------------|---------------------------------|-----------------|------------------------------------|-------------------|
| Minima       | 0.03                            | 0.04                              | 127.76                             | 24.05              | 0.50                | 0.20                | 159.32                          | 245.38          | 19.35                              | 816.5             |
| Máxima       | 2.00                            | 1.50                              | 812.16                             | 2063.00            | 119.39              | 0.45                | 24125.00                        | 6739.20         | 388.80                             | 27648.0           |
| <b>Média</b> | <b>0.82</b>                     | <b>0.83</b>                       | <b>209.95</b>                      | <b>469.52</b>      | <b>18.65</b>        | <b>0.22</b>         | <b>10724.95</b>                 | <b>3065.24</b>  | <b>245.20</b>                      | <b>10470.6</b>    |

Os resultados das simulações de EC1\_C1a e EC1\_C1b estão representados na Tabela 7.

**Tabela 7** - Cargas de empreendimentos fictícios utilizadas nas simulações do cenário EC1\_C1a com seis constituintes (Vazão mensal, Sólidos totais suspensos, Nitrogênio Total, Fósforo Total, DBO, Oxigênio Dissolvido) e EC1\_C1b com três constituintes (Nitrogênio Total, Fósforo Total e Sedimentos)

|                 |                    | Sub-bacia |     |     |     |     |     |     |     |
|-----------------|--------------------|-----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|                 |                    | 18        | 39  | 75  | 155 | 171 | 190 | 205 | 268 |
| 6 constituintes | Autorizar sem SSD  | Sim       | Não | Não | Sim | Não | Não | Não | Sim |
|                 | CCME Cen. Atual    |           | 100 | 100 |     | 100 | 100 | 100 |     |
|                 | CCME Cen. Avaliado |           | 89  | 65  |     | 52  | 72  | 78  |     |
|                 | CCME Cen. Melhor   |           | 90  | 90  |     | 66  | 72  | 90  |     |
|                 | Alternativas SSD   |           | 5   | 2   |     | 5   | 6   | 3   |     |
|                 |                    |           |     |     |     |     |     |     |     |
| 3 constituintes | Autorizar sem SSD  | Sim       | Não | Não | Sim | Não | Não | Não | Sim |
|                 | CCME Cen. Atual    |           | 100 | 100 |     | 100 | 100 | 100 |     |
|                 | CCME Cen. Avaliado |           | 73  | 73  |     | 73  | 44  | 73  |     |
|                 | CCME Cen. Melhor   |           | 100 | 100 |     | 73  | 44  | 100 |     |
|                 | Alternativas SSD   |           | 4   | 1   |     | 3   | 6   | 1   |     |
|                 |                    |           |     |     |     |     |     |     |     |

A coluna “Autorizar” mostra se o sistema SWAT\_Gestão recomenda ou não a autorização da inclusão dessa fonte de poluição pontual por verificar que essa

inclusão afeta ou não a sustentabilidade das sub-bacias envolvidas. Em caso positivo não são informados valores nas colunas 9 a 12 como ocorrido com os empreendimentos inseridos nas sub-bacias 18, 155 e 268.

A coluna “Situação Atual” demonstra qual é o valor do CCME-WQI da sub-bacia dentro do Cenário Atual. A coluna “Situação Simulada” demonstra qual é o valor do CCME-WQI da sub-bacia dentro do Cenário Avaliado e a coluna “Melhor Decisão” demonstra qual é o valor do CCME-WQI da sub-bacia dentro do melhor Cenário Alternativo gerado pelo módulo de SSD. Já a coluna “Alternativas” mostra quantas alternativas o módulo de suporte a decisão conseguiu criar para buscar uma melhor solução para o problema exposto levando em conta as características de cada sub-bacia.

Para os dois Cenários Avaliados, o módulo de Suporte à Decisão foi inicializado em cinco de oito casos para os quais não houve indicação de uma autorização direta pelo sistema SWAT\_Gestão.

Na bacia 190, o módulo de SSD não foi capaz de propor uma melhoria o impacto causado pela inclusão da fonte de poluição pontual utilizando os critérios compensatórios pré-definidos. No EC1\_C1a nenhuma alternativa foi identificada, já no EC1\_C1b o SSD gerou seis simulações alternativas, porém sem êxito em melhorar o índice CCME-WQI.

Em outras 4 sub-bacias foram realizados entre 2 (75) e 5 (39, 171) simulações de Cenários Alternativos para o EC1\_C1. Todas as simulações conseguiram determinar soluções que aumentaram o valor do CCME-WQI da sub-bacia entre 1 (39) até 25 (75) pontos.

Já para as outras quatro sub-bacias, no EC1\_C2 foram realizadas entre 1 (75) e 4 (171) simulações de Cenários Alternativos. Essas simulações conseguiram determinar soluções que aumentaram o valor do CCME-WQI da sub-bacia em entre 1 (39) até 25 (75) pontos. Três sub-bacias tiveram melhora de 27 pontos no CCME-WQI.

#### 4.2.1.2.2 EC1\_C2a e EC1\_C2b

Como efetuado para os Cenários Avaliados EC1\_1a e EC1\_1b, os Cenários EC1\_2a e EC1\_2b comparam os resultados no CCME-WQI e nas saídas do módulo de SSD utilizando os mesmos três e seis constituintes para cálculo do CCME-WQI. Como nos dois cenários EC1\_C1, o módulo SSD é acionado somente caso o CCME-WQI do Cenário Avaliado diminua mais de 10% comparado com o Cenário Atual.

A Tabela 8 mostra a faixa de variação das cargas dos 24 empreendimentos utilizadas nas simulações e a Tabela 9 das saídas do módulo de SSD.

**Tabela 8** - Cargas mínimas, máximas e médias dos empreendimentos utilizadas para as simulações dos cenários no SWAT para os cenários EC1\_2a e EC1\_2b.

|        | Retirada<br>(m <sup>3</sup> /s) | Lançamento<br>(m <sup>3</sup> /s) | Nitrogênio<br>Org. (kg/dia) | Amônia<br>(kg/dia) | Nitrato<br>(kg/dia) | Nitrato<br>(kg/dia) | Fósforo Org.<br>(kg/dia) | DBO<br>(kg/dia) | DO (kg/dia)  | Sólidos<br>totais<br>(kg/dia) |
|--------|---------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|--------------------|---------------------|---------------------|--------------------------|-----------------|--------------|-------------------------------|
| Mínima | 0.03                            | 0.04                              | 0.0                         | 0.0                | 0.0                 | 0.0                 | 0.0                      | 245.4           | 6.9          | 816.5                         |
| Máxima | 2.00                            | 1.50                              | 62300.0                     | 12379.4            | 114.0               | 4.1                 | 45895.7                  | 651188.0        | 483.8        | 267883.2                      |
| Média  | <b>0.82</b>                     | <b>0.83</b>                       | <b>4381.1</b>               | <b>1097.1</b>      | <b>25.0</b>         | <b>0.7</b>          | <b>7616.9</b>            | <b>76821.9</b>  | <b>142.9</b> | <b>69800.0</b>                |

**Tabela 9** - Porcentagem dos empreendimentos autorizados sem uso do SSD, Valores mínimas, máximas e médias do CCME-WQI para os Cenários Atual, Avaliado e melhor Alternativo e número de alternativas detectadas pelo módulo SSD (EC1\_2a e EC1\_2b).

| Cenário | Autorizado<br>sem SSD<br>(%) | Uso do<br>SSD<br>sem/com<br>melhora | Estatística | CCME-<br>WQI Cen.<br>Atual | CCME-<br>WQI Cen.<br>Avaliado | CCME-<br>WQI Cen.<br>Melhor | Alternativas<br>identificadas |
|---------|------------------------------|-------------------------------------|-------------|----------------------------|-------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|
| EC1_2a  | 16.7                         | 33.3                                | Min         | 56.0                       | 25.0                          | 34.0                        | 1.0                           |
|         |                              |                                     | Max         | 100.0                      | 90.0                          | 100.0                       | 30.0                          |
|         |                              |                                     | <b>Méd</b>  | <b>93.6</b>                | <b>71.0</b>                   | <b>81.8</b>                 | <b>6.9</b>                    |
| EC1_2b  | 45.8                         | 20.9                                | Min         | 73.0                       | 15.0                          | 16.0                        | 1.0                           |
|         |                              |                                     | Max         | 100.0                      | 73.0                          | 100.0                       | 30.0                          |
|         |                              |                                     | <b>Méd</b>  | <b>97.9</b>                | <b>57.9</b>                   | <b>74.6</b>                 | <b>4.4</b>                    |

Em ambos os cenários há uma melhora no CCME-WQI médio comparando os Cenários Avaliados com os melhores Cenários Alternativos (CCME-WQI Cen. Melhor). No EC1\_2a a melhoria média é de 10,8 e no EC1\_2b de 16,7. Avaliando também variáveis que caracterizam principalmente as cargas orgânicas e níveis de

oxigenação (DBO, OD) no cálculo, o EC1\_2a se mostrou mais restritivo, por autorizar somente 16,7% dos empreendimentos a serem autorizados sem ativar o módulo SSD, em 33,3% dos casos o módulo SSD não conseguiu propor uma alternativa que aumentaria o CCME-WQI atual. No caso do EC1\_2b, 45,8% dos empreendimentos foram incluídos sem uso do SSD, em 20,9% dos casos o SSD não consegue minimizar o impacto. A média no CCME-WQI das sub-bacias no Cenário Atual é inferior no EC1\_2a (93,6), do que no EC1\_2b (97,9).

#### 4.2.1.2.3 Análise detalhada de duas sub-bacias no cenário EC1\_C2a

Como exposto a utilização de seis em vez de três constituintes aumenta a sensibilidade do CCME-WQI em detectar heterogeneidade entre as sub-bacias em representar diferentes níveis de impactos na inclusão de empreendimentos. Supõe-se que isso ocorra principalmente pela inclusão do DBO e do OD e pelos altos volumes de captação e lançamento estipulados. Desta forma, as análises do funcionamento o sistema SWAT\_Gestão em sub-bacias individuais apresentadas em seguida foram baseados no Cenário EC1\_2a.

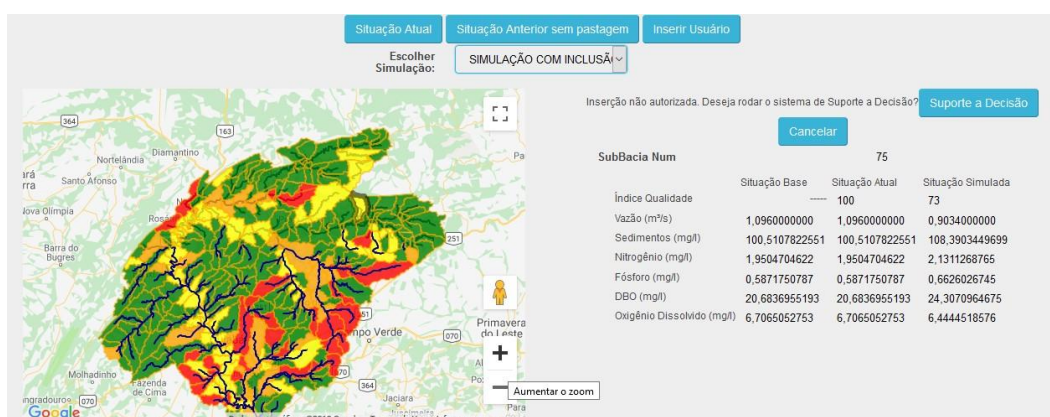
#### Sub-Bacia 75

A sub-bacia 75 é uma cabeceira do Rio Manso na região nordeste da bacia. Os dados inseridos nessa simulação estão listados na Tabela 10.

**Tabela 10-** Cargas lançadas e resultados da simulação na sub-bacia 75

| Sub-Bacia | Lançamento<br>(m <sup>3</sup> /s) | Oxigênio<br>Dissolvido<br>(kg/dia) | Nitrogênio<br>Orgânico<br>(kg/dia) | Nitrato<br>(kg/dia) | Fósforo<br>Orgânico<br>(kg/dia) | Autorizar | Situação<br>Atual | Situação<br>Simulada |
|-----------|-----------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|---------------------|---------------------------------|-----------|-------------------|----------------------|
| 75        | 0,04                              | 19,3536                            | 0                                  | 1,56                | 159,32                          | Não       | 100               | 65                   |
|           | Retirada<br>(m <sup>3</sup> /s)   | Sedimentos<br>(kg/dia)             | Amônia<br>(kg/dia)                 | Nitrito<br>(kg/dia) | DBO<br>(kg/dia)                 |           | Melhor<br>Decisão | Alternativas         |
|           | 0,3                               | 1382,4                             | 24,054                             | 0,035               | 245,38                          |           | 90                | 2                    |

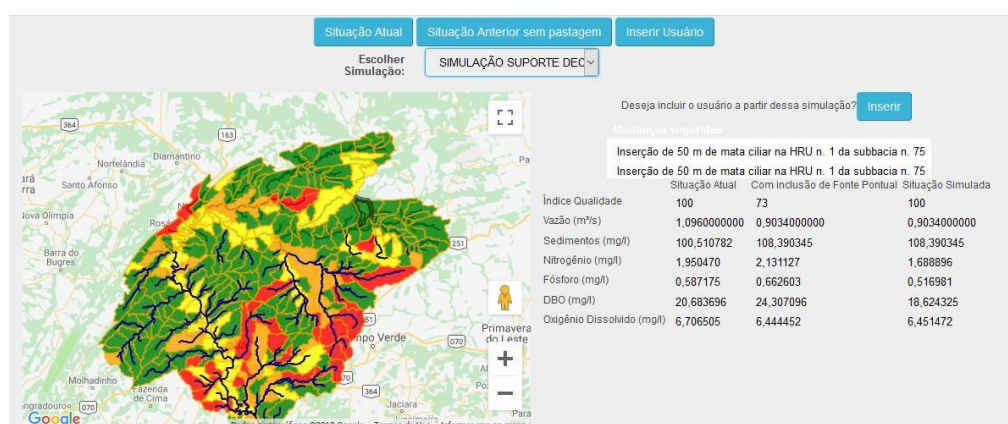
Após a inserção dos dados do lançamento a partir de uma interface gráfica do sistema, o sistema SWAT\_Gestão gera uma simulação para analisar o impacto que essa inclusão causaria sobre o índice de qualidade de água CCME-WQI. Como resultado o sistema retorna uma espacialização do resultado da simulação e visualiza em forma tabular o impacto sobre a vazão e as cargas de cada constituinte transportadas no canal principal (Figura 32). No caso desta sub-bacia o CCME-WQI baixou de 100 (Excelente) para 65 (Mediano).



