

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Pablo Weber Valcorte

**AVALIAÇÃO DO MODELO HEC-HMS VERSÃO 4.1 NA SIMULAÇÃO  
HIDROSEDIMENTOMÉTRICA DE PEQUENAS BACIAS. ESTUDO  
DE CASO NA REGIÃO CENTRAL DO RIO GRANDE DO SUL**

Dissertação de Mestrado

Santa Maria, RS

2017  
Pablo Weber Valcorte

**AVALIAÇÃO DO MODELO HEC-HMS VERSÃO 4.1 NA SIMULAÇÃO  
HIDROSEDIMENTOMÉTRICA DE PEQUENAS BACIAS. ESTUDO DE CASO NA  
REGIÃO CENTRAL DO RIO GRANDE DO SUL**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM,RS) como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Civil**

Orientador: Prof. Dr. João Batista Dias de Paiva

Santa Maria, RS

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Valcorte, Pablo  
AVALIAÇÃO DO MODELO HEC-HMS VERSÃO 4.1 NA SIMULAÇÃO  
HIDROSSEDIMENTOMÉTRICA DE PEQUENAS BACIAS. ESTUDO DE CASO  
NA REGIÃO CENTRAL DO RIO GRANDE DO SUL / Pablo  
Valcorte.- 2017.  
86 p.; 30 cm

Orientador: Prof. Dr. João Batista Dias de Paiva  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Civil, RS, 2017

1. Avaliação hidrossedimentométrica 2. Produção de  
Sedimentos 3. HEC-HMS 4.1 I. Dias de Paiva, Prof. Dr.  
João Batista II. Título.

Pablo Weber Valcorte

**AVALIAÇÃO DO MODELO HEC-HMS VERSÃO 4.1 NA SIMULAÇÃO  
HIDROSSEDIMENTOMÉTRICA DE PEQUENAS BACIAS. ESTUDO DE  
CASO NA REGIÃO CENTRAL DO RIO GRANDE DO SUL**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM,RS) como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Civil**

Aprovado em 19 de outubro de 2017:



---

João Batista Dias de Paiva, Dr. (UFSM)  
(Presidente/Orientador)



---

Leandro Conceição Pinto, Dr. (UFSM)



---

Adilson Pinheiro, Dr. (FURB)  
(Videoconferência)

Santa Maria, RS  
2017

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de agradecer primeiramente aos meus pais, por todas as condições que sempre me deram, por todo o apoio, por simplesmente tudo, por todas as situações que passei durante esse tempo.

Ao meu orientador Prof. Dr. João Batista Dias de Paiva, por todo apoio, condições e ajuda em todos os campos no decorrer do mestrado.

Aos amigos, que em momentos difíceis estiveram ao meu lado apoiando.

Ao grupo GHIDROS, pelos colegas e funcionários que estão presentes sempre apoiando.

À CAPES/CNPQ pela bolsa concedida para o desenvolvimento das atividades desta pesquisa, ao CTHIDRO e a FINEP pelo financiamento através dos editais de redes cooperativas de pesquisa e em especial ao Projeto RHIMA pelo suporte financeiro para a aquisição dos equipamentos e materiais necessários ao desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores e funcionários do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Maria pelos ensinamentos.

À Universidade Federal de Santa Maria pela oportunidade de realizar o mestrado na área.

*“Fazer algo bem vale tanto a pena  
que morrer tentando  
fazer algo melhor, não pode ser loucura.  
A vida é medida por realizações, e não por anos.”  
Bruce McLaren*

## RESUMO

### **AVALIAÇÃO DO MODELO HEC-HMS VERSÃO 4.1 NA SIMULAÇÃO HIDROSSEDIMENTOMÉTRICA DE PEQUENAS BACIAS. ESTUDO DE CASO NA REGIÃO CENTRAL DO RIO GRANDE DO SUL**

AUTOR: Pablo Weber Valcorte  
Orientador: Prof. Dr. João Batista Dias de Paiva

Os sedimentos são resultados dos processos de erosão, transporte, deposição e compactação, sua produção acarreta diversos problemas, entre eles, assoreamento dos rios e reservatórios e contaminação das águas superficiais. Estudar a produção de sedimentos em uma bacia hidrográfica e o seu transporte pelos rios é importante para estimar a quantidade e a origem dos sedimentos transportados, de forma a permitir fazer um planejamento e realizar o adequado aproveitamento dos recursos hídricos. O objetivo desta pesquisa foi realizar a simulação hidrossedimentométrica de uma pequena bacia hidrográfica, a partir de observações fluviossedimentométricas instaladas para esse fim., onde foram feitas observações de concentração de sedimentos em suspensão e medições de descarga de fundo. A área empregada no trabalho se encontra na bacia do Vacacaí Mirim, região central do Rio Grande do Sul, situada nos municípios de Santa Maria e Itaara. Foi utilizado o software HEC-HMS 4.1 para fazer a simulação e os dados observados foram usados para a sua calibração e validação. Os resultados encontrados na simulação de vazões foram considerados satisfatórios para duas sub-bacias analisadas com coeficientes Nash-Sutcliffe de 0,825 e 0,724 para calibração e 0,575 e 0,831 para validação, no entanto para a outra sub-bacia analisada os resultados de calibração e validação foram considerados pouco satisfatórios, 0,573 e 0,335. Em relação a produção de sedimentos, foi possível observar que a maior produção ocorreu na estação do verão, com valores médios de 118,49, 3,97 e 3,86 ton/dia para sedimentos totais e 8,54, 0,31 e 0,18 ton/dia para sedimentos em suspensão pois o mesmo apresenta maior quantidade de precipitações e a menor produção na estação do inverno, pois é onde apresenta a menor quantidade de precipitações. Os resultados da simulação de sedimentos, quando comparados com os dados observados em outros trabalhos mostraram que os valores simulados são da mesma ordem de grandeza que os observados para o transporte de sedimentos em suspensão.

**Palavras-chave:** Produção de sedimentos; Vacacaí Mirim; HEC-HMS 4.1

## ABSTRACT

### EVALUATION OF THE HEC-HMS MODEL VERSION 4.1 IN THE HYDROSEDIMENTOMETRIC SIMULATION OF A SMALL WATERSHED. CASE STUDY IN THE CENTRAL REGION OF RIO GRANDE DO SUL

AUTHOR: Pablo Weber Valcorte  
ADVISER: Prof. Dr. João Batista Dias de Paiva

Sediments are the results of erosion, transport, deposition and compaction processes, your production causes several problems, among them, silting rivers and reservoirs and surface waters contamination. Sediment production study in a watershed and the rivers transport is important to estimate the quantity and origin of the sediments transported, in order to plan and make better use of water resources. The research objective was simulate hydrosedimentometric of a small watershed, from fluvial observations installed for this purpose, where observations were made of suspended sediment concentration and background discharge measurements. The area used in the work is located in the Vacacaí Mirim basin, central region of Rio Grande do Sul, located in the municipalities of Santa Maria and Itaara. The HEC-HMS 4.1 software was used to make the simulation and the observed data were used for its calibration and validation. The results found in the flow simulation were considered satisfactory for two sub-basins analyzed with Nash-Sutcliffe coefficients of 0,825 and 0,724 for calibration and 0,575 and 0,831 for validation, however for the other sub-basin analyzed the calibration and validation results were not considered acceptable, 0,573 and 0,335. In relation to sediment production, it was possible to observe that the highest production occurred in the summer season, with average values of 118,49, 3,97 and 3,86 ton/day for total sediments and 8,54, 0,31 and 0,18 ton/day for suspended sediments because it presents higher amount of precipitations and the smaller production in the winter season, because it is where it presents the least amount of precipitations. The results of the sediment simulation, compared to the observed data in other studies showed that the simulated values are of the same order of magnitude as those observed for the suspended sediment.