**FIGURA 32** - Resultado simulação inserção na sub-bacia 75 (Cenário Avaliado).

Percebe-se uma diminuição na vazão em cerca de  $0,20 \text{ m}^3/\text{s}$ , aumentos no transporte de sedimentos, NT, PT, DBO e uma redução na concentração do OD, indicando assim uma piora de todos os constituintes em comparação com os valores de referência. Com a piora resultante no CCME-WQI, o sistema SWAT\_Gestão não propõe uma autorização da inclusão de forma imediata sem antes procurar uma alternativa para diminuir os impactos sobre o índice.

Com a confirmação da execução do módulo SDD, o SWAT\_Gestão busca entre as possíveis medidas compensatórias a(s) melhor(es) solução(ões). Nesse caso, a melhor opção identificada foi a inserção de 50 m de mata ciliar na HRU número 1 da sub-bacia. O resultado da simulação deste Cenário Alternativo é exposto na Figura 33.



**FIGURA 33** - Melhor Cenário Alternativo para minimizar a degradação do CCME-WQI na sub-bacia 75.

A inserção de mata ciliar contribui para evitar o transporte de sedimentos e nutrientes para o leito do canal principal. Por selecionar essa alternativa há uma melhora nas concentrações de nitrogênio, fósforo e DBO, porém com poucas alterações na vazão. Essa melhora nas cargas de alguns constituintes do CCME-WQI é suficiente para aumentar o índice de 65 (sem o Sistema de Suporte a Decisão) para 90 (com o Sistema de Suporte a Decisão). Dessa forma o sistema SWAT\_Gestão mostra ao gestor operando o sistema que há uma forma viável de inserir essa nova fonte de poluição pontual na sub-bacia 75 sem prejudicar de forma excessiva a sustentabilidade da sub-bacia.

Apesar da boa coerência do sistema para subsidiar a tomada de decisão para fins de concessão de Outorga em uma sub-bacia rural, as simulações das cargas/concentrações na sub-bacia exemplificada são prejudicadas pela parametrização e calibração do projeto SWAT de origem. Apesar de representar de forma coerente a mudança relativa entre os parâmetros de qualidade de água, as simulações das concentrações do DBO são irreais para um rio de cabeceiras pouco impactado, onde espera-se concentrações acima de 7 mg/l.

### **Sub-Bacia 171**

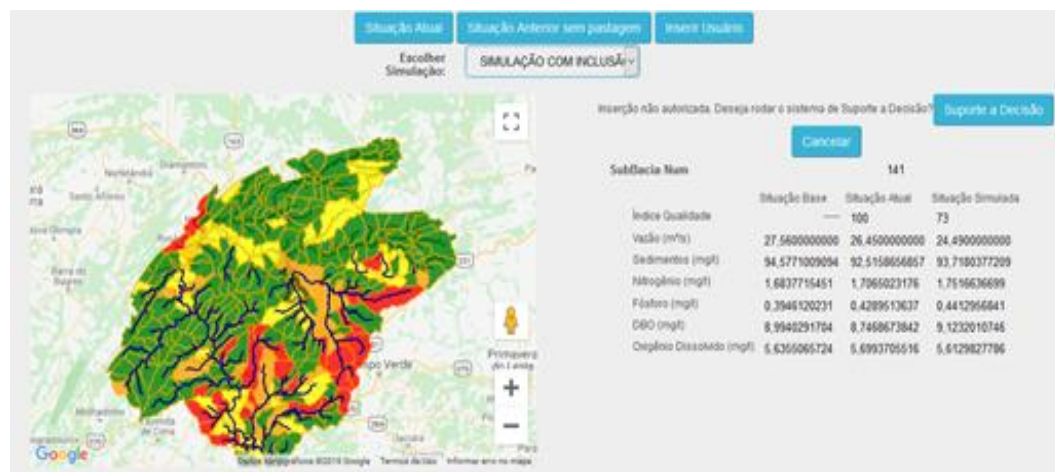
Em algumas simulações, o módulo de Suporte à Decisão não foi capaz de encontrar uma alternativa viável, como também no caso da sub-bacia 171 que se encontra em um trecho do Rio Quilombo a montante da Hidrelétrica APM Manso. Após inclusão (Tabela 13), o sistema SWAT\_Gestão novamente identificou através da simulação do modelo SWAT uma piora do CCME-WQI.

**Tabela 13** - Cargas lançadas e resultados da simulação na sub-bacia 171

| Sub-Bacia | Lançamento          | Oxigênio Dissolvido | Nitrogênio Orgânico | Nitrato  | Fósforo Orgânico | Autorizar | Situação Atual | Situação Simulada |
|-----------|---------------------|---------------------|---------------------|----------|------------------|-----------|----------------|-------------------|
|           | (m <sup>3</sup> /s) | (kg/dia)            | (kg/dia)            | (kg/dia) | (kg/dia)         |           |                |                   |
| 171       | 1.5                 | 388.8               | 0                   | 0        | 51697.44         | Não       | 100            | 52                |
|           | Retirada            | Sedimentos          | Amônia              | Nitrito  | DBO              |           | Melhor Decisão | Alternativas      |
|           | (m <sup>3</sup> /s) | (kg/dia)            | (kg/dia)            | (kg/dia) | (kg/dia)         |           |                |                   |
|           | 2                   | 1749.6              | 546.912             | 0        | 6739.2           |           | 66             | 5                 |

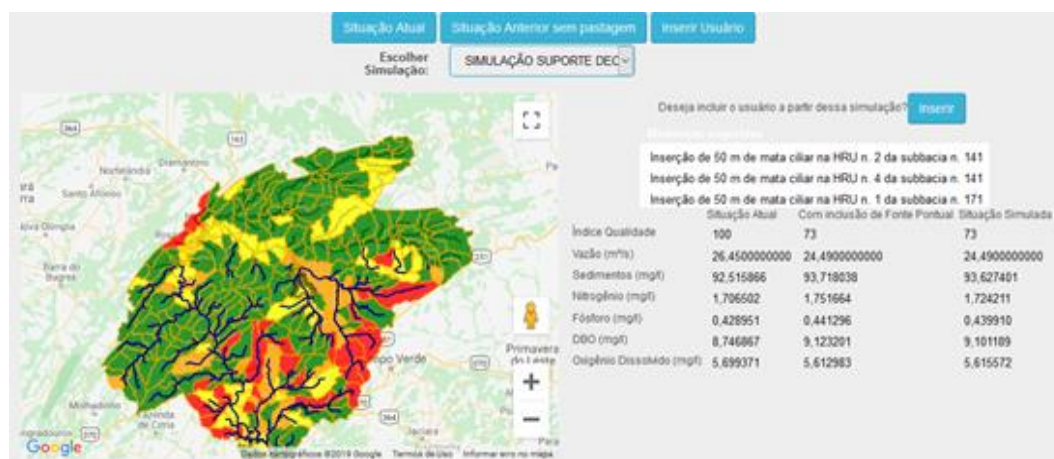
O efeito do lançamento se propaga até a sub-bacia 141 a jusante, na qual o CCME-WQI ainda caiu do valor 100 no Cenário Atual para o valor 73 no Cenário

Avaliado, mostrando a necessidade de executar o módulo de Suporte a Decisão. (Figura 34)



**FIGURA 34** - Resultado simulação inserção na sub-bacia 171 (Cenário Avaliado).

Já que existem duas sub-bacias afetadas (141 e 171), o módulo de SSD procura configurar grupos contendo alternativas de ambas as sub-bacias afetadas. Nesse caso a melhor alternativa encontrada (Figura 35) foi a que sugeriu inserir 50 m de mata ciliar nas HRUs 2 e 4 da sub-bacia 141 e na HRU 1 da sub-bacia 171.



**FIGURA 35** - Melhor Cenário Alternativo para minimizar a degradação do CCME-WQI na sub-bacia 171.

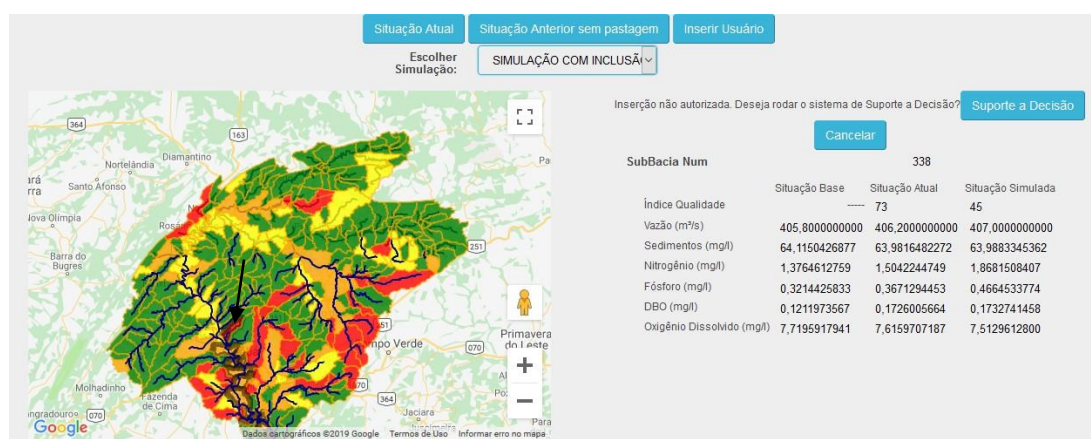
Apesar do módulo ter apresentado uma solução viável, ela não foi o suficiente para melhorar o CCME-WQI da sub-bacia 141, apesar de uma melhora nos constituintes do índice em termos absolutos. A vazão elevada da sub-bacia, em torno de 26 m³/s, necessita de um conjunto de alternativas mais amplo para que seus benefícios possam fazer efeito frente a degradação gerada pela inclusão simulada..

### Sub-Bacia 251

Na sub-bacia 251, após inserção de uma fonte de poluição pontual com as características expostas na Tabela 11, foi novamente necessário inicializar o módulo SSD, pois o impacto dessa inclusão se prologou por até 15 sub-bacias a jusante, chegando na sub-bacia 338 conforme mostrado na Figura 36 onde o índice de qualidade ainda caiu do valor 73 para 45.

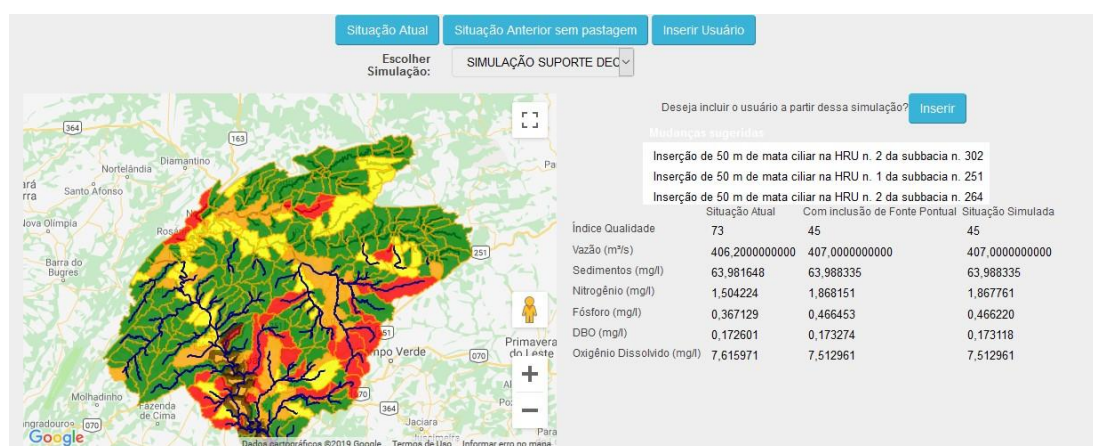
**Tabela 11** - Dados da inserção na sub-bacia 251

| Sub-Bacia | Lançamento<br>(m <sup>3</sup> /s) | Oxigênio<br>Dissolvido<br>(kg/dia) | Nitrogênio<br>Orgânico<br>(kg/dia) | Nitrato<br>(kg/dia) | Fósforo<br>Orgânico<br>(kg/dia) | Autorizar | Situação<br>Atual | Situação<br>Simulada |
|-----------|-----------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|---------------------|---------------------------------|-----------|-------------------|----------------------|
| 251       | 0,5                               | 0                                  | 6230                               | 0                   | 17258                           | Não       | 72                | 55                   |
|           | Retirada<br>(m <sup>3</sup> /s)   | Sedimentos<br>(kg/dia)             | Amônia<br>(kg/dia)                 | Nitrito<br>(kg/dia) | DBO<br>(kg/dia)                 |           | Melhor<br>Decisão | Alternativas         |
|           | 0,3                               | 5038848                            | 0                                  | 0                   | 465134                          |           | 55                | 30                   |



**FIGURA 36** - Resultado da simulação na sub-bacia 251.

Nesse caso o sistema também não foi capaz de apresentar uma alternativa que apresentasse uma melhora no índice de qualidade da sub-bacia afetada como mostra a Figura 37.



**FIGURA 37 - Resultado Suporte a Decisão sub-bacia 251.**

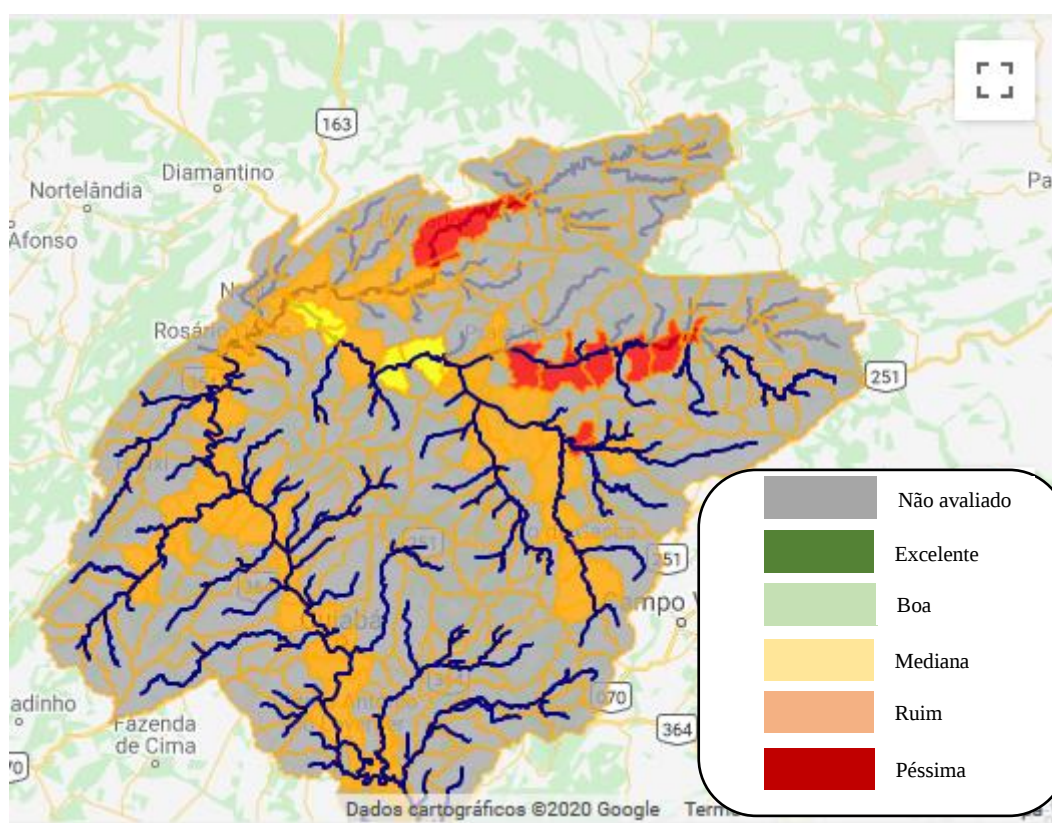
Acredita-se que a quantidade muito limitada de alternativas incluídas em cada grupo não gerou uma diminuição na poluição difusa das sub-bacias envolvidas grande o suficiente para elevar esse índice de qualidade na sub-bacia 338 a jusante.

#### 4.2.2 Uso do SWAT\_Gestão na análise de alterações por cargas de poluição difusa e pontual

##### 4.2.2.1 Cenários Base e Atual

Para configurar as simulações do EC2 foi alterada a forma de geração dos valores de referência que envolvem o Cenário de Base e o Atual. Neste EC2, os valores de referência foram calculados através das cargas medianas dos constituintes determinadas a partir de simulações mensais com o SWAT para um período de 10 anos usando o Cenário Base. Foram excluídos todas fontes de poluição pontual / captação e os HRUs com UOT predominante de plantio e pecuária foram alteradas para vegetação natural de Cerrado. Outra informação importante é que nesse estudo de caso não foram sequer analisadas sub-bacias com vazão média inferior a 20 m³/s. A justificativa para isso deve-se principalmente à parametrização e calibração do modelo SWAT original, que mostrou estimativas de cargas / concentrações inconsistentes em canais com pequenas áreas de contribuição a montante.

Estas medianas do Cenário Base são em seguida comparadas com os valores mensais dos constituintes do CCME-WQI simulados para o Cenário Atual resultando assim no CCME-WQI das sub-bacias na situação atual (Figura 38).



**FIGURA 38** - Cenário Atual do CCME-WQI (seis constituintes) na Bacia do Rio Cuiabá no EC2.

Visualizando a Figura 38 percebe-se que usar as medianas em uma simulação mensal de 10 anos produziu valores de referência mais restritivos que usar o mês mais seco em uma simulação de 1 ano como no caso do EC1. No EC2 o Cenário Atual somente 83 das 338 sub-bacias foram analisadas com 9 sub-bacias recebendo a classificação de péssimo nas regiões ao norte da bacia e próximo das cabeceiras dos rios onde ainda não há vazão suficiente para diluir as poluições pontuais e difusas lançadas a montante. Três sub-bacias possuem a classificação de mediana e estão localizadas próximo ao Lago do Manso com as outras sub-bacias recebendo a classificação de ruim. Usando essa forma de estimar os valores de referência nenhuma sub-bacia da bacia do Rio Cuiabá recebeu classificação excelente ou boa.

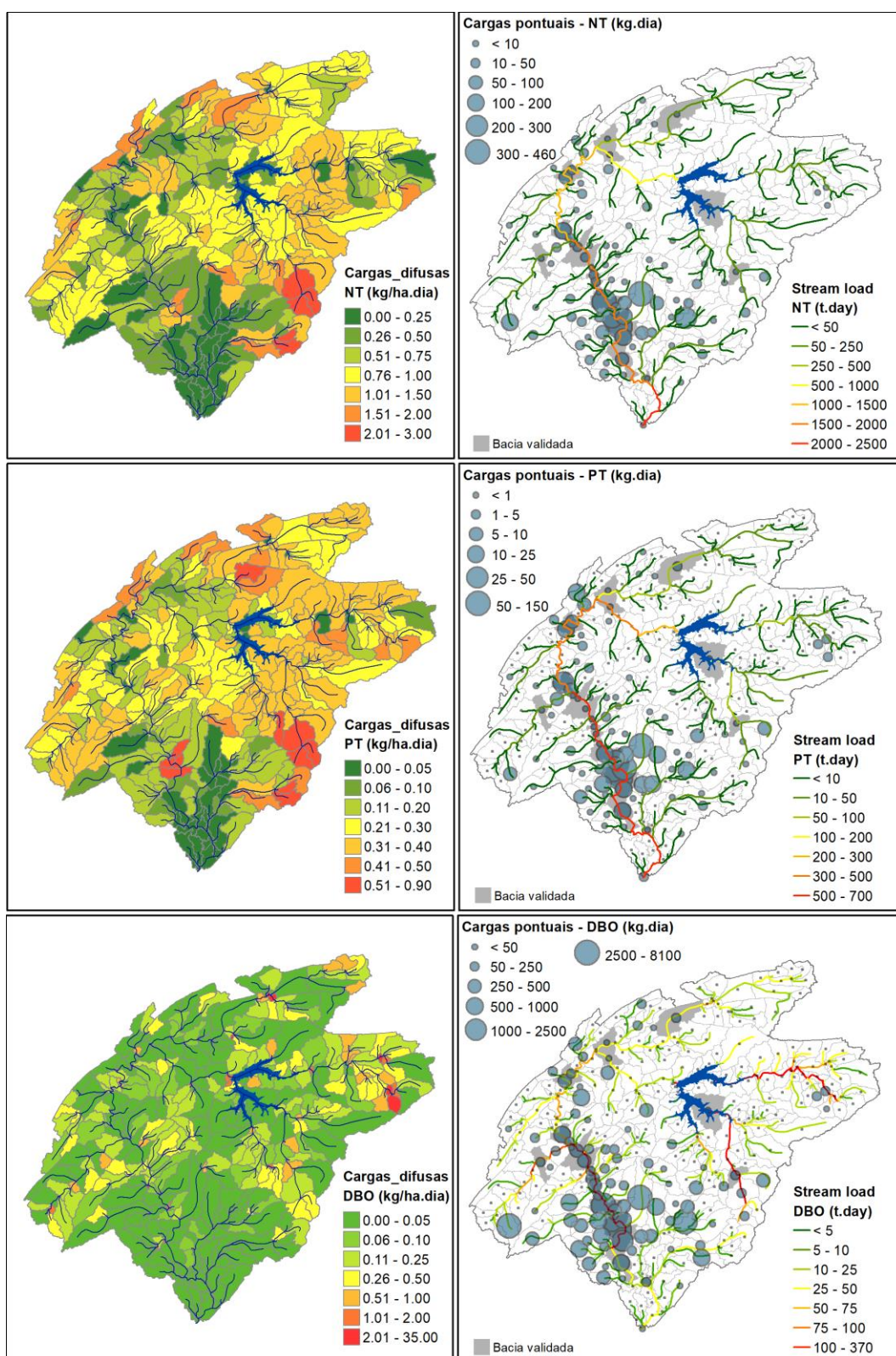
#### **4.2.2.2 Cargas lançadas e configuração do estudo de caso (EC2)**

Neste estudo de caso foi avaliada a sensibilidade do índice de qualidade CCME-WQI de algumas sub-bacias selecionadas frente ao aumento e diminuição nas cargas de poluição tanto pontuais quanto difusas de Nitrogênio, Fósforo e DBO e assim a sua aptidão de servir como indicador dentro do SSD. Foi examinado também

o quanto as alternativas propostas pelo módulo de SSD conseguem minimizar os impactos negativos das alterações do CCME-WQI em caso de aumento das cargas poluidoras. Visou desta forma uma avaliação da aplicabilidade do SWAT\_Gestão para um domínio que pode ser considerado típico para dar suporte na elaboração de um PRH, estruturando estratégias integradas para diminuir os impactos sobre os RH.

No SWAT as características físicas e químicas de lançamentos pontuais devem ser informadas como entradas que são repassadas na entrada do vértice do canal principal de cada sub-bacia. Já as cargas poluentes da poluição difusa que chegam à rede hidrográfica por descarga superficial e subsuperficial é simulada nos módulos do SWAT que representam processos da fase terrestre do ciclo hidrológico. O somatório das duas cargas é repassado para a simulação na entrada da fase aquática do canal principal de cada sub-bacia. A figura 39 mostra uma representação das cargas de lançamento tanto difusas como pontuais em todas as sub-bacias da Bacia do Rio Cuiabá para o Cenário Atual como informadas (fontes pontuais) ou simuladas (fontes difusas) no projeto original do SWAT utilizado nos estudos de caso.

As cargas difusas dos principais nutrientes são geradas principalmente nas regiões de Planalto da bacia nas cabeceiras de afluentes do Rio Manso com usos agropecuários intensos. Nessas áreas são alcançadas cargas até cerca de 3 kg/ha.dia de NT e 0.9 kg/ha.dia de PT. Nas cabeceiras do Rio Cuiabazinho, onde os usos são geralmente menos intensos, o aporte para os rios pode ser favorecido pelas declividades mais acentuadas. Áreas secundárias com aporte de nutrientes mais elevados, principalmente do Fósforo Total ( $PT > 0.5$  kg/ha.dia), são sub-bacias que possuem áreas urbanizadas maiores tais como a área metropolitana de Cuiabá e Várzea Grande.



**FIGURA 39** - Contribuições difusas e pontuais de NT, PT e DBO e cargas anuais transportadas na rede hidrográfica no cenário atual da bacia do Rio Cuiabá.

Os aportes difusos de matéria orgânica (DBO) são baixos, geralmente abaixo de 2 kg/ha.dia e com distribuição heterogênea na bacia. Picos acima desses valores em algumas cabeceiras refletem uso intenso de pecuária e instalação de grandes aviários que nesta parametrização do projeto SWAT original são representados por fontes difusas.

As principais fontes pontuais de poluição concentram na Depressão Cuiabana, principalmente na região metropolitana de Cuiabá/Várzea Grande, onde ocorrem os importantes lançamentos de esgoto domiciliar insuficientemente tratado, além da concentração das atividades industriais. Em termos relativos com a geração total das cargas na bacia os lançamentos de PT e DBO são mais relevantes do que as de NT. De uma forma geral, as estimativas absolutas devem ser consideradas conservadoras já que são baseadas em levantamentos entre 2010 e 2015. Análises recentes de relatórios de automonitoramento (não publicado) indicam que os lançamentos pontuais pela atividade industrial podem extrapolar as estimativas aqui demonstradas.

As cargas de NT transportados nos canais principais acompanham o aumento da descarga líquida ao longo da bacia. Já pequenas porções do PT, nutriente geralmente de baixa disponibilidade na região (SILVA, 2014), são assimiladas após passar por regiões com maior volume de lançamentos como na bacia em estudo da região metropolitana de Cuiabá e Várzea Grande. Esse efeito é ainda muito mais expressivo no caso do DBO indicando que o rio Cuiabá ainda possui capacidade de autodepuração intacta.

Foram escolhidas para a análise desse estudo de caso (EC2), sub-bacias que possuíam uma vazão média anual superior a 20 m<sup>3</sup>/s e que incluem usuários cadastrados com lançamento de efluentes. Esses critérios foram adotados porque avaliações preliminares (ALKMIM, 2017) indicam que ocorram superestimativas sistemáticas na simulação das cargas principalmente nas cabeceiras do Planalto. Das 338 sub-bacias cadastradas nesta configuração do SWAT para a bacia hidrográfica do Rio Cuiabá apenas 83 sub-bacias cumpriam esse primeiro critério de seleção.

O segundo critério de seleção foi separar dentre essas 83 sub-bacias aquelas com usuários cadastrados para lançamento de efluentes. De acordo com esse segundo

critério foram incluídas 27 sub-bacias a serem analisadas. A vazão média anual dos canais principais e a média anual das cargas diárias geradas por poluição difusa e pontual estão listadas na Tabela 12. A distribuição geográfica destas sub-bacias é representada na Figura 30 (item [4.1](#)).

**Tabela 12 -** Cargas diárias de Fósforo, Nitrogênio e DBO geradas por fontes difusas e pontuais nas sub-bacias avaliadas no estudo de caso 2 (EC2).