**Key-words:** Sediment production; Vacacaí Mirim; HEC-HMS 4.1



## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 - Módulo das especificações de controle para a inicialização da simulação .....   | 24 |
| Figura 2 - Paired Data (Dados emparelhados).....   | 25 |
| Figura 3 - Editor do módulo de simulação .....   | 26 |
| Figura 4 - Layout do software REF-ET .....   | 28 |
| Figura 5 - Processo de calibração do HEC-HMS .....   | 29 |
| Figura 6 - Localização da bacia hidrográfica .....   | 34 |
| Figura 7 - Localização das sub-bacias .....  | 35 |
| Figura 8 – Mapa do uso e ocupação do solo.....   | 37 |
| Figura 9 - Mapa da classificação do solo na bacia hidrográfica .....   | 39 |
| Figura 10 – Localização das estações pluviométricas .....  | 40 |
| Figura 11 - Demonstração do módulo de sedimentos ativo e módulo de sedimentos aberto com os métodos principais e parâmetros dos sedimentos ..... | 43 |
| Figura 12 - Informações a serem inseridas referente a subacia.....   | 44 |
| Figura 13 - Métodos disponíveis no Reach Creation Tool.....  | 48 |
| Figura 14 - Hietograma Especificado .....  | 51 |
| Figura 15 - Evapotranspiração Especificada .....   | 52 |
| Figura 16 - Diagrama típico da representação do escoamento de uma bacia hidrográfica no modelo HEC-HMS .....                                     | 54 |
| Figura 17 - Gráfico da produção de sedimentos totais em MD IV – Verão .....  | 64 |
| Figura 18 - Gráfico da produção de sedimentos totais em MD IV – Outono .....   | 65 |
| Figura 19 - Gráfico da produção de sedimentos totais em MD IV - Inverno.....   | 66 |
| Figura 20 - Gráfico da produção de sedimentos totais em MD IV – Primavera.....   | 66 |
| Figura 21 - Gráfico da produção de sedimentos totais em MD II – Verão.....   | 67 |
| Figura 22 - Gráfico da produção de sedimentos totais em MD II – Outono.....  | 68 |
| Figura 23 - Gráfico da produção de sedimentos totais em MD II - Inverno .....  | 68 |
| Figura 24 - Gráfico da produção de sedimentos totais em MD II - Primavera .....  | 69 |
| Figura 25 - Gráfico da produção de sedimentos totais em STP - Verão .....  | 70 |
| Figura 26 - Gráfico da produção de sedimentos totais em STP - Outono .....   | 71 |
| Figura 27 - Gráfico da produção de sedimentos totais em STP - Inverno.....   | 71 |
| Figura 28 - Gráfico da produção de sedimentos totais em STP - Primavera .....  | 72 |
| Figura 29 - Gráfico da produção de sedimentos em suspensão em MD IV .....  | 75 |
| Figura 30 - Gráfico da produção de sedimentos em suspensão em MD II.....   | 75 |
| Figura 31 - Gráfico da produção de sedimentos em suspensão em STP .....  | 76 |

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1 - Funções de cálculo da capacidade de transporte a quantidade de sedimentos transportada em um escoamento.....                | 21 |
| Tabela 2 - Fluxograma dos métodos de cálculo da precipitação e evapotranspiração disponíveis no modelo meteorológico .....             | 23 |
| Tabela 3 - Dados utilizados no software REF-ET.....  | 27 |
| Tabela 4 - Características físicas das bacias .....  | 36 |
| Tabela 5 - Uso e ocupação do solo das sub-bacias.....  | 37 |
| Tabela 6 - Classificação do solo nas sub-bacias.....   | 38 |
| Tabela 7 - Período de chuvas diárias utilizados .....  | 40 |
| Tabela 8 - Período utilizados na calibração e validação .....  | 42 |
| Tabela 9 - Métodos disponíveis para cada sub-bacia .....   | 44 |
| Tabela 10 - Métodos utilizados para a simulação no campo Subbasin.....   | 45 |
| Tabela 11 - Valores dos parâmetros da MUSLE utilizado na simulação.....  | 47 |
| Tabela 12 - Fluxograma dos métodos de cálculo do <i>Reach Creation Tool</i> .....  | 48 |
| Tabela 13 - Métodos escolhidos para a simulação no campo Reach .....   | 49 |
| Tabela 14 - Dados granulométricos do material do leito da sub-bacia Menino Deus IV.....  | 50 |
| Tabela 15 - Dados granulométricos do material do leito da sub-bacia Menino Deus II .....   | 50 |
| Tabela 16 - Dados granulométricos do material do leito da sub-bacia Sítio do Tio Pedro.....  | 50 |
| Tabela 17 - Períodos utilizados nas simulações .....   | 52 |
| Tabela 18 - Classificação do desempenho por meio do coeficiente de Nash-Sutcliffe, segundo MORIASI et al. (2007) .....                 | 53 |
| Tabela 19 - Desempenho da calibração com o coeficiente Nash-Sutcliffe.....   | 57 |
| Tabela 20 - Desempenho da validação com o coeficiente Nash-Sutcliffe.....  | 57 |
| Tabela 21 - Parâmetros hidrológicos calibrados .....   | 58 |
| Tabela 22 - Valores simulados (t/dia) de produção e transporte de sedimentos para a sub-bacia Menino Deus IV .....                     | 61 |
| Tabela 23 - Valores simulados (t/dia) de produção e transporte de sedimentos para a sub-bacia Menino Deus II.....                      | 61 |
| Tabela 24 - Valores simulados (t/dia) de produção e transporte de sedimentos para a sub-bacia Sítio do Tio Pedro .....                 | 62 |
| Tabela 25 - Média da descarga total de sedimentos no período de um ano, simulado pelo modelo, usando o método de Toffaleti (1969)..... | 62 |
| Tabela 26 - Valores médios de trabalhos anteriores .....   | 62 |
| Tabela 27 - Produção de sedimentos em mm/ano.....  | 63 |
| Tabela 28 - Valores da produção de sedimento em mm/ano de trabalhos anteriores .....   | 63 |
| Tabela 29 - Média da produção de sedimentos em suspensão .....   | 72 |
| Tabela 30 - Valores referentes a curva-chave de GRUTKA (2013) (t/dia) .....  | 73 |
| Tabela 31 - Valores referentes a curva-chave de PARANHOS (2003) (t/dia) .....  | 73 |
| Tabela 32 - Valores referentes a curva-chave de BELLINASO (2002) (t/dia) .....   | 74 |
| Tabela 33 - Valores referentes a curva-chave de BELLÓ (2004) (t/dia).....  | 74 |
| Tabela 34 - Afluência média ao reservatório - sedimentos .....   | 78 |
| Tabela 35 - Afluência média ao reservatório - vazões .....   | 78 |

# SUMÁRIO

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO</b> .....   | <b>11</b> |
| 1.1      | OBJETIVOS.....  | 12        |
| <b>2</b> | <b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....  | <b>12</b> |
| 2.1      | PEQUENA BACIA HIDROGRÁFICA .....  | 12        |
| 2.2      | CICLO HIDROSEDIMENTOLÓGICO.....   | 13        |
| 2.3      | PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS.....   | 13        |
| 2.4      | PROCESSOS EROSIVOS.....   | 15        |
| 2.5      | ORIGEM DOS PROCESSOS EROSIVOS .....   | 15        |
| 2.6      | FATORES DA ESCALA.....  | 16        |
| 2.7      | EMPREGO DE MODELOS HIDROLÓGICOS PARA PREVISÃO DE<br>PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS..... | 17        |
| 2.8      | SISTEMA DE MODELAGEM HIDROLÓGICA HEC-HMS VERSÃO 4.1 ..                          | 18        |
| 2.8.1    | Modelo bacia hidrográfica .....   | 21        |
| 2.8.2    | Modelo meteorológico.....   | 22        |
| 2.8.3    | Especificações de controle .....  | 23        |
| 2.8.4    | Dados de séries temporais (Time-series data) .....                              | 24        |
| 2.8.5    | Dados emparelhados (Paired data) .....  | 24        |
| 2.8.6    | Teste de otimização (Optimization trial).....                                   | 25        |
| 2.8.7    | Simulação (Simulation run) .....  | 26        |
| 2.9      | SOFTWARE REF-ET.....  | 27        |
| 2.10     | CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO .....  | 28        |
| 2.10.1   | Função objetivo.....  | 30        |
| 2.10.1.1 | Soma dos erros absolutos.....   | 30        |
| 2.10.1.2 | Soma dos resíduos quadráticos .....   | 31        |
| 2.10.1.3 | Erro percentual de pico .....   | 31        |
| 2.10.1.4 | Erro quadrático médio ponderado .....   | 32        |
| 2.11     | VALIDAÇÃO DO MODELO.....  | 33        |
| 2.12     | DESEMPENHO DO MODELO.....   | 33        |
| <b>3</b> | <b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....  | <b>34</b> |
| 3.1      | ÁREA DE ESTUDO .....  | 34        |
| 3.1.1    | Caracterização da área de estudo .....  | 35        |
| 3.1.2    | Uso e ocupação do solo .....  | 36        |
| 3.1.3    | Classificação do solo .....   | 37        |
| 3.2      | DADOS PLUVIOMÉTRICOS, FLUVIOMÉTRICOS E<br>SEDIMENTOMÉTRICOS.....                | 39        |
| 3.2.1    | Dados pluviométricos.....   | 39        |
| 3.2.2    | Dados fluviométricos.....   | 40        |
| 3.3      | CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO .....  | 42        |
| 3.4      | CONSTITUINTES DO MODELO .....   | 42        |
| 3.4.1    | Modelo bacia (Basin model).....   | 42        |
| 3.4.2    | Ferramenta de criação de sub-bacia (Subbasin creation tool).....                | 43        |
| 3.4.2.1  | Métodos utilizados no elemento subbasin creation tool .....                     | 45        |
| 3.4.3    | Ferramenta de criação de trecho (Reach creation tool).....                      | 48        |
| 3.4.3.1  | Métodos utilizados no elemento reach creation tool.....                         | 49        |
| 3.4.4    | Ferramenta de criação de nó (Junction creation tool).....                       | 51        |
| 3.5      | MODELO METEOROLÓGICO (METEOROLOGIC MODEL) .....                                 | 51        |
| 3.5.1    | Precipitação .....  | 51        |