| Sub-Bacia | Vazão Média (m3/dia) | Poluição Difusa  |                     |              | Poluição Pontual  |                     |                           |                          |                              |                 |              |
|-----------|----------------------|------------------|---------------------|--------------|-------------------|---------------------|---------------------------|--------------------------|------------------------------|-----------------|--------------|
|           |                      | Fósforo (kg/dia) | Nitrogênio (kg/dia) | DBO (kg/dia) | Retirada (m3/dia) | Lançamento (m3/dia) | Fósforo Orgânico (kg/dia) | Fósforo Mineral (kg/dia) | Nitrogênio Orgânico (kg/dia) | Amônia (kg/dia) | DBO (kg/dia) |
| 31        | 3703113,70           | 3050,60          | 4027,52             | 457376,25    | 1000,00           | 338,614             | 0,349                     | 0,753                    | 2,630                        | 4,730           | 114,840      |
| 46        | 6479361,79           | 4798,94          | 7284,88             | 472570,60    | 0,00              | 2334,184            | 0,015                     | 0,035                    | 0,407                        | 0,951           | 30,000       |
| 66        | 16415568,00          | 13296,39         | 23183,64            | 182505,28    | 0,00              | 841,871             | 0,013                     | 0,031                    | 0,359                        | 0,837           | 26,400       |
| 87        | 23983524,00          | 18668,96         | 34088,51            | 437989,66    | 0,00              | 4140,191            | 2,134                     | 4,542                    | 10,209                       | 14,030          | 203,120      |
| 108       | 24218812,80          | 18798,30         | 35555,06            | 397754,91    | 0,00              | 5408,760            | 6,730                     | 14,300                   | 29,610                       | 37,686          | 357,360      |
| 144       | 8483191,20           | 4708,59          | 10249,56            | 744347,76    | 1000,00           | 1644,108            | 0,003                     | 0,007                    | 0,081                        | 0,190           | 6,000        |
| 188       | 27150033,60          | 19868,62         | 40149,92            | 247005,76    | 0,00              | 3406,060            | 10,298                    | 21,884                   | 45,313                       | 57,671          | 517,160      |
| 189       | 30590712,00          | 21805,98         | 43075,84            | 554542,62    | 0,00              | 259,140             | 1,721                     | 3,656                    | 7,570                        | 9,635           | 93,880       |
| 193       | 30596716,80          | 21801,12         | 43125,89            | 543876,39    | 9000,00           | 61,180              | 0,280                     | 0,594                    | 1,231                        | 1,566           | 17,480       |
| 203       | 31028918,40          | 22111,45         | 43575,91            | 577525,06    | 0,00              | 14361,594           | 0,148                     | 0,344                    | 4,007                        | 9,350           | 295,053      |
| 209       | 3436677,36           | 2013,63          | 2320,05             | 494007,68    | 0,00              | 7851,960            | 1,811                     | 3,852                    | 8,377                        | 11,180          | 146,096      |
| 213       | 3071649,60           | 1759,10          | 2010,68             | 523756,40    | 0,00              | 8646,255            | 0,076                     | 0,176                    | 2,054                        | 4,792           | 151,198      |
| 218       | 31397673,60          | 22446,45         | 44259,10            | 628952,98    | 0,00              | 11444,541           | 0,137                     | 0,319                    | 3,714                        | 8,666           | 273,462      |
| 220       | 32369486,40          | 23126,54         | 45677,20            | 677588,67    | 0,00              | 9002,587            | 0,098                     | 0,229                    | 2,668                        | 6,224           | 196,412      |
| 230       | 2903274,00           | 1693,40          | 5829,77             | 267206,15    | 0,00              | 2467,345            | 0,144                     | 0,316                    | 1,726                        | 3,580           | 102,000      |
| 237       | 33218827,20          | 24021,34         | 46943,74            | 860710,29    | 0,00              | 12469,014           | 0,245                     | 0,571                    | 6,642                        | 15,498          | 489,053      |
| 248       | 33344445,60          | 24128,31         | 47343,26            | 818001,91    | 0,00              | 3320,537            | 0,132                     | 0,308                    | 3,586                        | 8,366           | 264,000      |
| 253       | 33490022,40          | 24182,18         | 47682,08            | 748843,27    | 1000,00           | 10885,765           | 0,088                     | 0,206                    | 2,402                        | 5,604           | 176,843      |
| 263       | 33915103,20          | 24390,68         | 48494,80            | 656471,05    | 0,00              | 36617,899           | 4,593                     | 10,596                   | 111,440                      | 257,295         | 8052,042     |
| 264       | 33917076,00          | 24333,93         | 48990,73            | 546150,00    | 0,00              | 4542,880            | 4,910                     | 10,433                   | 21,603                       | 27,495          | 258,080      |
| 267       | 33992395,20          | 24537,39         | 49462,11            | 542902,68    | 0,00              | 974,480             | 2,328                     | 4,947                    | 10,243                       | 13,037          | 128,090      |
| 276       | 34614064,80          | 24874,27         | 50048,83            | 543645,67    | 0,00              | 9566,145            | 20,504                    | 43,583                   | 91,427                       | 117,890         | 1357,042     |
| 279       | 34626578,40          | 24912,76         | 50587,95            | 473921,46    | 0,00              | 25806,740           | 16,065                    | 34,139                   | 70,687                       | 89,965          | 874,728      |
| 291       | 35405402,40          | 25760,67         | 51991,16            | 610173,79    | 0,00              | 20477,306           | 46,591                    | 99,016                   | 206,228                      | 264,028         | 2959,395     |
| 302       | 35431963,20          | 25733,29         | 52359,45            | 534407,48    | 0,00              | 32599,429           | 7,310                     | 15,619                   | 41,507                       | 64,652          | 1210,052     |
| 321       | 35692221,60          | 25867,89         | 53373,62            | 413552,44    | 0,00              | 16005,838           | 5,638                     | 12,011                   | 28,202                       | 40,192          | 621,469      |
| 325       | 37394164,80          | 26319,80         | 58686,95            | 158243,09    | 0,00              | 5916,777            | 0,072                     | 0,168                    | 1,956                        | 4,563           | 144,000      |
| 338       | 39186936,00          | 27551,69         | 62782,87            | 163610,59    | 0,00              | 120,540             | 0,551                     | 1,171                    | 2,425                        | 3,086           | 34,440       |

Foram gerados em seguida cinco simulações para cada Sub-bacia com alteração das cargas de lançamento pontual e difusa variando de 60% até 140% em relação ao Cenário Atual com intervalos de 20%.

#### 4.2.2.3 Sensibilidade do CCME-WQI frente alterações das cargas lançadas

Para cada uma dessas simulações foi calculado o índice de qualidade CCME-WQI, cujas variações são apresentadas na figura 40 (25 sub-bacias) e 41 (02 sub-bacias com características de CCME-WQI bem distintas) que contêm um conjunto de gráficos multidimensionais para cada sub-bacia avaliada. O eixo x é representado pelo percentual usado da soma dos lançamentos pontual e difuso onde a marca de 100% representa a carga de lançamento existente no Cenário Atual. O eixo y

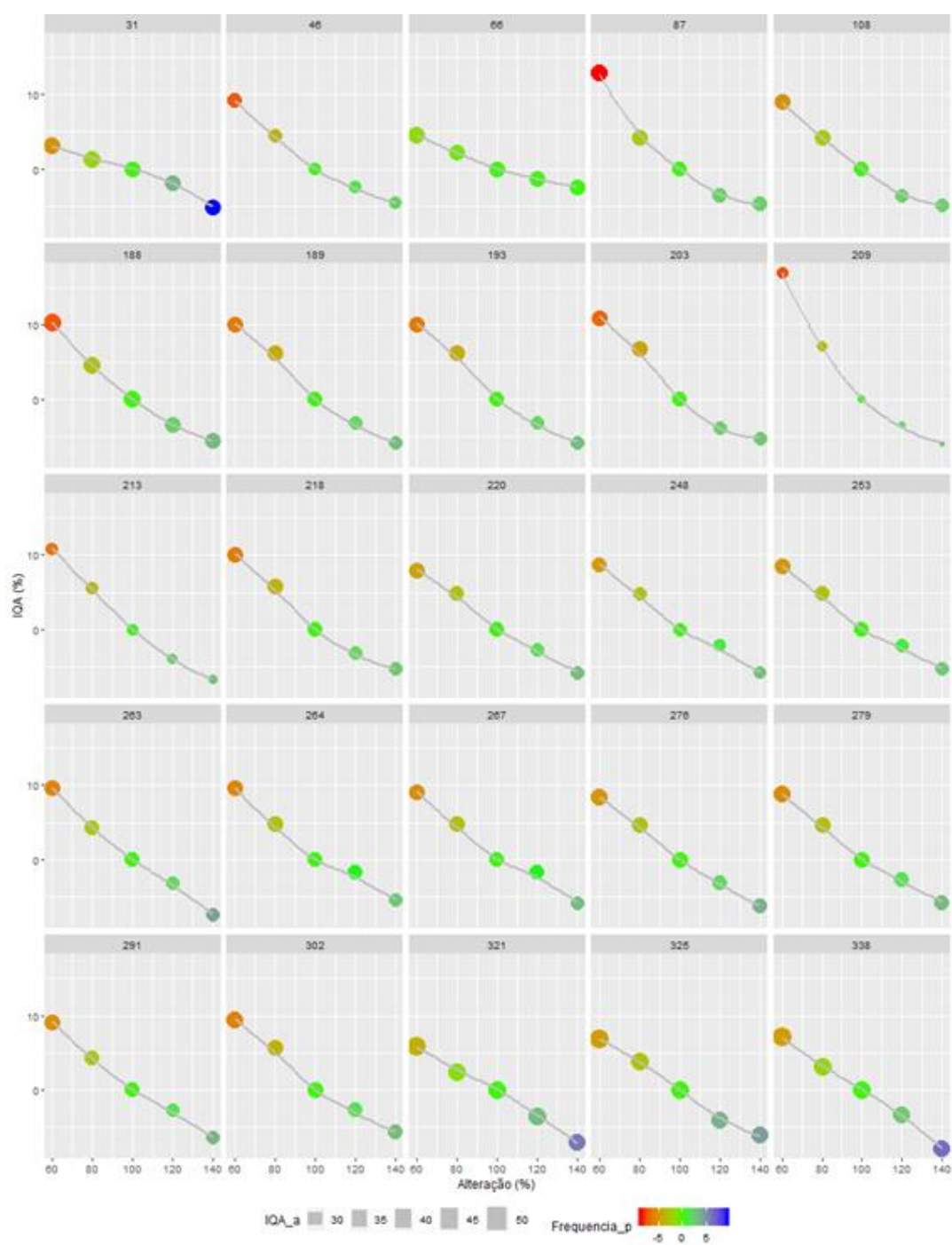
representa a diferença percentual dos índices de qualidade CCME-WQI para cada simulação gerada onde o valor 0 (Zero) representa o valor no Cenário Atual.

O tamanho dos pontos varia em função do valor absoluto do CCME-WQI (IQA\_a) e a cor visualiza a variação percentual da frequência de medições que ultrapassaram os valores de referência obtidos pela comparação com o Cenário Base (Frequencia\_p), um dos 03 itens calculados para confecção do CCME-WQI.

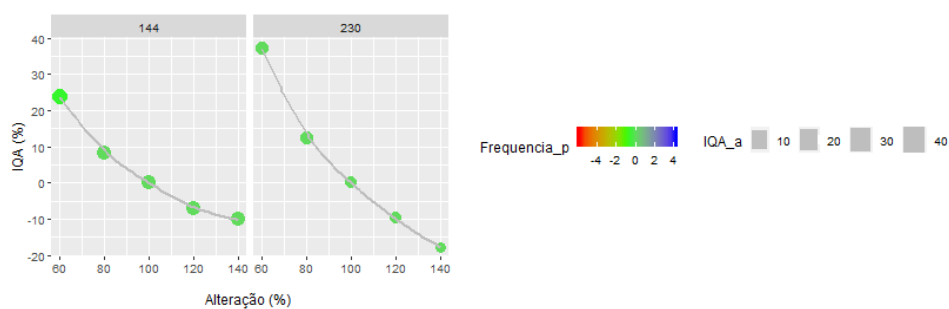
É possível verificar que a variação percentual das cargas difusa e pontual lançadas em cada uma das sub-bacias avaliadas causam em todas as sub-bacias uma diminuição gradativa do índice de qualidade de água CCME-WQI. Utilizando os três constituintes NT, PT e DBO a proporção na alteração percentual entre as mudanças das cargas totais e do CCME-WQI é em média de 4 para 1.

Sub-bacias que possuem no Cenário Atual (100%) possuem cargas poluidoras baixas e valores absolutos do CCME-WQI favoráveis (representadas por símbolos maiores), ocasionando alteração dos valores de CCME-WQI relativamente menor entre os cenários. A sub-bacia 31, p.ex. possui no Cenário Atual um CCME-WQI de 42,5 que diminui em cerca de 1.9% e 5% para um aumento de 20% e 40% nas cargas poluidoras, respectivamente.

Da mesma forma, sub-bacias a jusante com vazões elevadas e com efeitos de diluição forte tendem a ter valores de CCME-WQI mais altos e variações entre os cenários menores. A sub-bacia 321 a jusante da área metropolitana de Cuiabá e Várzea Grande possui o valor de CCME-WQI mais alto das sub-bacias analisadas (47,8). É importante lembrar que os valores do CCME-WQI não se referem a cargas acumuladas por sub-bacias a montante, mas das mudanças das cargas em função das contribuições da própria sub-bacia.



**Figura 40** - Variação do IQA CCME-WQI em cenários de redução e incremento percentual das cargas em 25 sub-bacias de uso misto.

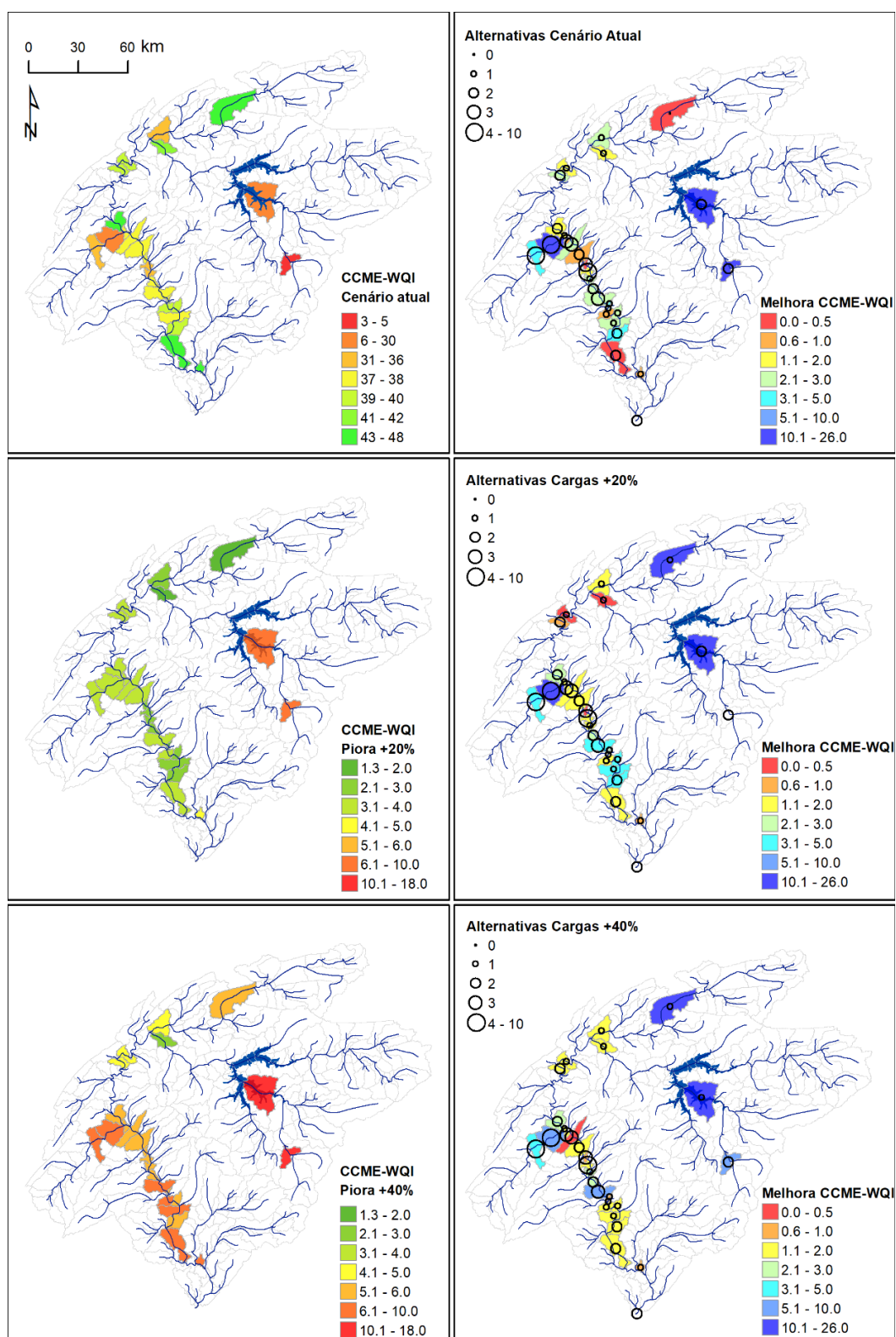


**FIGURA 41 -** Variação do IQA CCME-WQI em cenários de redução e incremento percentual das cargas em duas sub-bacias de uso principalmente agropecuário.

Ao contrário, os valores absolutos do CCME-WQI são muito baixos e as alterações dos valores do CCME-WQI expressivas em sub-bacias cujas cargas são predominantemente provenientes da atividade agropecuária (Figura 41). A sub-bacia 230, p.ex. possui um valor de CCME-WQI de somente 3,4 devido a definição do Cenário Base no qual HRUs com pecuária / lavoura são substituídos por um UOT da classe Cerrado. A alteração percentual em caso da diminuição das cargas é em 40% resulta em uma melhoria de cerca de 40% no CCME-WQI. Como a sub-bacia já se encontra em um estado bastante comprometido, um aumento de 40% nas cargas causa uma diminuição do CCME-WQI proporcionalmente menor (cerca de 20%).

#### **4.2.2.4 Desempenho do módulo de SSD em gerar propostas de redução de impactos**

A figura 42 demonstra para as sub-bacias avaliadas na coluna esquerda, consecutivamente, os padrões espaciais do CCME-WQI para o Cenário Atual e a diminuição do CCME-WQI nos cenários de aumento das cargas poluidoras em 20% e 40%, respectivamente.



**FIGURA 42** - CCME-WQI do Cenário Atual e sua diminuição no caso de aumento das cargas em 20% e 40% (coluna a esquerda). A coluna a direita mostra os respectivos melhorias percentuais do CCME-WQI alcançáveis pelas simulações alternativas pelo módulo de SSD e o número de alternativas encontradas.

Na coluna direita estão expostas as respectivas melhorias dos valores absolutos do CCME-WQI que podem ser alcançadas caso sejam acatadas as propostas de medidas compensatórias no melhor Cenário Alternativo gerado pelo SWAT\_Gestão. É exposto também o número de alternativas gerado pelo SWAT\_Gestão para diminuir os impactos gerados pelas cargas geradas nas respectivas sub-bacias.

Observa-se de forma geral a esperada relação inversa entre os valores do CCME-WQI e a capacidade do módulo de SSD em propor soluções para uma melhoria adicional dentro de uma sub-bacia. Assim, as taxas de possíveis melhorias aumentam nos cenários representando elevações percentuais das cargas introduzidas. Sub-bacias comprometidas na região do Planalto (p. ex. sub-bacia 231) mostram alto potencial de incrementar os seus valores do CCME-WQI. Sendo a origem da degradação principalmente de cargas geradas por fontes difusas, o número de alternativas disponíveis para alcançar esta melhoria são limitadas isso, evidentemente, também em função da configuração atual do módulo SSD que tem nesse caso a disposição somente dois tipos de medidas (alteração de UOT, incremento de faixas ripárias de preservação permanente) para amenizar a degradação do CCME-WQI. O limitado número total (3) de possíveis ações compensatórias causa nos cenários apresentados que basicamente não houve alteração no número de alternativas propostas pelo módulo SSD entre os três cenários apresentados.

## 5. DISCUSSÃO

A gestão ambiental tem como uma de suas atribuições a equalização das demandas socioeconômicas das sociedades com a sustentabilidade do meio ambiente que as abriga (RIOS, 2000). É uma atribuição complexa levando-se em consideração as informações necessárias para entender e descrever adequadamente todos os processos que determinam o ciclo hidrológico e as interações socioambientais que o modulam tanto na escala de espaço quanto de tempo (PAZ, 2004).

A área de recursos hídricos, inserida dentro da gestão ambiental, compartilha das mesmas dificuldades. Essas dificuldades já são observadas no processo de coleta dessas informações que em geral ocorrem em ambiente inóspito carente de infraestrutura de transporte e de comunicação. Além disso, como os processos ambientais tendem a ter um comportamento regular dentro de uma certa periodicidade é necessário que essas coletas também ocorram regularmente ao longo de um determinado período de tempo. Tudo isso dificulta o trabalho de coleta dessas informações e a consequência é uma grande quantidade de falhas de dados podendo muitas vezes atrapalhar a sua correta análise.

Mesmo quando é possível administrar bem as coletas, a quantidade de informação demandada para entender o funcionamento de sistemas hídricos na sua integralidade são de difícil assimilação para a mente humana dos gestores que, sem o auxílio de Sistemas de Informação como preconiza a PNRH, estão sujeitos de usar um alto grau de subjetividade na tomada de suas decisões por simplesmente não ter capacidade cognitiva de analisar sozinho tantos números. Com isso, essas decisões podem se mostrar equivocadas e gerar questionamentos não somente em termos técnicos, mas também nas esferas econômicas, jurídicas e/ou políticas e se tornar fonte de conflitos entre usuários e segmentos da sociedade organizada e não-organizada (VILELA et al, 2006).

O modelo hidrológico SWAT pode ser usado para preencher essas lacunas pois permite simular os principais processos físicos que descrevem o comportamento do ciclo da água e dos elementos por ela transportados dentro de uma Bacia Hidrográfica, gerando assim um conjunto de informações consistente de forma simples permitindo aos gestores não só estimar os valores passados e que foram

incorretamente coletados como também estimar valores futuros levando em consideração as alterações na dinâmica desse ecossistema. Dessa forma o modelo SWAT torna-se uma ferramenta interessante para a gestão ambiental por possibilitar a simulação de ocorrência de eventos específicos e analisar do comportamento da bacia hidrográfica.

Porém mesmo o SWAT, quando usado de forma *standalone*, apresenta as suas limitações e desvantagens. O gerenciamento das informações de entrada, necessárias para a sua execução e a interpretação das suas saídas múltiplas ainda são complexas para gestores de RH sem amplos conhecimentos multidisciplinares. A quantidade ainda excessiva de informações geradas nos resultados das suas simulações aliada ao seu caráter de propósito para o seu uso geral dificultam a sua adoção como ferramenta de auxílio à gestão ambiental.

Para facilitar essa tarefa a proposta desse trabalho foi de apresentar um Sistema de Informação para suporte de tomada de decisões desenvolvido para utilizar o SWAT como um motor de simulações agregado. Dessa forma esse sistema pode alterar as informações de entrada do SWAT de forma controlada, chamá-lo para executar as suas simulações e no final recepcionar e tratar os seus resultados, apresentando aos gestores informações sintetizadas e específicas para dar subsídio nas suas atribuições como, por exemplo, julgar tecnicamente pedidos de Outorga de RH ou criar ou aperfeiçoar Planos de Recursos Hídricos tornando assim as decisões e/ou estratégias desenvolvidas mais assertivas e transparentes.

A forma encontrada nesse trabalho para abstrair a grande quantidade de informação contida no resultado de simulações do SWAT foi agregá-los em um índice de qualidade flexível que utiliza a metodologia CCME-WQI gerando um único valor por sub-bacia. Com isso é possível estabelecer uma comparação entre o índice de qualidade CCME-WQI do Cenário Atual de uma determinada sub-bacia e o índice de qualidade CCME-WQI dessa mesma sub-bacia em um cenário hipotético criado a partir de uma alteração em sua dinâmica como a inclusão de uma nova fonte de poluição atual. A partir dessa comparação é possível analisar, se a diferença entre esse índice de qualidade é aceitável ou não segundo as metas a serem seguidas pelos gestores.

Além disso o trabalho objetiva apresentar um módulo de Suporte a Decisão para criar cenários alternativos que propõe, a partir da análise de um conjunto predefinido de medidas compensatórias, a efetivação de alterações (Cenários Alternativos) minimizando os impactos previstos pelo CCME-WQI do Cenário Analisado (inserção de uma captação/fonte pontual de poluição, aumento percentual das cargas).

## **5.1 CONCEPÇÃO E IMPLEMENTAÇÃO**

Durante o desenvolvimento do projeto algumas decisões tiveram que ser tomadas para enfrentar restrições/dificuldades encontradas ao longo do tempo e que modificaram a proposta original do projeto. Nas seções abaixo estão descritas e discutidas as principais dessas modificações.

### **5.1.1 Integração com o executável do SWAT e não com uma biblioteca**

O projeto original previa compilar o código fonte do SWAT como uma DLL (*Dynamic-Link Library*) de forma que ele pudesse ser fortemente acoplado (CHAKHAR; MOUSSEAU, 2008) ao Sistema SWAT\_Gestão para gerar simulações de cenários. Essa abordagem traria vantagens como:

1. Diminuir a ocorrência de erros já que haveria maior controle dos valores de entrada e saída pelo Sistema SWAT\_Gestão
2. Possibilidade de execuções simultâneas onde cada instância do Sistema SWAT\_Gestão poderia executar a sua instância da biblioteca SWAT de forma autônoma
3. Melhora da performance decorrente do melhor controle de todos os processos internos.

Durante os trabalhos foi desenvolvido uma DLL e acoplada com sucesso no projeto. Na fase de testes, porém foi percebido que as saídas do modelo SWAT mostram diferenças se comparadas com os valores de saída gerada pela versão original do SWAT através de seu executável. Acredita-se que isso tenha ocorrido por falhas no gerenciamento das informações armazenadas na memória, onde um valor acabava por sobrescrever outro indevidamente. Uma causa para esse comportamento poderia ser que o SWAT é compilado em uma linguagem estruturada mais antiga

(FORTRAN), e não possui uma programação voltada para ter a característica de multitarefa.

Diante desse fato foi optado por um acoplamento fraco com baixo grau de dependência entre o sistema SWAT\_Gestão e o modelo SWAT, realizado a partir de uma chamada *shell* do SWAT\_Gestão ao programa SWAT mantendo-os separados entre si e fazendo a interligação somente via seus arquivos de entrada e saída.

### **5.1.2 Determinação dos valores de referência**

Para que o sistema SWAT\_Gestão possa realizar as suas comparações usando o método CCME-WQI é preciso ter valores de referência para cada constituinte (vazão, parâmetros de qualidade de água etc.) a ser avaliado.

Inicialmente cogitou-se em usar os valores de referência segundo a Resolução CONAMA 357/2005 referentes a água doce com enquadramento 2.

Essa resolução determina valores limites para alguns poluentes também usados na metodologia CCME-WQI proposta nesse trabalho, tais como Nitrogênio Total ( $\leq 5$  mg/l), Fósforo Total ( $\leq 0,050$  mg/l), DBO ( $\leq 5$  mg/l) e Oxigênio Dissolvido ( $\geq 5$  mg/l). Por ser uma norma relacionada estritamente com a qualidade de água, não possui valores de referência para vazão e sedimentos. Além disso os valores limites para nitrogênio e fósforo seguem o padrão internacional (ROSO, 2005) que leva em consideração a realidade de países europeus com concentrações comumente superiores desses poluentes, do que geralmente encontrados nos rios brasileiros. A Resolução é balizada também na utilização da água para fins múltiplos e não confeccionada para detectar impactos gradativos sobre mudanças eco hidrológicas de rios.

Em função dessas limitações, optou-se por um método de obtenção dinâmica dos valores de referência de acordo com Cenários Base simulados para cada sub-bacia, refletindo assim a sua especificidade em condições pristinas.

Para os dois estudos de caso foram geradas duas simulações com resolução temporal mensal, porém houve variações no cálculo dos valores de referência. No estudo de caso 1 (EC1), as cargas de referência foram determinadas para o mês mais seco do Cenário Base. Constitui uma abordagem usual embasar concessões de

Outorga em vazões mínimas ( $Q_{95}$ ,  $Q_{7,10}$ ), já que esses períodos comumente apresentam picos na concentração de poluentes devido a diluição reduzida nos canais. Já para o estudo de caso 2 (EC2) foi utilizada como referência a vazão mediana da série de dez anos do Cenário Base, representando assim as condições médias em termos de transporte de cargas / concentrações para cálculo do CCME-WQI. Estudos eco-hidrológicos para subsidiar PRH podem se referir a concentrações como também a análise das cargas, por exemplo para obter balanços de massas de constituintes químicos ou da produção/transporte de sedimentos.

Em ambos os casos, os valores de referência são comparados com cada valor mensal da série do Cenário Atual, gerando assim os valores do CCME-WQI. Para ambas as abordagens, entretanto, os valores de referência são sensivelmente mais restritivos do que os limites definidos pela Resolução Conama 375/2005.

### **5.1.3 Concepção do módulo de suporte a decisão**

Por questão de praticidade e performance algumas limitações bastante restritivas foram definidas no processo de desenvolvimento do sistema SWAT\_Gestão nessa etapa. Essas limitações se referem principalmente na quantidade máxima de alternativas por grupo de soluções criadas pelo módulo de Suporte a Decisão, que são de três alternativas, além também na quantidade de tipos diferentes de alternativas utilizadas que também são só 3 tipos diferentes.

Outro ponto importante é que a revisão bibliográfica discorre sobre a ampla utilização de métodos MCDM para realizar categorizações e ordenações de alternativas em SSDs. Durante o desenvolvimento optou-se por, ao invés de usar um método MCDM existente, adaptar o método CCME-WQI como um método de classificação que também poderia ser usado para auxiliar a tomada de decisão.

Isso ocorreu porque ao usar o método CCME-WQI, que foi inicialmente idealizado para gerar um índice de qualidade de água para os cenários de uma mesma sub-bacias, agrega um conjunto flexível dos constituintes em um único resultado com valor de 0 a 100 ordenável fazendo um trabalho semelhante ao feito com os próprios métodos MCDM existentes.

#### **5.1.4 Versão 2009 do SWAT como componente do sistema SWAT\_Gestão**

Quando o desenvolvimento do SWAT\_Gestão foi iniciado já existia disponível a versão 2012 do modelo SWAT (<http://swat.tamu.edu>). O projeto SWAT original da bacia parametrizado e calibrado por Alkmim (2017), porém, foi inteiramente desenvolvido e calibrado usando a versão 2009. Para garantir que testes comparativos entre as saídas do projeto SWAT original e do acoplamento no SWAT\_Gestão fossem afetados por eventuais alterações entre as versões, optou-se por usar a mesma versão. No princípio, porém, não há qualquer outra contraindicação para que seja usada uma versão atualizada do modelo SWAT.