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| 3.5.2    | Evapotranspiração .....   | 52        |
| 3.6      | SIMULAÇÃO HIDROSSEDIMENTOMÉTRICA E DESEMPENHO DO<br>MODELO .....  | 52        |
| <b>4</b> | <b>REPRESENTAÇÃO CONCEITUAL DO COMPORTAMENTO DAS<br/>BACIAS HIDROGRÁFICAS PELO MODELO HEC-HMS .....</b> | <b>53</b> |
| 4.1      | PROCESSO DE ESCOAMENTO .....  | 53        |
| 4.2      | PRECIPITAÇÃO .....  | 55        |
| 4.3      | VOLUME DE ESCOAMENTO .....  | 55        |
| 4.4      | ESCOAMENTO DIRETO .....   | 56        |
| 4.5      | ESCOAMENTO DE BASE .....  | 56        |
| <b>5</b> | <b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>  | <b>57</b> |
| 5.1      | DESEMPENHO DO MODELO.....   | 57        |
| 5.2      | SEDIMENTOS TOTAIS .....   | 61        |
| 5.2.1    | Simulação da produção de sedimentos das estações do ano .....   | 64        |
| 5.2.1.1  | Menino Deus IV .....  | 64        |
| 5.2.1.2  | Menino Deus II .....  | 67        |
| 5.2.1.3  | Sítio do Tio Pedro.....   | 70        |
| 5.3      | SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO.....  | 72        |
| 5.3.1    | Simulação da produção de sedimentos em suspensão .....  | 74        |
| 5.3.1.1  | Menino Deus IV .....  | 74        |
| 5.3.1.2  | Menino Deus II .....  | 75        |
| 5.3.1.3  | Sítio do Tio Pedro.....   | 76        |
| 5.4      | AFLUÊNCIA MÉDIA AO RESERVATÓRIO .....   | 77        |
| <b>6</b> | <b>CONCLUSÕES.....</b>  | <b>79</b> |
| <b>7</b> | <b>RECOMENDAÇÕES .....</b>  | <b>80</b> |
| <b>8</b> | <b>REFERÊNCIAS .....</b>  | <b>81</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

O aumento da expansão urbana e conseqüentemente populacional, visando o desenvolvimento urbano, e também a intensa atividade da agricultura vêm acarretando problemas que estão modificando constantemente o meio ambiente.

Essas modificações acabam afetando os recursos hídricos, fazendo com que haja uma degradação em sua qualidade. Um dos fatores que mais agride os recursos hídricos devido à expansão urbana e a atividade agrícola é a alteração nos processos sedimentológicos por inúmeros fatores, por exemplo, a urbanização acaba reduzindo a infiltração no solo, devido ao fato de torná-lo impermeável o que acarreta escoamento superficiais maiores, que por sua vez acabam gerando a erosão das margens e do leito de cursos de água.

Por meio dessas alterações há um aumento na produção, transporte e deposição de sedimentos, ao longo das bacias hidrográficas, tendo em vista o uso e manejo inadequado das áreas.

Tendo em vista essas alterações para se realizar um estudo hidrossedimentométrico é necessário fazer um monitoramento de diversos fatores na bacia hidrográfica, como precipitação, descarga líquida, descarga sólida de sedimentos, tanto em suspensão, de leito e de arraste, e a concentração de sedimentos.

No entanto, o custo para se realizar um monitoramento de sedimentos, é relativamente alto, o que vem abrindo espaço para os modelos hidrológicos e métodos alternativos para a estimativa da produção de sedimentos.

Segundo PAIVA, PAIVA e PARANHOS (2000), no Brasil há um grande déficit de dados hidrológicos e sedimentológicos em pequenas bacias tendo em vista justamente seu elevado custo em função do tamanho da bacia hidrográfica, devido a isso, para suprir essa carência de dados são utilizados modelos hidrológicos e métodos alternativos para a estimativa do transporte de sedimentos. (LOPES et al., 2011).

Os modelos hidrológicos vêm sendo utilizados como auxílio nos estudos e compreensão dos processos de produção de sedimentos, porém, os resultados estimados nem sempre representam a realidade da bacia hidrográfica, devido a isso, é necessário cuidado ao interpretar os dados e também, ampliar a quantidade e

qualidade dos dados brutos, para a calibração dos modelos de estimativa de produção de sedimentos (PAIVA; PAIVA; PARANHOS, 2000; LOPES et al., 2011).

Portanto, justifica-se um estudo visando a quantificação da perda de solo, pois o mesmo é um recurso natural importante, e ainda por meio deste há a produção de alimentos e matéria-prima. Havendo perdas, vários fatores são afetados interferindo na economia de um país.

Por meio dessa perda de solo haverá uma série de problemas, tanto socioeconômicos, quanto ambientais como poluição das águas, o assoreamento dos rios, a mortandade dos peixes, a formação de voçorocas, etc.

## 1.1 OBJETIVOS

Essa pesquisa visou avaliar o desempenho do modelo hidrológico HEC-HMS versão 4.1, na simulação de vazões e produção de sedimentos de uma pequena bacia hidrográfica localizada nos municípios de Santa Maria (RS) e Itaara (RS), bem como avaliar as afluições médias de vazões e sedimentos ao reservatório do Vacacaí Mirim.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 PEQUENA BACIA HIDROGRÁFICA

De acordo com PONCE (1989 apud GOLDENFUM, 2001), uma bacia hidrográfica é considerada pequena se apresenta algumas ou todas as seguintes propriedades:

- A precipitação pode ser considerada como uniformemente distribuída no espaço, sobre toda a bacia;
- A precipitação pode ser considerada como uniformemente distribuída no tempo;
- A duração das tormentas geralmente excede o tempo de concentração da bacia;
- A geração de água e sedimento se dá principalmente pelo escoamento nas vertentes.

- Os processos de armazenamento e de fluxo concentrado na calha dos cursos d'água são pouco importantes.

Devido a essas características os fenômenos de transformação de chuva-vazão em pequenas bacias hidrográficas podem ser reduzidos a simples avaliação da intensidade da chuva e área da bacia, por exemplo. Isso ocorre pelo fato de se concentrar a avaliação dos parâmetros somente na escala do tempo e não na escala espacial, tendo em vista que, há uma homogeneidade na bacia hidrográfica.

## 2.2 CICLO HIDROSSEDIMENTOLÓGICO

O ciclo hidrológico segundo TUCCI (1993), pode ser definido como sendo um fenômeno global de circulação fechada da água entre a superfície terrestre e a atmosfera, impulsionado fundamentalmente pela energia solar. É um fenômeno contínuo, ou seja, a água apenas se transforma entre seus estados físicos da matéria, nunca sendo introduzida ou retirada do sistema.

O ciclo hidrossedimentológico é o estudo dos processos relacionados à dinâmica da água e dos sedimentos associados a ela na fase terrestre do ciclo hidrológico.

Devemos estudá-lo para que haja por meio dele um planejamento e gestão de recursos hídricos, podendo assim verificar os impactos causados pelo uso e ocupação do solo, a degradação da qualidade da água.

## 2.3 PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS

Segundo CARVALHO et al. (2000b) a produção de sedimento derivada da área de drenagem, ou correspondente a toda uma bacia hidrográfica, é dependente da erosão, do escoamento das águas de chuva com carreamento dos sedimentos e das características de transporte de sedimento nos cursos d'água.

Segundo ICOLD (1989 apud CARVALHO et al. 2000b) os principais fatores que afetam a produção de sedimentos na área de drenagem são:

- Precipitação – quantidade, intensidade e frequência;
- Tipo de solo e formação geológica;
- Cobertura do solo (vegetação, rochas aparentes e outros);

- Uso do solo (práticas de cultivo, pastagens, exploração de florestas, atividade de construção e medidas de conservação);
- Topografia (geomorfologia);
- Natureza da rede de drenagem – densidade, declividade, forma, tamanho e conformação dos canais;
- escoamento superficial;
- Características dos sedimentos (granulométricas, mineralógicas, etc.);
- Hidráulica dos canais.

Segundo CARVALHO (2008), o conhecimento de determinados mecanismos, como o transporte de sedimentos, é essencial para a solução de problemas de perdas de solo.

Com isso, o transporte de sedimentos é um processo natural que envolve três fases, sendo a primeira a remoção, seguida do transporte e por último a deposição do material e faz parte da evolução da paisagem originando as formas geomorfológicas (SANTOS et al., 2001).

Há várias formas de erosão, no Brasil a erosão hídrica é a mais importante, ela é causada pelas chuvas e pelo escoamento superficial, sendo afetada por um grande número de agentes naturais e antrópicos.

Conforme citado anteriormente, a produção de sedimentos engloba os processos de desagregação, transporte e deposição dos sedimentos. A desagregação é o desprendimento das partículas sólidas do solo, esse processo ocorre principalmente devido ao fato do impacto das gotas de chuva além de outros fatores, como reações químicas e ações mecânicas. Através do desprendimento das partículas esse material ficará exposto à ação do vento e do escoamento superficial, acarretando assim o transporte do material.

O transporte por meio da água pode ocorrer de diversos modos, quando há uma partícula pesada, a mesma é transportada por deslizamento, rolamento ou saltos, já no caso de uma partícula leve, a mesma é transportada em suspensão no fluxo, tanto em sua superfície como internamente.

A deposição surge a partir do momento em que a quantidade de material para ser carregado supera a capacidade de transporte do escoamento, normalmente a deposição ocorre em deltas de rios e em áreas onde a velocidade do escoamento é reduzida.



## 2.4 PROCESSOS EROSIVOS

Os processos erosivos podem ocorrer em qualquer parte da superfície terrestre, para isso, conforme GUERRA e BOTELHO (1996) basta que haja solos e agentes transportadores, dentre os quais destaca-se a água resultante do escoamento superficial e subsuperficial.

Segundo BELLÓ (2004), os processos erosivos são forças combinadas, energia de impacto da gota de chuva no solo e a energia gravitacional, que atuam modificando e modelando a superfície terrestre. Esta modificação e deformação varia de acordo com o tempo, o espaço e a velocidade dos agentes causadores.

## 2.5 ORIGEM DOS PROCESSOS EROSIVOS

Segundo BELLÓ (2004), a atuação gradual e contínua dos processos erosivos, que acarretam na alteração e transformação do relevo são divididos em dois tipos:

- Processos móveis (antrópicos): rios, ventos, marés, enxurradas, onde ocorre o transporte imediato do material;
- Processos imóveis (natural): intemperismo, processo gradual e lento.

Os processos móveis acarretam em uma alteração no meio de forma mais acelerada seja através da ação dos ventos ou da ação da água sobre o solo da bacia.

Os processos imóveis, naturais, apresentam uma atuação lenta, ou seja, geram uma erosão superficial.

No entanto, sabe-se que há uma aceleração desses processos em alguns casos devido a susceptibilidade dos solos presentes em determinadas bacias, onde a erosão superficial é grande responsável pelo arraste de um volume considerável de solo para o interior da rede de drenagem da bacia. Por consequência este processo pode acarretar em uma acumulação de resíduos em um reservatório diminuindo assim sua capacidade de armazenamento no caso do reservatório e de escoamento no caso da rede de drenagem.

Conforme BELLÓ (2004), o processo erosivo inicia a sua manifestação no solo, particularmente nas áreas sem proteção vegetal, através da água da chuva, o que por meio de suas gotas gera a desagregação das partículas do solo conforme dito anteriormente.

## 2.6 FATORES DA ESCALA

O conceito de escala é complexo, uma vez que autores relatam a problemática que envolve esse conceito, GIBSON et al. (2000), por exemplo, relatam que é utilizado o termo escala para nos referirmos às dimensões espaciais, temporais, quantitativas ou analíticas, as quais são utilizadas por cientistas para medir e estudar objetos e processos.

No entanto, níveis, referem-se a localizações ao longo da escala, mais frequentemente, um nível refere-se a uma região ao longo de uma dimensão de medida. Os níveis micro, meso e macro referem-se amplamente às regiões em escalas espaciais referentes a fenômenos de pequeno, médio e grande porte. Os níveis relacionados ao tempo, por exemplo, podem envolver curta, média e longa duração.

Segundo MENEZES e COELHO NETO (1999), a escala, em princípio, pode ser abordada dentro de um contexto espacial ou temporal. A escala temporal é importante para a análise de uma grande quantidade de fenômenos, sendo diversas vezes aplicada conjuntamente com a escala espacial, devido principalmente para a indicação de elementos ligados à fatores evolutivos e ambientais, como seus períodos de ocorrência e atuação.

Conforme TUCCI (2009), a escala temporal é dependente da ação antrópica e das condições de variabilidade climática, as quais podem ser observadas dentro da percepção humana ou somente por meio de dados que demonstrem sua ocorrência.

No presente trabalho, foram analisados os resultados em função das estações do ano, primavera, verão, outono e inverno, as quais apresentam os períodos de 21 de setembro até 20 de dezembro, 21 de dezembro até 20 março, 21 de março até 20 de junho e 21 de junho até 20 de setembro, respectivamente.

Foi empregado essa separação, para ter uma relação com os períodos mais ou menos chuvosos, podendo assim fazer relações com os dados de sedimentos encontrados durante a simulação.

## 2.7 EMPREGO DE MODELOS HIDROLÓGICOS PARA PREVISÃO DE PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS

A modelagem hidrológica é uma técnica que possibilita o melhor entendimento e representação do comportamento hidrológico de bacias hidrográficas, sendo que os modelos hidrológicos possuem grande potencia para caracterizar a disponibilidade hídrica em condições de mudanças no clima ou no uso do solo. Com o aumento da disponibilidade de computadores a partir do final da década de 1950, criaram-se condições que propiciaram um acelerado processo de desenvolvimento de modelos hidrológicos baseados em conceitos físicos (TUCCI, 1998).

A principal vantagem na aplicação de modelos, é a de conseguir em um espaço curto de tempo a simulação de diversos cenários, muitas vezes cenários ainda não realizados em experimentos reais. Além disso, uma importante vantagem é referente a custos, tendo em vista que a realização através de um programa computacional em relação a uma investigação experimental é de ordem de grandeza inferior.

No contexto de preservação dos recursos naturais, a identificação de um problema ambiental e por consequência a solução a ser tomada devem ser acompanhadas de custos aceitáveis. Por esse motivo que modelos matemáticos de estimativa de perda de solo por erosão estão sendo aplicados com êxito, tanto no quesito planejamento conservacionista como na avaliação de controle do processo erosivo de bacias hidrográficas. (MACHADO (2002)).

A maior limitação em relação ao uso de modelos, segundo PINTO (2014) se refere à dificuldade de aquisição da grande quantidade de dados que descrevem a heterogeneidade dos sistemas naturais. Por essa razão que Sistemas de Informações Geográficas (SIG) são empregados na criação do Banco de Dados Geográficos (BDG) desses modelos.

Conforme TUCCI (2005), os modelos hidrológicos apresentam vários tipos de usos, seus principais são:

- Melhor entendimento do comportamento dos fenômenos hidrológicos nas bacias: permite ao hidrólogo separar os fenômenos e, em consequência estudar a sensibilidade das variáveis de diferentes características das bacias.
- Análise de consistência e preenchimento de falhas: permite a extensão da série de vazão com base na precipitação.