#### **5.1.5 Definições sobre a arquitetura do sistema**

No que se refere a arquitetura do sistema, o sistema SWAT\_Gestão aproveita o fato de o modelo SWAT, desenvolvido na linguagem Fortran e disponibilizado no site do projeto SWAT (<http://swat.tamu.edu>), utilizar arquivos textos formatados tanto para fornecer as informações de entrada ao modelo quanto para obter o resultado dos cálculos gerados por ele. A integração então baseia-se em alterar os arquivos de entrada necessários, chamar o modelo SWAT através da execução de um executável com o código compilado do modelo e depois importar e analisar os arquivos de saída gerados por ele. Como o sistema SWAT\_Gestão foi desenvolvido para funcionar no ambiente WEB essa forma de integração não é a mais indicada pois dificulta uma das principais características dos ambientes WEB que é a possibilidade de mais de uma sessão ser executada ao mesmo tempo. A principal limitação nesse caso está na forma como o modelo SWAT foi programado no Fortran, pelo menos na versão disponível no site, que não inclui códigos que permitam a chamada multitarefa. Uma nova versão totalmente revisada do modelo chamada SWAT+ (ARNOLD et al., 2018) promete uma melhor e mais flexível representação espacial das interações e processos que ocorrem em uma Bacia Hidrográfica.

A utilização do SWAT+ pode permitir uma integração mais concisa com o sistema SWAT\_Gestão trazendo consigo um grande ganho de performance e possibilitando o aumento de funcionalidades disponíveis pelo sistema.

## 5.2 FUNCIONALIDADE DO SISTEMA NO CONTEXTO DO DOMÍNIO DE APLICAÇÃO

O sistema SWAT\_Gestão foi desenvolvido para disponibilizar a gestores de RH uma ferramenta para utilizar, sintetizar e subsidiar a interpretação das complexas saídas geradas pelo modelo hidrológico SWAT. É imperativo, porém, que o gestor disponha de um projeto SWAT, devidamente parametrizado, calibrado e validado, considerando que qualquer saída apresentada pelo SWAT\_Gestão depende primordialmente da qualidade e confiabilidade deste projeto SWAT base. Apesar de não ser frequentemente elencado nos estudos científicos, o SWAT é um modelo muito extenso e complexo que demanda um amplo conhecimento do seu funcionamento para alcançar simulações adequadas. Pequenas mudanças nas entradas ou na definição de parâmetros e variáveis, aparentemente irrelevantes ou despercebidos pelo o usuário iniciante, podem causar grandes incertezas e/ou erros sistemáticos nas simulações, tornando seus resultados espúrios.

Para validar a funcionalidade do SWAT\_Gestão nos seus domínios de aplicação, esse trabalho apresenta dois estudos de caso com objetivos específicos de interesse para a gestão de recursos hídricos. Da análise desses dois estudos de caso é possível perceber a utilidade da metodologia apresentada para auxílio a gestão de bacias hidrográficas segundo a lei 9433/1997.

No primeiro estudo de caso é analisado a sua aplicabilidade em situações de avaliar a conveniência ou não de permissão de inserção de uma nova captação e/ou, principalmente, de uma nova fonte de poluição pontual em uma sub-bacia, levando em consideração o seu possível impacto sobre a disponibilidade hídrica na sua sub-bacia e nas sub-bacias a jusante. No presente estudo, o termo da disponibilidade hídrica possui um significado mais amplo do que atribuído a ele no contexto da concessão de Outorga atualmente praticado no Brasil, que se baseia ou somente em características quantitativas (vazões mínimas estatísticas) (SILVA et al., 2015) ou incluindo um único parâmetro de qualidade de água (geralmente o DBO) na sua avaliação (PINHEIRO, R.B. et al., 2013; DA HORA, 2001).

Desta forma entende-se que o SWAT\_Gestão traz, em possibilitar a inclusão de um número basicamente ilimitado de critérios para julgar um pedido de concessão,

um avanço tecnológico relevante, já que a qualidade dos sistemas hídricos em muitas bacias hidrográficas do país não é primordialmente afetada pela falta de vazão ou da poluição orgânica. SILVA et al. (2019) mostra, em uma revisão recente, que a aplicação de ferramentas computacionais automatizadas para subsidiar a Outorga no Brasil é mínima.

Um protótipo de um SSD para Outorga foi desenvolvido por OLIVEIRA (2009) que utiliza a metodologia do DA HORA (2001) agregando-lhe uma solução de Suporte a Decisão baseado em lógica *fuzzy* e AHP visando não somente analisar, segundo a legislação vigente, a viabilidade ou não de se conceder uma licença de outorga para um empreendimento pleiteante, mas também procurando alternativas que permitam essa concessão.

Outro sistema promissor (chamado de SCBH) foi desenvolvido por Collischonn (2014), que foi inicialmente operacionalizado no portal da ANA (<http://scbh.ana.gov.br/>). Em acesso recente (06/2020) ao portal da ANA, o sistema se mostrou, porém inoperante. O SCBH, entretanto, não permite a busca e ponderação por alternativas a partir de medidas compensatórias nas sub-bacias afetadas, que possam viabilizar uma concessão caso ela extrapole limites de disponibilidade hídrica.

O estudo de caso 1 apresentado nesta tese expõe a importância da capacidade do SWAT\_Gestão em incluir por geolocalização novos possíveis empreendimentos, principalmente no longo prazo, partindo do pressuposto que as demandas múltiplas pelo uso dos RH tendem a aumentar. Foram por exemplo detectados em uma inclusão de um conjunto de empreendimentos até 30 alternativas a serem avaliadas, que poderiam minimizar o impacto sobre a disponibilidade quantitativa-qualitativa nas sub-bacias afetadas. Assim, pode ser testado, a inclusão de um mesmo empreendimento cujo licenciamento está sendo solicitado, causaria impacto menos severo, se implantado em outro trecho da bacia em estudo.

De forma geral, os SSDs para Outorga de RH propostos até o momento no Brasil utilizam abordagens altamente simplificadas para a simulação da qualidade de água. As concentrações do DBO nos cursos de água são baseadas numa simplificação do modelo de Streeter-Phelps (Collischonn 2014) e os nutrientes como nitrogênio e

fósforo, quando estimados, não levam em conta a transformação desses nutrientes dentro dos corpos hídricos. Para determinar a disponibilidade qualitativa considera-se exclusivamente lançamentos por fontes pontuais por causa principalmente da alta demanda computacional que prejudicaria a agilidade de um SSD para Outorga (Collischonn, 2014).

O SWAT\_Gestão aproveita-se do modelo SWAT para sobrepor a essas limitações permitindo assim a simulação de aportes difusas. Para estimativa desses aportes, o SWAT dispõe de módulos processuais sofisticados para descrever a fase terrestre do sistema hídrico permitindo a simulação da geração dos aportes em função de diferentes características pedológicas, UOT e tipos de manejo. Além disso o SWAT (ARNOLD et. al., 2012) detalha os processos de transformação dos nutrientes dentro dos corpos hídricos permitindo a simulação de processos de eutrofização.

No estudo de caso 2 (EC2) apresentado nesse trabalho foi possível observar as vantagens dessa abordagem. Como exposto no estudo de caso 2 deste trabalho (EC2), as contribuições difusas possuem importância crucial na geração de cargas poluentes na bacia do Rio Cuiabá. Isso não só foi detectado para as áreas agrícolas da bacia, mas também em sub-bacias, onde foram parametrizados HRUs com predominante uso urbano. Ou seja: o fato de um novo lançamento pontual extrapolar os limites da sustentabilidade de um manancial pode ocorrer muito mais em função de outros usos preexistentes (que se manifestam na geração de cargas difusas), do que em função do próprio lançamento novo.

### **5.3 LIMITAÇÕES DO SWAT\_GESTÃO**

A concessão ou não de uma Outorga deve considerar os usos já outorgados a montante e a jusante de uma determinada seção do curso de água de um novo empreendimento (IGAM, 2010a). Ao contrário do SCBH (Collischonn (2014), o SWAT\_Gestão, na sua implementação atual, avalia no seu módulo de SSD somente impactos dentro da própria sub-bacia e em sub-bacias a jusante. Foi optado por essa característica, principalmente para agilizar os volumosos cálculos invocados pelo módulo SSD, na busca por alternativas que minimizam os impactos sobre o CCME-

WQI de um canal principal. Cada alteração de uma medida compensatória permitida, demanda uma nova simulação SWAT para conhecer os efeitos sobre as sub-bacias afetadas. Entende-se, entretanto, que em uma futura instalação do sistema em um ambiente computacional de alto desempenho, essa desvantagem não prevaleceria, mesmo no estudo de bacias de usos mais complexos. Como o SWAT\_Gestão importa e armazena toda topologia da rede hidrográfica, o sistema está computacionalmente preparado e projetado para futuramente considerar no seu módulo SSD também a influência de cargas provenientes de lançamentos pontuais e de aportes difusas a montante.

Inúmeros ensaios realizados durante o desenvolvimento e teste, não descritos em detalhe nesta tese, mostraram que a aplicação operacional do SWAT\_Gestão ainda demanda de inúmeros ajustes. Isso se refere principalmente ao cálculo do CCME-WQI, na seleção dos seus constituintes e na definição dos Cenários Base. Como já salientado, as validações apresentadas nos estudos de caso foram dificultadas pela parametrização e calibração do projeto SWAT original utilizado, que apresentou ainda inconsistências nas suas saídas em sub-bacias com baixas vazões ou pequenas áreas de contribuição.

Ao contrário do OUTORGA-WEB, o SWAT\_Gestão não implementa um método MCDM após a geração do índice CCME-WQI para subsidiar a tomada de decisão, o que se mostrou viável na situação atual da bacia (vide 5.1). Entende-se, entretanto, que aumentando o número de constituintes, grupos de usuários e alternativas a serem avaliadas, o uso exclusivo do CCME-WQI como critério na tomada de decisão pode se tornar frágil na tentativa de resumir todas as características eco-hidrológicas relevantes de uma sub-bacia e os impactos diferenciados causados pelos usuários múltiplos instaladas. Para avaliar esta possível fragilidade recomenda-se a realização de painéis de especialistas para validar as saídas geradas pelo SWAT\_Gestão (RODRIGUES,2019; MANZIONE et al., 2020). Da mesma forma, resultados, obtidos por consultas a especialistas do domínio podem subsidiar futuramente a configuração e os pesos na inclusão de um módulo MCDM dentro do SSD que permitirá futuramente ponderar efeitos positivos e negativos de uma alteração das atividades antrópicas em uma bacia.

## 6. CONCLUSÃO

A quantidade de elementos e relações que influenciam a questão ambiental aumentam a complexidade de sua efetiva gestão tornando o uso de sistemas de informação, principalmente os Sistemas de Suporte a Decisão, imprescindível na busca para alcançar os seus objetivos.

Esses sistemas permitem o controle de uma quantidade maciça de dados vindos de diversas fontes diferentes, facilitando a sua organização e abstração em uma quantidade menor de informação mais compreensível ao gestor, dando todos os subsídios necessários para uma correta decisão que possa manter o equilíbrio sustentável do meio ambiente gerido sem impedir ações de desenvolvimento econômico nas sociedades residentes nele.

Essa é uma preocupação crescente na Gestão de Bacias Hidrográficas devido ao aumento da demanda de recursos hídricos e pelos impactos extremamente negativos para o meio ambiente em caso de colapso na oferta desse recurso.

Para fazer a análise dos impactos que podem ocorrer em uma Bacia Hidrográfica em caso de alterações que ocorram dentro dela existe o modelo hidrológico SWAT, testado e utilizado em várias bacias hidrográficas ao redor do mundo mas que tem ainda sua utilização muito mais voltada para estudos acadêmicos e menos voltado para o efetivo trabalho de auxílio a gestão dessas bacias hidrográficas.

O objetivo desse trabalho foi de apresentar uma proposta de Sistema de Suporte a Decisão que utilize o modelo hidrológico SWAT para analisar o impacto em uma bacia hidrográfica na inclusão ou alteração de fontes de poluição pontual e difusa dada as cargas diárias dos poluentes lançados. Em caso de ocorrência de degradação excessiva nas concentrações dos poluentes em rios dessa bacia hidrográfica, analisados pelo método CCME-WQI o sistema poderá propor ações na bacia hidrográfica que permitam essa inclusão diminuindo o quanto possível o nível de degradação dos rios da bacia hidrográfica.

A metodologia aqui apresentada pode ser usada como auxílio aos gestores de bacias hidrográficas em pelo menos 3 diferentes instrumentos instituídos pela Lei 9433/97.

No Plano de Recursos Hídricos essa metodologia poderia ser utilizada para prever os impactos na bacia de vários tipos diferentes de eventos que podem alterar a sua dinâmica como por exemplo, alterações da densidade demográfica, criação de parques industriais, desmatamentos para atividades agropecuárias, reflorestamento de áreas degradadas, mudanças nos sistemas de tratamento de efluentes em cidades, construção de reservatórios artificiais, entre outros. Através da quantificação do impacto do resultado das simulações contendo esses eventos em relação ao cenário atual de uma sub-bacia é possível ao gestor se antecipar a esses possíveis eventos procurando alternativas para efetivá-los quando positivos ou evitá-los/suavizá-los em caso de serem negativos.

Outro importante aspecto para o gerenciamento do Plano de Recursos Hídricos e que é calculado pelo SWAT podendo então ser aproveitado no SWAT\_Gestão é o controle dos lançamentos de pesticidas e fertilizantes nos corpos hídricos da bacia. Com isso os gestores podem propor melhores práticas de gerenciamento do uso e ocupação do solo quando o nível de lançamento for considerado crítico.

Na Outorga de Recursos Hídricos essa metodologia pode ser usada para auxílio a tomada de decisão da unidade outorgante sobre a sua autorização ou não levando em consideração o seu possível impacto e tentando sugerir alternativas que facilitem essa autorização.

Na Cobrança de uso de Recursos Hídricos essa metodologia pode ser usada para mostrar aos usuários o quanto a variação das suas cargas de lançamento impactam no índice de qualidade de água CCME-WQI da sub-bacia onde estão localizados e quais medidas compensatórias ele poderia realizar para diminuir esse impacto reduzindo assim o seu valor de contribuição principalmente pelo uso indireto de Recursos Hídricos.

Outra possibilidade é utilizar a análise do impacto de um cenário simulado para avaliar o enquadramento do corpo hídrico afetado segundo a resolução CONAMA 357/2005. O aumento dos níveis de poluição no canal principal de uma sub-bacia pode alterar a sua classe de enquadramento com a consequente modificação, segundo essa resolução, dos usos permitidos para esse corpo hídrico podendo com isso ser uma fonte de conflito a ser evitada.