- Previsão de vazão: permite estimar a vazão através da precipitação conhecida, com a vazão do posto a montante ou na combinação dos mesmos.
- Dimensionamento e previsão de cenários de planejamento: conhecida a precipitação e o risco de ocorrência da mesma é possível estimar a vazão resultante, para cenários de uso e modificações da bacia, visando ao dimensionamento e planejamento de alternativas de desenvolvimento do sistema.
- Efeitos resultantes da modificação do uso do solo.

## 2.8 SISTEMA DE MODELAGEM HIDROLÓGICA HEC-HMS VERSÃO 4.1

O HEC-HMS é um software desenvolvido pelo Centro de Engenharia Hidrológica do Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos da América (USACE – U.S Army Corps of Engineers). Foi projetado para simular os processos hidrológicos completos de bacias hidrográficas.

Os hidrogramas produzidos pelo programa são usados diretamente ou em conjunto com outros softwares para estudos de disponibilidade de água, drenagem urbana, previsão de fluxos, um futuro impacto da urbanização, redução de danos causados por inundações, dentre outros.

O modelo HEC-HMS é composto por três componentes: o Modelo da Bacia Hidrográfica, o Modelo Meteorológico e as Especificações de Controle (SCHARFFENBERG, 2015). Para iniciar o processamento do modelo hidrológico, é requerido inicialmente a entrada de dados da bacia hidrográfica, bem como dados meteorológicos.

Segundo TAVARES e CASTRO (2005 apud MACEDO 2010), após a entrada de dados são escolhidos os métodos para o cálculo das perdas, de transformação chuva-vazão, de composição do escoamento de base, de propagação em rios, considerando parâmetros relacionados a tais métodos, como a área das sub-bacias, tempo de concentração, fatores de infiltração, evapotranspiração.

O HEC-HMS é amplamente utilizado para a previsão de chuva-vazão, como no trabalho de SKHAKHFA (2016), que verificou a utilização do modelo HEC-HMS na bacia hidrográfica de Wadi Rasool, com uma área de 105,85 km<sup>2</sup>, em três eventos de precipitação, onde o mesmo apresentou um coeficiente de Nash-Sutcliffe (coeficiente

de desempenho) de 0,99, o que representa um desempenho muito bom, demonstrando assim que o modelo HEC-HMS pode ser aplicado. Observou-se por meio dos hidrogramas observados e simulados uma variação em seus picos, que com a calibração ocorreu a diminuição das vazões de pico.

SARDOII et al. (2012) utilizou o modelo HEC-HMS em uma bacia hidrográfica montanhosa com área de 778 km<sup>2</sup> onde foram utilizados oito eventos ao longo do trabalho, sete para calibração e um para validação. O intuito do trabalho foi analisar os métodos de perda por precipitação, foram empregados os métodos de Taxa de perda inicial e constante (Initial and Constant Loss Rate), Green And Ampt e Curva número (SCS Curve Number), onde o melhor desempenho foi do método da Taxa de perda inicial e constante, seguido da Curva número e Green and Ampt, respectivamente, por meio de duas funções objetivo, o erro percentual na vazão de pico (Percent Error in Peak Flow) e raiz ponderada máxima (Peak – Weighted Root Mean Square Error).

Conforme SIFONTES (2012), em uma bacia hidrográfica de releve montanhoso com uma área de 65 km<sup>2</sup> localizada em Cuba, utilizou o modelo para verificar a aplicação do modelo, mesmo não apresentando um grande banco de dados o resultado foi satisfatório conseguindo representar o comportamento geral de bacia, utilizando-se do método da Curva número como método de perda por precipitação, no modelo meteorológico foi utilizado o hietograma especificado e o modelo de transformação chuva vazão foi utilizado o hidrograma unitário de Clark.

PAK (2008), demonstrou em seu estudo que o modelo HEC-HMS estava incrementando novos métodos de modelagem que através destes, poderia ser utilizado para modelagem de sedimentos, demonstrando que através do novo módulo de sedimentos será disponível modelar a quantidade de sedimentos de áreas permeáveis e impermeáveis em uma bacia hidrográfica e encaminhá-lo para o rio.

O HEC-HMS inseriu no ano de 2013, na sua versão 4.0 o módulo de sedimentos, fazendo assim com que seja possível a previsão de transporte de sedimentos ao longo das bacias hidrográficas empregadas nas modelagens.

PAK (2015) aplicou o módulo de sedimentos na bacia a montante norte do rio bosque no Texas (EUA), com uma área de 93.250 hectares, a simulação de sedimentos totais realizada obteve um erro menor que 1% em relação aos dados observados na calibração e um erro residual na validação de -31 a 12%. Também

afirma que o modelo HEC-HMS teve um desempenho bom comparado com outros modelos comumente usados.

PAK (2015), analisou a sensibilidade do módulo de transporte de sedimentos disponível no modelo HEC-HMS a partir da saída com um único parâmetro perturbado que foi comparado com o modelo calibrado. Na análise de sensibilidade foi indicado o nível de sensibilidade para cada um dos parâmetros e fornecido orientação para simulações no desenvolvimento de modelos de erosão superficial de bacias hidrográficas com pouco ou nenhum dado observado.

O modelo hidrológico de HEC-HMS apresenta diversas versões, e com isso autores utilizaram o modelo com diferentes objetivos, como, simulação de escoamento em uma bacia hidrográfica (HAWATARA; NAJIM, 2013) realizou testes de calibração e validação para a bacia do rio Attanagalu Oya, que apresenta uma área de 337,06 km<sup>2</sup>, foi utilizado para a calibração e validação o método da Curva Número, Déficit e Constante, Hidrograma Unitário de Clark e Hidrograma Unitário de Snyder. Os resultados encontrados foram que o Hidrograma Unitário de Snyder simulou as vazões mais realisticamente que o Hidrograma Unitário de Clark, e para o método de perdas, o método da Curva Número não apresentou uma boa performance, porém o método Déficit e Constante foi considerado uma boa opção.

MEENU; REHANA; MUJUMDAR (2013) avaliou os impactos hidrológicos das mudanças climáticas em uma bacia hidrográfica do rio Tunga-Bhadra na Índia com uma área de 15.600 km<sup>2</sup>, apresentando um bom desempenho com exceção de altas vazões.

SILVA; WEERAKOON; HERATH (2014) realizou um estudo em uma bacia hidrográfica que se localiza no rio Kelani, no Sri Lanka, com uma área de aproximadamente 2.230 km<sup>2</sup>. Foi verificado o desempenho do modelo em relação à desastres, controles de cheias e gestão de recursos hídricos, comportando-se bem em todas as relações.

HEGEDÜS (2013) analisou a estimativa de picos de cheia na bacia hidrográfica do rio Bükkösd, com uma área de 137 km<sup>2</sup>, foi constatado que o HEC-HMS tende a superestimar o escoamento, no entanto, foi capaz de reproduzir os picos selecionados durante o seu trabalho.

### 2.8.1 Modelo bacia hidrográfica

Nesse modelo são inseridos e manipulados os dados referentes à parte física da bacia hidrográfica, sendo representado o esquema hidrológico da área, com as sub-bacias, os trechos de rios, possíveis reservatórios, junções e divisões dos canais (SCHARFFENBERG, 2015). Ainda nesse método inclui-se a definição dos métodos e respectivos parâmetros referentes a infiltração, evaporação, interceptação, os métodos de transformação chuva-vazão, de cálculo do escoamento de base e propagação em rios.

Os tipos de cálculo, *Canopy Method*, que representa a interceptação e evapotranspiração, *Surface Method*, que representa a cobertura da superfície, ou seja, o tipo de solo existente na bacia, *Loss Method*, que calcula a perda por infiltração real. Além desses métodos há a transformação da precipitação em escoamento superficial, *Transform Method*, e o *Base Flow Method* que calcula o escoamento de base na bacia.

Por fim o *Erosion Method* que calcula a erosão na bacia hidrográfica, o qual é ativado por meio do componente sedimentos, onde são selecionados os métodos de cálculo da erosão e do transporte de sedimentos para toda a bacia hidrográfica.

Existem 7 métodos de cálculo para a capacidade de transporte dos sedimentos com seus respectivos tipos que estão disponíveis no modelo HEC-HMS 4.1, conforme Tabela 1.

O método de transporte potencial especifica como a capacidade de transporte do sedimento será calculada para sedimentos não coesivos. Cada método foi desenvolvido para um diâmetro específico de sedimento e condições ambientais. O mesmo método de transporte de sedimentos será usado em toda a extensão da bacia hidrográfica. Há a opção de escolher um método de transporte de sedimentos coesivo, que quando selecionado é calculado em adição ao sedimento não coesivo.

Tabela 1 - Funções de cálculo da capacidade de transporte a quantidade de sedimentos transportada em um escoamento

| Método             | Tipo | Método | Referência                              |
|--------------------|------|--------|---|
| Ackers-White       | NC   | SP     | Ackers and White , 1973                 |
| Engelund-Hansen    | NC   | SP     | Engelund and Hansen, 1967               |
| Laursen-Copeland   | NC   | ES     | Larsen, 1958; Copeland and Thomas, 1989 |
| Meyer-Peter Muller | NC   | ES     | Meyer-Peter and Müller, 1948            |
| Toffaleti          | NC   | RE     | Toffaleti, 1968                         |

|              |    |    |                                 |
|--------------|----|----|---------------------------------|
| Wilcock      | NC | ES | Wilcock and Crowe, 2003         |
| Yang         | NC | SP | Yang, 1984                      |
| Krone        | CO | -  | Krone, 1962; Parthenaides, 1962 |
| Parthenaides |    |    |                                 |

Fonte: Traduzido de USACE-HEC (2015).

Onde:

- NC – Não Coesivo;
- CO – Coesivo;
- SP – Potência da corrente;
- ES – Tensão de Cisalhamento;
- RE – Regressão.

Alguns parâmetros padrões devem ser especificados para o início da simulação de sedimentos, estes são:

- Peso específico dos sedimentos;
- Densidade específica da argila ( $\text{kg/m}^3$ );
- Densidade específica do silte ( $\text{kg/m}^3$ );
- Densidade específica da areia e do cascalho ( $\text{kg/m}^3$ ).

Alguns métodos de avaliação do transporte de sedimentos requer o cálculo da velocidade de queda. Os métodos disponíveis para o cálculo da velocidade de queda são REPORT 12 (Interagency Committee, 1957), RUBEY (1933), TOFFALETI (1968) e VAN RIJN (1993).

### 2.8.2 Modelo meteorológico

O modelo meteorológico é importante na definição das condições de contorno que agem na bacia hidrográfica durante a simulação. Consequentemente o modelo hidrológico é preparado para uso com um ou mais modelos de bacias hidrográficas. Se o modelo de bacia hidrográfica contém sub-bacias, então deve ser especificado como será a precipitação em cada sub-bacia. (SCHARFFENBERG, 2015).

O modelo meteorológico constitui na entrada dos dados de precipitação e evapotranspiração, o qual podemos observar por meio da Tabela 2, sendo selecionado o método de distribuição temporal destes. (USACE-HEC, 2013).



Tabela 2 - Fluxograma dos métodos de cálculo da precipitação e evapotranspiração disponíveis no modelo meteorológico

| Precipitação                                     | Evapotranspiração   |
|--|---|
| Chuva de frequência (Frequency Storm)            | Gridded Penman Monteith                                       |
| Pesos de calibração (Gage Weights)               | Gridded Priestley Taylor                                      |
| Precipitação Matriz (Gridded Precipitation)      | (Média Mensal (Monthly Average))                              |
| Chuva HMR 52 (HMR 52 Storm)                      | Penman Monteith   |
| Distância Inversa (Inverse Distance)             | Priestley Taylor  |
| Chuva SCS (SCS Storm)                            | Evapotranspiração Especificada (Specified Evapotranspiration) |
| Hietograma especificado (Specified Hyetograph)   |   |
| Chuva de projeto padrão (Standart Project Storm) |   |

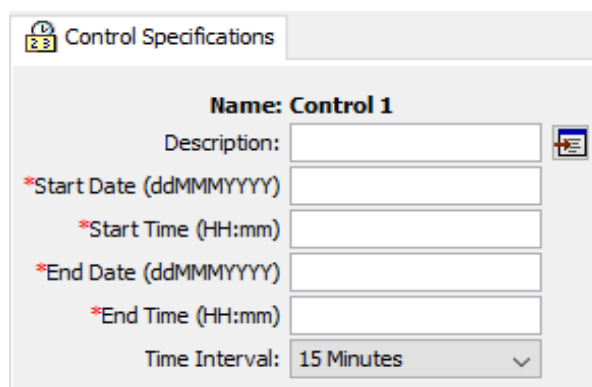
A evapotranspiração deve ser incluída caso o modelo de bacia hidrográfica esteja configurado em simulação contínua usando qualquer um dos métodos de perda. O escoamento é computado através de dados meteorológicos subtraindo-se perdas, transformando o excesso de precipitação e adicionando escoamento de base.

Os dados de evapotranspiração utilizados no presente trabalho foram calculados por meio do software REF-ET, que será explicado brevemente no decorrer do trabalho.

### 2.8.3 Especificações de controle

O principal propósito das especificações de controle é controlar quando as simulações iniciam e terminam, e qual o tempo de intervalo é usado na simulação. (SCHARFFENBERG, 2015) (Figura 1).

Figura 1 - Módulo das especificações de controle para a inicialização da simulação



The image shows a software dialog box titled "Control Specifications". It contains the following fields and controls:

- Name:** Control 1
- Description:** A text input field with a help icon to its right.
- \*Start Date (ddMMYYYY):** A date input field.
- \*Start Time (HH:mm):** A time input field.
- \*End Date (ddMMYYYY):** A date input field.
- \*End Time (HH:mm):** A time input field.
- Time Interval:** A dropdown menu currently showing "15 Minutes".

#### 2.8.4 Dados de séries temporais (Time-series data)

Modelos hidrológicos necessitam de séries de dados de precipitação para estimar a precipitação média na bacia hidrográfica. Uma série de dados de vazão, chamados de vazão observada, são utilizados no processo de calibração e validação do modelo hidrológico.

Nesse módulo, é inserido para cada sub-bacia os dados referentes a precipitação do período analisado, com intervalo de tempo de um dia, juntamente com os dados de evapotranspiração e vazão, a última utilizada para calibração e validação do modelo hidrológico.

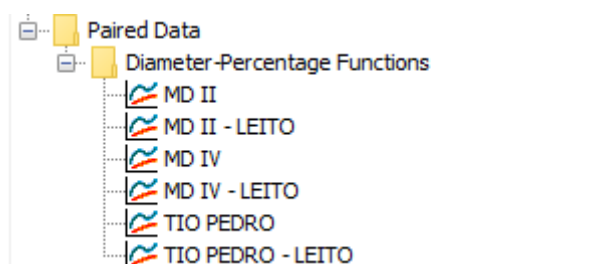
Juntamente, foi inserido também os dados da evapotranspiração que foram obtidos por meio do software REF-ET.

#### 2.8.5 Dados emparelhados (Paired data)

Os modelos hidrológicos muitas vezes necessitam o uso de dados emparelhados para descrever entradas que são funcionais. Os dados funcionais definem uma variável dependente em termos de uma variável independente.

No trabalho foi utilizado o *Diameter-Percentage* no qual é empregado a curva granulométrica dos sedimentos em suspensão e de leito para cada sub-bacia hidrográfica estudada, conforme Figura 2. Esses dados são utilizados pelo modelo no momento da simulação para efetuar o cálculo da produção de sedimentos na bacia hidrográfica.

Figura 2 - Paired Data (Dados emparelhados)



### 2.8.6 Teste de otimização (Optimization trial)

O processo de otimização dos parâmetros presentes no modelo hidrológico HEC-HMS é empregado para a adaptação do modelo geral em uma bacia hidrográfica específica. Alguns parâmetros podem ser estimados diretamente com medições de campo. (USACE-HEC, 2013). Um exemplo é a área que deve ser inserida para um elemento de sub-bacia, o qual pode ser medido diretamente através de medições de campo ou por mapas através de técnicas georreferenciadas.

Outros parâmetros podem ser estimados indiretamente de medições de campo, neste caso, as medições não apresentam valores que podem ser inseridos diretamente no modelo hidrológico, um exemplo disso é a medição da textura do solo correlacionadas com parâmetros como a condutividade hidráulica.

No entanto, há alguns parâmetros que só podem ser estimados comparando seus resultados observados, como medições de vazão no canal.