Ao longo dos testes foi possível observar que alguns cenários o sistema comportou-se conforme o planejado, porém em outros o objetivo não foi devidamente alcançado não por falhas na metodologia aqui proposta, mas porque são situações um pouco mais complexas que precisam ainda de mais conhecimento para serem devidamente trabalhadas.

O sistema SWAT\_Gestão evidencia as potencialidades em combinar modelos eco-hidrológicos, como o SWAT, com metodologias de suporte a decisão como o método CCME-WQI, originalmente criado para análise de qualidade de água, mas que se mostrou adequado também para essa tarefa. Duas possibilidades de uso foram testadas com bons resultados apresentados. Porém, a arquitetura deste sistema permite com poucos ajustes adequá-lo para outros usos de acordo com as necessidades de pesquisadores e Agências de Recursos Hídricos mostrando que esse sistema pode ser uma importante ferramenta para o auxílio a gestão de recursos hídricos.

## REFERÊNCIAS

- ABBASPOUR, K. C. **User Manual for SWAT-CUP, SWAT Calibration and Uncertainty Analysis Programs**. Switzerland: Swiss federal Institute of Aquatic Science and Technology, 2007. 33 p.
- ACHENAFI, Teklay; YIHUN, T. Dile; SHIMELIS, G. Setegn; SOLOMON, S. Demissie; DEREJE, H. Asfaw. Evaluation of static and dynamic land use data for watershed hydrologic process simulation: A case study in Gummara watershed, Ethiopia. **CATENA**, [s. l.], v. 172, p. 65-75, 2019.
- ADLA, S.; TRIPATHI, S.; DISSE, M. Can We Calibrate a Daily Time-Step Hydrological Model Using Monthly Time-Step Discharge Data?. **Water**, [s. l.], v. 11, n. 1750, 2019.
- AL-KLOUB , B.; AL-SHEMMERI , T.; PEARMAN, A. The role of weights in multi-criteria decision aid, and the ranking of water projects in Jordan. **Eur J Oper Res** , [s. l.], v. 99(2), p. 278-288, 1997.
- ALKMIM, JACQUELINE KAYSER DE. **Modelagem Processual da Vazão e Parâmetros de Qualidade de Água na Bacia Hidrográfica do Rio Cuiabá/MT, afluente do Pantanal**. 2017. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) - UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO-UFMT, CUIABÁ, 2017.
- ALMEIDA, A.A. **Estudo Comparativo entre os Métodos IQANSE e IQACCME na Análise da Qualidade da Água do Rio Cuiabá**. Orientador: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup> Eliana Beatriz Nunes Rondon Lima. 2007. 89 p. Dissertação (Mestrado em Física Ambiental) - Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental/UFMT, Cuiabá, 2007.
- ANA. Agência Nacional de Águas. **Disponibilidade hídrica nos rios do Brasil (Q95) e IQA (Média anual dos anos 2016/17)**. [S. l.], 2019. Disponível em: <https://portal1.snirh.gov.br/>. Acesso em: 9 jul. 2020.
- ANJINHO, Phelipe da Silva. Modelagem distribuída da poluição pontual e difusa dos sistemas hídricos da bacia hidrográfica do ribeirão do Lobo, Itirapina-SP. 2019. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental) - Escola de Engenharia de São Carlos, University of São Paulo,

São Carlos, 2019. doi:10.11606/D.18.2019.tde-13052019-164214. Acesso em: 2020-07-07.

ARNOLD, J.G.; MORIASI, D.N.; GASSMAN, P.W.; ABBASPOUR, K.C.; WHITE, M.J.; SRINIVASAN, R.; SANTHI, C.; HARMEL, R.D.; GRIENSVEN, A.V.; LIEW, M.W.V.; KANNAN, N.; JHA, M.K. SWAT: model use, calibration, and validation. **ASABE**, [s. l.], v. 55, p. 1491-1508, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.13031/2013.42256>. Acesso em: 19 jun. 2020.

ARNOLD, J.G.; BIEGER, K.; WHITE, M.J.; SRINIVASAN, R.; DUNBAR, J.A.; ALLEN, P.M. Use of Decision Tables to Simulate Management in SWAT+. **Water**, [s. l.], v. 10, ed. 713, 2018.

ASL-ROUSTA, B.; MOUSAVI, S.J. A TOPSIS-Based Multicriteria Approach to the Calibration of a Basin-Scale SWAT Hydrological Model. **Water Resource Management**, [s. l.], n. 439, ed. 33, p. 228-230, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/S11269-018-2111-5>. Acesso em: 19 jun. 2020.

AZNAR-SÁNCHEZ, José A. et al. Economic analysis of sustainable water use: A review of worldwide research. **JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION**, [s. l.], v. 198, p. 2018, 1120-1132.

BIEGER, Katrin; ARNOLD, Jeffrey G.; RATHJENS, Hendrik; WHITE, Michael J.; BOSCH, David D.; ALLEN, Peter M.; VOLK, Martin; SRINIVASAN, Raghavan. Introduction to SWAT+, a completely restructured version of the Soil and Water Assessment Tool. **Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)**, [s. l.], v. 53, ed. 1, p. 115-130, 2017. Disponível em: [doi.org/10.1111/1752-1688.12482](https://doi.org/10.1111/1752-1688.12482). Acesso em: 9 jul. 2020.

BOZA, M.; ZIZOVIC, M.; PETOJEVIC, A.; DAMLJANOVIC, N. New weighted sum model. **Filomat**, [s. l.], v. 31, p. 2991-2998, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.2298/FIL1710991M>. Acesso em: 19 jun. 2020.

BRESSIANI D A, GASSMAN P W, FERNANDES J G, GARBOSSA L H P, SRINIVASAN R, BONUMÁ N B, et al. Review of Soil and Water Assessment

Tool (SWAT) applications in Brazil: Challenges and prospects. **Int J Agric & Biol Eng**, 2015; 8(3): 9—35.

CADERNOS DE CAPACITAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS. Brasília: ANA, 2011- . 02 jun. 2020. Disponível em: <https://www.ana.gov.br/todos-os-documentos-do-portal/documentos-sas/cadernos-de-capacitacao/cadernos-de-capacitacao-volume-6-outorga>. Acesso em: 2 jun. 2020.

CHAKHAR, S.; MOUSSEAU, V. Multicriteria Spatial Decision Support Systems. In: SHEKHAR, S.; XIONG, H. **Encyclopedia of GIS**. Boston, MA: Springer, 2008.

CHILKOTI, V.; BOLISETTI, T.; BALACHANDAR, R. Multi-objective autocalibration of SWAT model for improved low flow performance for a small snowfed catchment. **Hydrological Sciences Journal**, [s. l.], v. 63, ed. 10, p. 1482-1501, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/02626667.2018.1505047>. Acesso em: 19 jun. 2020.

CONEJAR, Regin Joy; KIM, Haeng-Kon. A Medical Decision Support System (DSS) for Ubiquitous Healthcare Diagnosis System. **International Journal of Software Engineering and Its Applications**, [s. l.], v. 8, ed. 10, p. 237-244, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14257/ijseia.2014.8.10.22>. Acesso em: 19 jun. 2020.

COLLISCOHNN, B. **Sistema de apoio à decisão para outorga de direito de uso de recursos hídricos**. Orientador: Prof. Carlos Eduardo Morelli Tucci. 2014. 177 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental - UFRGS, [S. l.], 2014.

COURTNEY, J.F. Decision making and knowledge management in inquiring organizations: toward a new decision-making paradigm for DSS. **Decision Support Systems**, [s. l.], v. 31, p. 17-38, 2001.

CRUZ, J.R. da; GONÇALVES, L.S.; GIACOMO, A.P.M. de A. Metodologia ágil Scrum: uso pelo enfermeiro em jogo educativo sobre manejo seguro de medicamentos. **Revista Gaúcha Enfermagem**, Porto Alegre, v. 40, 2019.

Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/1983-1447.2019.20180302>. Acesso em: 19 jun. 2020.

DA HORA, A. F. - **Metodologia para a Outorga do Uso de Recursos Hídricos com Ênfase no Caso de Aproveitamentos Hidrelétricos**. Tese de Doutorado. Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, dezembro de 2001. 238 páginas.

DIEZ, E.; MCINTOSH, B.S. A review of the factors which influence the use and usefulness of Information Systems. **Environmental Modelling and Software**, [s. l.], v. 24, p. 588-602, 2009.

DIEZ, E.; MCINTOSH, B.S. Organisational drivers for, constraints on, and impacts of decision and information support tool use in desertification policy and management. **Environmental Modelling and Software**, [s. l.], v. 26, p. 317-327, 2011.

DONG, C.; SCHOUPS, G.; VAN DE GIESEN, N. Scenario development for water resource planning and management: A review. **Technological Forecasting and Social Change**, [s. l.], v. 80, p. 749-761, 2013.

ELLIOTT, M. Risk perception frames in environmental decision making. **Environmental Practice**, [s. l.], v. 5, n. 3, p. 214-222, 2003.

FANT, C.; SRINIVASAN, R.; BOEHLERT, B.; RENNELS, L.; CHAPRA, S.C.; STRZEPEK, K.M.; CORONA, J.; ALLEN, A.; MARTINICH, J. Climate Change Impacts on US Water Quality Using Two Models: HAWQS and US Basins. **Water**, [s. l.], v. 9, ed. 118, 2017.

FENG, Y. *et al.* Introducing Biological Indicators into CCME WQI Using Variable Fuzzy Set Method. **Water Resource Management**, [s. l.], v. 32, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11269-018-1965-x>. Acesso em: 19 jun. 2020.

FISCHER, G.; TUBIELLO, F.N.; VAN VELTHUIZEN, H; WIBERG, D.A. Climate change impacts on irrigation water requirements: effects of mitigation. **Technological Forecasting and Social Change**, [s. l.], v. 74, p. 1083-1107, 2007.

FLÖRKE, M.; ALCAMO, J. European Outlook on Water Use. **Center for Environmental Systems Research**, University of Kassel, 2004.

GHORBANNEZHAD, P.; AZIZI, M.; RAY, C.; YOO, C.; RAMAZANI, O. Application of sensitivity analysis for assessment of energy and environmental alternatives in the manufacture by using analytic hierarchy process. **Environment Protection Engineering**, [s. l.], v. 39, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.5277/epe130301>. Acesso em: 19 jun. 2020.

FU, B.; MERRITT, W.S.; CROKE, B.F.W.; WEBER, T.; JAKEMAN, A.J. A review of catchment-scale water quality and erosion models and a synthesis of future prospects. **Environmental Modelling and Software**, [s. l.], 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.12.008>. Acesso em: 19 jun. 2020.

GOLFAM, P.; ASHOFTEH, P.S.; RAJAEI, T. Prioritization of Water Allocation for Adaptation to Climate Change Using Multi-Criteria Decision Making (MCDM). **Water Resource Management**, [s. l.], v. 33, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11269-019-02307-7>. Acesso em: 19 jun. 2020.

GOMES, A. da S.; SCIVITTARO, W.D.; PETRINI, J.A.; FERREIRA, L.H.G.A. A água : distribuição, regulamentação e uso na agricultura, com ênfase ao arroz irrigado. **Embrapa Clima Temperado**, Pelotas, 2008.

GORRY, G.A.; SCOTT MORTON, M.S. A framework for management information systems. **Sloan Management Review** , [s. l.], v. 13, 1971.

GROVES, D.G. New Methods for Identifying Robust Long-term Water Resources Management Strategies for California. **RAND Graduate School**, Santa Monica, 2006.

GWP. Main Article Focuses on IWRM Concepts. **GWP Newsflow** , [S. l.], p. 2-5, 1 maio 2000.

HABERLANDT, U. From hydrological modelling to decision support. **Advances in Geosciences**, [s. l.], v. 27, p. 11-19, 2010.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS – IGAM. Manual técnico e administrativo de outorga de direito de uso de recursos hídricos no estado de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2010.113p.

IPCC. Working group III report ?mitigation of climate change?; METZ, O.R.D.B.; BOSCH, P.R.; DAVE, R.; MEYER, L.A. **Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: [s. n.], 2007.

JABER, J.O.; MOHSEN, M.S. Evaluation of non-conventional water resources supply in Jordan. **Desalination**, [s. l.], v. 136, p. 83-92, 2001.

JAKEMAN, T.; LETCHER, R.; NORTON, J.P. Ten iterative steps in development and evaluation of environmental models. **Environmental Modelling and Software**, [s. l.], v. 21, p. 602-614, 2006.

JOHNSTON, R.; SMAKHTIN, V. Hydrological Modeling of Large river Basins: How Much is Enough?. **Water Resource Management**, [s. l.], v. 28, p. 2695?2730, 2014.

KOEHLER, D.J.; HARVEY, N. Blackwell handbook of judgment and decision making. **Blackwell Publishing**, Malden, MA, 2008.

KUIL, L.; EVANS, T.; MCCORD, P.F.; SALINAS, J.L.; BLOSCHL, G. Exploring the influence of smallholders perceptions regarding water availability on crop choice and water allocation through socio-hydrological modeling. **Water Resources Research**, [s. l.], v. 54, p. 2580?2604, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/2017WR021420>. Acesso em: 19 jun. 2020.

LAUTENBACH, S.; BERLEKAMP, J.; GRAF, N.; SEPPELT, R.; MATTHIES, M. Scenario analysis and management options for sustainable river basin management: application of the Elbe-DSS. **Environmental Modelling and Software**, [s. l.], v. 24, p. 26-43, 2009.

LIMA JUNIOR, Francisco Rodrigues; CARPINETTI, Luiz Cesar Ribeiro. Uma comparação entre os métodos TOPSIS e Fuzzy?TOPSIS no apoio à tomada de decisão multicritério para seleção de fornecedores. **Gestão &**

**Produção**, São Carlos, v. 22, n. 1, p. 17-34, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/0104-530X1190>. Acesso em: 19 jun. 2020.

LUMB, A.; SHARMA, T.C.; BIBEALULT, J.F. A Review of Genesis and Evolution of Water Quality Index (WQI) and Some Future Directions. **Water Quality, Exposure and Health**, [s. l.], v. 3, n. 11, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12403-011-0040-0>. Acesso em: 19 jun. 2020.

MAGALHÃES, Adriana Guedes; MONTENEGRO, Abelardo Antônio de Assunção; ANDRADE, Carolyne Wanessa Lins de; MONTENEGRO, Suzana Maria Gico Lima; FONTES JÚNIOR, Robertson Valério de Paiva. Hydrological modeling of an experimental basin in the semiarid region of the Brazilian State of Pernambuco. **Revista Ambiente & Água**, Taubaté-SP, v. 13, n. 6, 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.2204>. Acesso em: 19 jun. 2020.