O resultado da medida quantitativa da qualidade do ajuste entre o calculado e o observado é chamado de função objetivo. A função objetivo serve para verificar o melhor parâmetro de saída em relação a vazão observada em determinada seção da bacia hidrográfica.

A automatização de um parâmetro é realizada por meio da procura de um método de ajuste para minimizar o valor da função objetivo e encontrar o melhor valor otimizado do parâmetro em análise.

No processo de otimização do software HEC-HMS 4.1, calibração automática, inicia-se pela estimativa dos parâmetros iniciais procurando-se realizar o melhor ajuste possível em relação com a vazão observada. Há dois tipos de algoritmos para minimizar as funções objetivo, o *Univariate gradient*, o qual ajusta um parâmetro por vez mantendo os outros constantes e o *Nelder Mead*, o qual ajusta os parâmetros

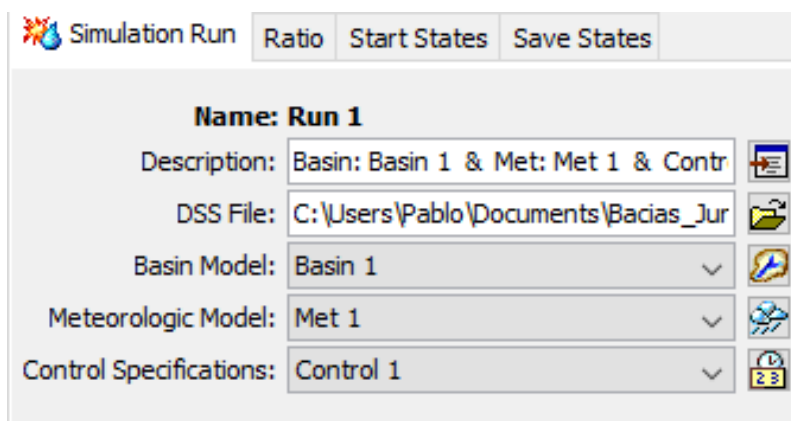
simultaneamente utilizando as iterações anteriores e comparando para encontrar o melhor ajuste.

### 2.8.7 Simulação (Simulation run)

A simulação é o primeiro método de processamento dos resultados. Cada processo de simulação é composto de um modelo hidrológico, um modelo bacia e um controle de especificações, conforme Figura 3.

Os resultados podem ser visualizados em gráficos, tabela de resumos e tabelas de séries temporais por meio do mapa da bacia ou do *Watershed Explorer*.

Figura 3 - Editor do módulo de simulação



## 2.9 SOFTWARE REF-ET

O software REF-ET, produzido pela Universidade de Idaho (College of Agricultural and Life Sciences – Kimberly Research and Extension Center) foi utilizado para o cálculo da evapotranspiração das três sub-bacias em análise.

Para seu funcionamento, é solicitado a inserção de alguns dados conforme Tabela 3, e demonstrado através da Figura 4 que mostra o layout do programa.

Tabela 3 - Dados utilizados no software REF-ET

| Dados utilizados                     |
|--------------------------------------|
| Mês                                  |
| Dia                                  |
| Ano                                  |
| Precipitação (mm)                    |
| Temperatura máxima do ar diária (°C) |
| Temperatura mínima do ar diária (°C) |
| Horas de luz solar diária            |
| Umidade relativa (%)                 |
| Velocidade do Vento (m/s)            |

Figura 4 - Layout do software REF-ET

REF-ET Definition File Setup (The upper lefthand form defines the parameter order and units in the data file)

Data file Name is: MD\_IV.csv  
 Definition File Name: C:\Users\Pablo\Desktop\MD\_IV.def

| Para No. | beg col | end col | The following lists Selected Items in the Data File: |
|----------|---------|---------|--|
| 1        | 1       | 5       | Month, 1-12  |
| 2        | 7       | 11      | Day, 1-31  |
| 3        | 13      | 19      | Year, 0000-2099                                      |
| 4        | 21      | 25      | Precipitation, mm                                    |
| 5        | 27      | 31      | Max Air Temp, C (daily or hourly)                    |
| 6        | 33      | 37      | Min Air Temp, C (daily or hourly)                    |
| 7        | 39      | 43      | Sunshine Hours (daily)                               |
| 8        | 45      | 49      | Ave. Rel. Humidity, %                                |
| 9        | 51      | 55      | Ave. Wind Speed, m/s                                 |

**Parameter Identifiers for the Data**  
 (Double Click on Item below to Insert Item into the Line highlighted in the Box to the Left)

- 26: Wet Bulb Temperature, F
- 27: Dry Bulb Temperature, F
- 28: Ave. Wind Speed, km/day
- 29: Ave. Wind Speed, m/s
- 30: Ave. Wind Speed, mi/day
- 31: Ave. Wind Speed, km/hr
- 32: Ave. Wind Speed, mi/hr
- 321: Ave. Wind Speed, knots
- 33: DayTime (7am-7pm) Wind, km/h
- 34: DayTime (7am-7pm) Wind, m/s
- 35: DayTime (7am-7pm) Wind, mi/h
- 36: Day/Night Wind Ratio, decimal
- 37: Pan Evaporation, mm/day

In the table above, units of '/hr' are always for 'per hour.' However, timesteps can be shorter than one hour.

Note: You can leave column numbers blank or use "" (default) when the data are separated by blanks, commas or tabs

The table below displays several lines of the data file for your reference. A "bar" symbol indicates a tab

| 1                                   | 2                    | 3                    | 4                    | 5                    | 6                    | 7                    | 8                    |
|-------------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 12345678901234567890                | 12345678901234567890 | 12345678901234567890 | 12345678901234567890 | 12345678901234567890 | 12345678901234567890 | 12345678901234567890 | 12345678901234567890 |
| MES;DIA;ANO;P;TMAX;TMIN;INS;UR;UVEN |                      |                      |                      |                      |                      |                      |                      |
| 07.00;16.00;2003.00;                | 21.80;15.20;05.60;08 | .80;78.75;01.10      |                      |                      |                      |                      |                      |
| 07.00;17.00;2003.00;                | 00.00;14.80;01.40;08 | .80;82.25;00.77      |                      |                      |                      |                      |                      |
| 07.00;18.00;2003.00;                | 00.00;21.60;07.00;06 | .60;84.25;00.77      |                      |                      |                      |                      |                      |
| 07.00;19.00;2003.00;                | 00.00;29.40;15.00;08 | .10;65.50;02.43      |                      |                      |                      |                      |                      |

**Data Delimiters**  
 Select the characters (besides a space) used to delimit data columns (i.e., tabs, commas, slashes, etc.):  
 Tab     Comma (,)     Decimal (.)     Slash (/)     Vert.Slash (|)     Colon (:)  
(usually only tab and comma are needed (besides space))  
 Treat two back-to-back delimiters as one?  Yes  No (multiple spaces are always treated as a single delimiter)  
 Are data in the European system where the comma is the decimal?  Yes  No