MARTELLI, A. Scenario building and scenario planning: state of the art and prospects of evolution. **Futures Res. Q. Summer**, [s. l.], p. 57-70, 2001.

MARTELLI, A. Scenario building and scenario planning: state of the art and prospects of evolution. **Futures Res. Q. Summer**, [s. l.], p. 57-70, 19 jun. 2020.

MARY, S.A.S.A.; SUGANYA, G. Multi-Criteria Decision Making Using ELECTRE. **Circuits and Systems**, [s. l.], v. 7, p. 1008-1020, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.4236/cs.2016.76085>. Acesso em: 19 jun. 2020.

MCDONALD, S.; MOHAMMED, I.N.; BOLTEN, J.D.; PULLA, S.; MEECHAIYA, C.; MARKERT, A.; NELSON, E.J.; SRINIVASAN, R.; LAKSHIMI, V. Web-based decision support system tools: The Soil and Water Assessment Tool Online visualization and analyses (SWATOnline) and NASA earth observation data downloading and reformatting tool (NASAaccess). **Environmental Modelling & Software**, [s. l.], v. 120, p. 1364-8152, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.104499>. Acesso em: 19 jun. 2020.

MANZIONE, Rodrigo Lilla; NAVA, Aira; SARTORI, Maria Marcia Pereira. Modelo híbrido de oscilação de níveis freáticos a partir de diferentes variáveis

ambientais. **Revista Brasileira de Geografia Física**, [S.l.], v. 13, n. 3, p. 1231-1247, jun. 2020. ISSN 1984-2295. Disponível em: <<https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/244774/35380>>. Acesso em: 26 jul. 2020. doi:<https://doi.org/10.26848/rbgf.v13.3.p1231-1247>.

MCINTOSH, B.S.; ASCOUGH, J.C.; TWERY, M.; CHEW, J.; ELMAHDI, A.; HAROU, J.J.; HEPTING, D.; CUDDY, S.; JAKEMAN, A.J.; CHEN, S.; KASSAHUN, A.; LAUTENBACH, S.; MATTHEWS, K.; MERRITT, W.; QUINN, N.W.T.; RODRIGUEZ-RODA, I.; SIEBER, S.; STAVENGA, M.; SULIS, A.; TICEHURST, J.; VOLK, M.; WROBEL, M.; VAN DELDEN, H.; EL-SAWAH, S.; RIZZOLI, A.; VOINOV, A. Environmental decision support systems (EDSS) development?challenges and best practices. **Environmental Modelling and Software**, [s. l.], v. 26, p. 1389?1402, 2011.

MERZ, B.; VOROGUSHYB, S.; LALL, U.; VIGLIONE, A.; BLOCHL, G. Charting unknown waters?On the role of surprise in flood risk assessment and management. **Water Resources Research**, [s. l.], v. 51, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/2015WR017464>. Acesso em: 19 jun. 2020.

MOHEBBI, M.R.; SAEEDI, R.; MONTAZERI, A. Assessment of water quality in groundwater resources of Iran using a modified drinking water quality index (DWQI). **Ecological Indicators**, [s. l.], v. 30, p. 28-34, 2013.

MONTEIRO, J.A.F.; KAMALI, B.; SRINIVASAN, R.; ABBASPOUR, K.; GUNCKER, B. Modelling the effect of riparian vegetation restoration on sediment transport in a human-impacted Brazilian catchment. **EcoHydrology**, [s. l.], v. 9, ed. 7, p. 1289-1303, 2016.

MORAES, R.R.; CARVALHES, L.P.; AGUIAR, P.C. de; PEREIRA, A.V.R. GESTÃO DE RISCOS EM PROJETOS: UM ESTUDO DE CASO EM UMA EMPRESA DE SERVIÇOS FINANCEIROS. **Revista Mackenzie de Engenharia e Computação**, São Paulo, v. 17, ed. 1, p. 45-66, 2017.

MUHAMMETOGLU, A.; MUHAMMETOGLU, H.; OKTAS, S.; OZGOKCEN, L.; SOYUPAK, E. Impact assessment of different management scenarios on water quality of Porsuk river and dam system. **Water Resource Management**, Turquia, v. 19, p. 199?210, 2005.

ÖHLMÉR, B.; OLSON, K.; BREHMER, B. Understanding farmers' decision making processes and improving managerial assistance. **Agricultural Economics**, [s. l.], v. 18, ed. 3, p. 273-290, 1998.

OLIVEIRA, C.U.R. **SISTEMA DE SUPORTE A DECISÃO BASEADO EM LÓGICA FUZZY PARA OUTORGA DE RECURSOS HÍDRICOS**. Orientador: PROF. DR. PETER ZEILHOFER. 2009. Dissertação (Mestrado em Física Ambiental) - PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA AMBIENTAL - UFMT, Cuiabá, 2009.

PANAGOPOULOS, Y.; MAKROPOULOS, C.; MIMIKOU, M. Decision support for diffuse pollution management. **Environmental Modelling & Software**, [s. l.], v. 30, p. 57-70, 2012.

PAZ, A.R. **Hidrologia aplicada**: Disciplina ministrada para o curso de graduação em Engenharia de Bioprocessos e Biotecnologia na unidade de Caxias do Sul. Caxias do Sul, RS: UERGS: [s. n.], 2004. 184 p. Disponível em: [http://www.ct.ufpb.br/~adrianorpaz/artigos/apostila\\_HIDROLOGIA\\_APLICADA\\_UERGS.pdf](http://www.ct.ufpb.br/~adrianorpaz/artigos/apostila_HIDROLOGIA_APLICADA_UERGS.pdf). Acesso em: 19 jun. 2020.

PINHEIRO, R.B.; MONTENEGRO, S.M.L.; SILVA, S.R.; MEDEIROS, Y.D.P.; AURELIANO, J.T. Outorga para Lançamento de Efluentes — Uma Metodologia de Apoio à Gestão de Recursos Hídricos. In: Revista Brasileira de Recursos Hídricos, vol. 18, nº 4, p. 55-65. 2013.

POKHREL, Y.; BURBANO, M.; ROUSH, J.; KANG, H.; SRIDHAR, V.; HYNDMAN, D.W. A Review of the Integrated Effects of Changing Climate, Land Use, and Dams on Mekong River Hydrology. **Water**, [s. l.], v. 10, n. 266, 2018.

PUN, K.P.; CHOY, K.L.; LAM, H.Y. A Cloud-Based Fuzzy Multi-Criteria Decision Support System for Procurement Process in Facility Management. **Portland International Conference on Management of Engineering and Technology (PICMET)**, Honolulu, HI, p. 1-8, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.23919/PICMET.2018.8481800>. Acesso em: 19 jun. 2020.

RAJIB, M.A.; MERWADE, V.; KIM, I.L.; ZHAO, L.; SONG, C.; ZHE, S. SWATShare ? a web platform for collaborative research and education through

online sharing, simulation and visualization of SWAT models. **Environmental Modelling and Software**, [s. l.], v. 75, p. 498-512, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2015.10.032>. Acesso em: 19 jun. 2020.

RIOS, J.P. Gestão Ambiental: Aspectos legais e institucionais. **ABES - RJ**, Rio de Janeiro, 2000.

RIZZOLI, A.E.; YOUNG, W.J. Delivering environmental decision support systems: software tools and techniques. **Environmental Modelling and Software**, [s. l.], v. 12, p. 237-249, 1997.

ROCHA, A.R.; ZABEU, A.C.; MACHADO, C.F. MR-MPS-SW:2016 and CMMI-DEV v2.0: An Initial Experience of Harmonization. In Proceedings of the 17th Brazilian Symposium on Software Quality (SBQS). **ACM**, New York, NY, USA, p. 287-295, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1145/3275245.3275285>. Acesso em: 19 jun. 2020.

RODRIGUES, Gláuber Pontes. **Incertezas em modelos hidrológicos: o caso do modelo SCS/CN aplicado à Bacia Experimental de Aiuaíba**. Orientador: José Carlos de Araújo. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.

ROSO, Jayme Vita. Os corpos d'água, com sua classificação e diretrizes. **Migalhas**, [S. l.], p. 1, 5 jul. 2005. Disponível em: <https://www.migalhas.com.br/depeso/13778/os-corpos-d-agua-com-sua-classificacao-e-diretrizes>. Acesso em: 20 jun. 2020.

SAATY, T.L. The Analytic Hierarchy Process. **McGraw-Hill International**, New York, NY, 1980.

SAKAGUTI JUNIOR, M.M. **Gestão, governança e uso das águas no Brasil e em Singapura: um estudo dos casos da ilha principal de Singapura e das bacias hidrográficas dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí, SP/MG**. 2016. Tese (Doutorado em Ecologia) - Na Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba-SP, 2016.

SALEHI, S.; GHAZIZADEH, M.J.; TABESH, M. A comprehensive criteria-based multi-attribute decision-making model for rehabilitation of water distribution systems. **Structure and Infrastructure Engineering**, [s. l.], v. 14,

n. 6, p. 743-765, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/15732479.2017.1359633>. Acesso em: 19 jun. 2020.

SANTOS, F.; SANTOS, M.; REIS, E.; COSTA, A. Metodologias Híbridas de Desenvolvimento de Software: Uma Opção Viável para Gestão de Projetos. *In: ESCOLA REGIONAL DE INFORMÁTICA DO PIAUÍ (ERI-PI): Anais da IV Escola Regional de Informática do Piauí*. 4. ed. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Computação, 2018.

SEMA, Lista de Processos de Licenciamento Ambiental, 10/09/2019 (Documento Interno)

SHUKLA, S.; GEDAM, S. Evaluating Hydrological Responses to Urbanization in a Tropical River Basin: A Water Resources Management Perspective. **Natural Resources Research**, [s. l.], v. 28, n. 327, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11053-018-9390-7>. Acesso em: 19 jun. 2020.

SILVA, Dirce Arruda da. **Avaliação espaço-temporal da distribuição de fósforo na água e nos sedimentos de fundo das sub-bacias dos rios Cuiabá e São Lourenço e em algumas baías do Pantanal mato-grossense**. Orientador: Profº Dr. André Henrique Rosa. 2014. Tese (Doutorado em Química) - UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA-UNESP, Araraquara-SP, 2014.

SILVA, B. M. B.; SILVA, D. D.; MOREIRA, M. C. Influência da sazonalidade das vazões nos critérios de outorga de uso da água: estudo de caso da bacia do Rio Paraopeba. **Revista Ambiente & Água**, v. 10, n. 3, p. 623-634, 2015. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.1587>

SIMON, H. The New Science of Management Decision. **Harper Brothers**, New York, NY, USA, 1960.

TAFFARELLO, D.; SRINIVASAN, R.; MOHOR, G.S.; GUIMARÃES, J.L.B.; CALIJURI, M.C.; MENDIONDO, E.M. Modeling freshwater quality scenarios with ecosystem-based adaptation in the headwaters of the Cantareira system. **Hydrology and Earth System Sciences**, [s. l.], v. 22, p. 4699-4723, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/hess-22-4699-2018>. Acesso em: 19 jun. 2020.

TAN, M.L.; GASSMAN, P.W.; SRINIVASAN, R.; ARNOLD, J.G.; YANG, X. A Review of SWAT Studies in Southeast Asia: Applications, Challenges and Future Directions. **Water**, [s. l.], v. 11, n. 914, 2019.

TAYLOR, S. **ITIL V3 Foundation Complete Certification Guidebook: ITIL V3 Study Guide to Pass in First Attempt**. [S. l.]: Independently published, 2018.

TERRADO, M.; BARCELÓ, D.; TAULER, R.; BORRELL, E.; CAMPOS, S. Surface-water-quality indices for the analysis of data generated by automated sampling networks. **TrAC Trends in Analytical Chemistry**, [s. l.], v. 29, n. 1, p. 40-52, 2010.

VAN DEN BERGH, J.C.; FERRER-I-CARBONELL, A.; MUNDA, G. Alternative models of individual behaviour and implications for environmental policy. **Ecological Economics**, [s. l.], v. 32, n. 1, p. 43?61, 2000.

VILELA JÚNIOR, A.; DEMAJOROVIC, J. **Modelos e ferramentas de gestão ambiental: desafios e perspectivas para as organizações**. São Paulo: Ed. SENAC, 2006.

VON SPERLING, M.; CHERNICHARO, C. A. L. Biological Wastewater Treatment in Warm Climate Regions. London UK: **IWA Publishing e Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental**, UFMG, 2005, v. 1, 810 p.

WORLD BANK. **Mind, society and behavior**: World Development Report 2015. Washington, DC: World Bank, 2015.

WRIGHT, C.R.; SAFFRAN, K.A.; ANDERSON, A.M.; NEILSON, R.D.; MACALPINE, N.D.; COOKE, S.E. **A Water Quality Index for Agricultural Streams in Alberta: The Alberta Agricultural Water Quality Index (AAWQI)**. Edmonton, AB: Alberta Agriculture, Food and Rural Development, 1999.

XIONG, W.; HOLMAN, I.; LIN, E.; CONWAY, D.; JIANG, J.; XU, Y.; LI, Y. Climate change, water availability and future cereal production in China. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, [s. l.], v. 135, p. 58?69, 2010.

YAN, F.; QIAO, D.Y.; QIAO, B.; MA, L.; XING, X.G.; ZHANG, Y.; WANG, X.G. Improvement of ccme wqi using grey relational method. **Journal of Hydrology**, [s. l.], n. 543, p. 316?323, 2016.

YOE, C. Scenario Planning Literature Review. **U.S. Army Corps of Engineers Institute for Water Resources**, Alexandria, 2004.

ZAVADSKAS, E.K.; TURSKIS, Z.; ANTUCHEVICIENE, J.; ZAKAREVICIUS, A. Optimization of Weighted Aggregated Sum Product Assessment. **Electronics and Electrical Engineering**, [s. l.], v. 6, n. 122, p. 3-6, 2012.

ZAVADSKAS, E.K.; ANTUCHEVICIENE, J.; VILUTIENE, T.; ADELI, H. Sustainable Decision-Making in Civil Engineering, Construction and Building Technology. **Sustainability**, [s. l.], v. 10, n. 14, 2018.

ZHU, T.J.; RINGLER, C. Climate change impacts on water availability and use in the Limpopo River Basin. **Water**, [s. l.], v. 12, n. 4, p. 28?44, 2012.

ZYOUD, S.H.; KAUFMANN, L.G.; SHAHEEN, H.; SAMHAN, S.; FUCHS-HANUSCH, D. A framework for water loss management in developing countries under fuzzy environment: Integration of fuzzy AHP with fuzzy TOPSIS. **Expert Systems with Applications**, [s. l.], v. 61, n. 1, p. 86?105, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2016.05.016>. Acesso em: 19 jun. 2020.