Insert New ID Line    Delete ID Line    Back    Exit    Cancel    Continue

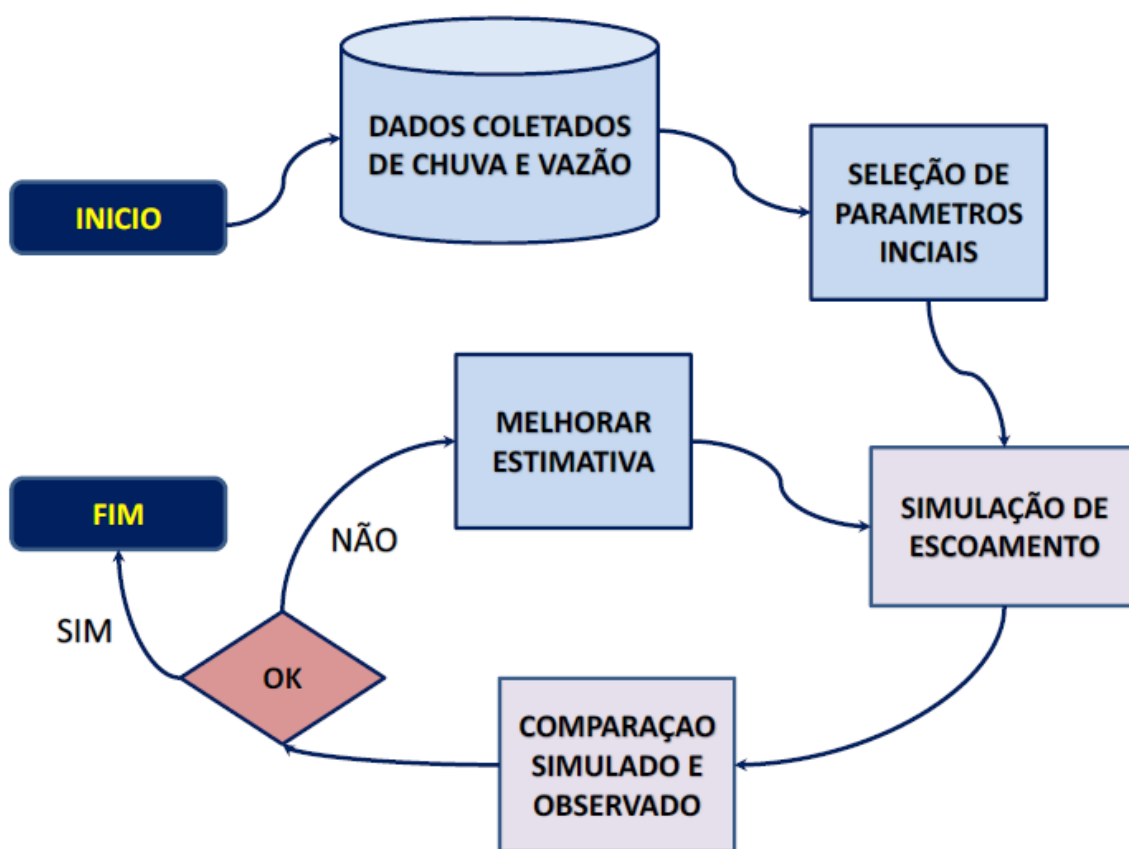
## 2.10 CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO

O processo de calibração no HEC-HMS fundamenta-se principalmente nos parâmetros iniciais que correspondem em geral às características da bacia hidrográfica, e consiste em uma busca sistêmica dos valores dos parâmetros que proporcionam um melhor ajuste entre os dados simulados e os observados, também é chamado de otimização de parâmetros.

A calibração no HEC-HMS pode ser manual ou automática, a manual, consiste em modificações dos parâmetros, os quais podem ser realizados a qualquer momento de acordo com o usuário, o que exige um conhecimento tanto das características da bacia hidrográfica como do funcionamento do programa. A calibração automática é baseada em funções objetivo e nos algoritmos de ajuste que podem ser escolhidos pelo usuário.

No HEC-HMS, o processo de calibração segue o procedimento ilustrado na Figura 5. Este procedimento começa com a coleta de dados. Para os modelos chuva-vazão. Os dados necessários são séries de tempo de precipitação e vazão, para os modelos de propagação, as observações do fluxo de entrada e saída são necessários. O próximo passo é selecionar as estimativas iniciais dos parâmetros, como acontece com qualquer pesquisa, quanto melhor essas estimativas iniciais, mais rápida a pesquisa resultará em uma solução.

Figura 5 - Processo de calibração do HEC-HMS



Fonte: ANDRADE (2016)

### 2.10.1 Função objetivo

As funções objetivo são expressões matemáticas ou métricas, que servem para determinar o maior ou menor ajuste entre o hidrograma simulado e o observado. O HEC-HMS descreve algumas funções objetivo, com a particularidade de algumas serem mais adequadas que outras nos diferentes tipos de situações que se apresentam.

#### 2.10.1.1 Soma dos erros absolutos

Esta função objetivo compara cada ordenada do hidrograma simulado com o seu correspondente no hidrograma observado, designando como erro a diferença existente entre as mesmas. No entanto, como as diferenças podem ser positivas ou negativas, uma soma simples permitiria que diferenças positivas e negativas se compensassem. Na modelagem hidrológica, tanto as diferenças positivas quanto as negativas são indesejáveis. Dessa maneira a função soma as diferenças absolutas, assim, esta função é implicitamente uma medida de ajuste das magnitudes dos picos, volumes e tempos de pico dos dois hidrogramas. Se o valor desta função é igual a zero, o ajuste é considerado perfeito: todas as ordenadas do gráfico hidrográfico calculadas equivalem exatamente aos valores observados, é claro que isso raramente acontece. A função é apresentada pela equação (1) a seguir.

$$Z = \sum_{i=1}^n |(q_o)(i) - q_s(i)| \quad (1)$$

Em que:

Z: função objetivo;

n: número de vezes em que é calculada a diferença de ordenadas;

$q_o(i)$ : vazão observada no instante  $i$ ;

$q_s(i)$ : vazão calculada no instante  $i$ .



### 2.10.1.2 Soma dos resíduos quadráticos

Esta função objetivo é comumente usada para calibração, também compara todas as ordenadas dos hidrogramas, simulado e observado, porém usa as diferenças quadráticas como a medida de ajuste. Esta função também é uma medida da comparação das magnitudes dos picos, volumes e tempos de pico dos dois hidrogramas. A equação (2) apresenta o cálculo dessa função.

$$Z = \sum_{i=1}^n [(q_o)(i) - q_s(i)]^2 \quad (2)$$

Em que:

Z: função objetivo;

n: número de vezes em que é calculado o quadrado da diferença das ordenadas;

$q_o(i)$ : vazão observada no instante  $i$ ;

$q_s(i)$ : vazão calculada no instante  $i$ .

### 2.10.1.3 Erro percentual de pico

Essa função objetivo mede o ajuste do pico do hidrograma calculado para o pico observado, quantificando o ajuste como o valor absoluto da diferença expressada em percentagem. Dessa maneira, superestimar e subestimar são igualmente indesejáveis. A função não reflete erros de volume ou tempo de pico. Esta função objetivo é uma escolha lógica se a informação necessária para a concepção ou planejamento estiver limitada ao pico de vazão ou às fases de pico. A função é apresentada na equação (3).

$$Z = 100 \left| \frac{q_{sp} - q_{0p}}{q_{0p}} \right| \quad (3)$$

Em que:

Z: função objetivo;

$q_{op}$ : vazão de pico observada;

$q_{sp}$ : vazão de pico calculada

#### 2.10.1.4 Erro quadrático médio ponderado

Esta função objetivo considera o quadrado da diferença das ordenadas em cada um dos instantes (i) usados para definir o hidrograma, posteriormente multiplica cada um desses valores por um coeficiente de ponderação. O coeficiente de ponderação assignado a cada ponto é proporcional à magnitude da ordenada, isto é, à magnitude da vazão, de maneira que, para vazões maiores à média das vazões observadas, o coeficiente é maior a um, caso contrário, será menor que um. Posteriormente, somam-se os valores quadráticos ponderados e se dividem pelo número de pontos utilizados para definir o hidrograma e finalmente se aplica a raiz quadrada. A equação desta função objetivo é apresentada conforme a equação (4).

$$Z = \left\{ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(q_o)(i) - q_s(i)]^2 \left( \frac{q_o(i) + q_{om}}{2q_{om}} \right) \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

Em que:

Z: função objetivo;

N: número de vezes em que é calculada a diferença das ordenadas;

$q_o(i)$ : vazão observada no instante i;

$q_s(i)$ : vazão calculada no instante i;

$q_{om}$ : vazão média das vazões observadas nos diferentes instante.

## 2.11 VALIDAÇÃO DO MODELO

O processo de validação de um modelo baseia-se na verificação da calibração que foi realizada, atestando assim se os resultados obtidos foram considerados satisfatórios.

A validação é feita utilizando os parâmetros obtidos na calibração e novamente simulado, no entanto, utilizando dados de precipitação e vazão de períodos distintos dos empregados na calibração.

## 2.12 DESEMPENHO DO MODELO

O software HEC-HMS utiliza-se do coeficiente de eficiência Nash-Sutcliffe (NS) o qual é calculado pela equação (5), para verificar o desempenho das simulações.

$$NS = 1 - \frac{\sum_{t=1}^{nt} [Q_{obs}(t) - Q_{sim}(t)]^2}{\sum_{t=1}^{nt} [Q_{obs}(t) - \bar{Q}_{obs}(t)]^2} \quad (5)$$

Onde:

$Q_{obs}(t)$ : é a vazão observada no passo de tempo  $t$ ;

$Q_{sim}(t)$ : é a vazão simulada;

$\bar{Q}_{obs}(t)$ : é a média das vazões observadas de todo o período de simulação  $nt$ .

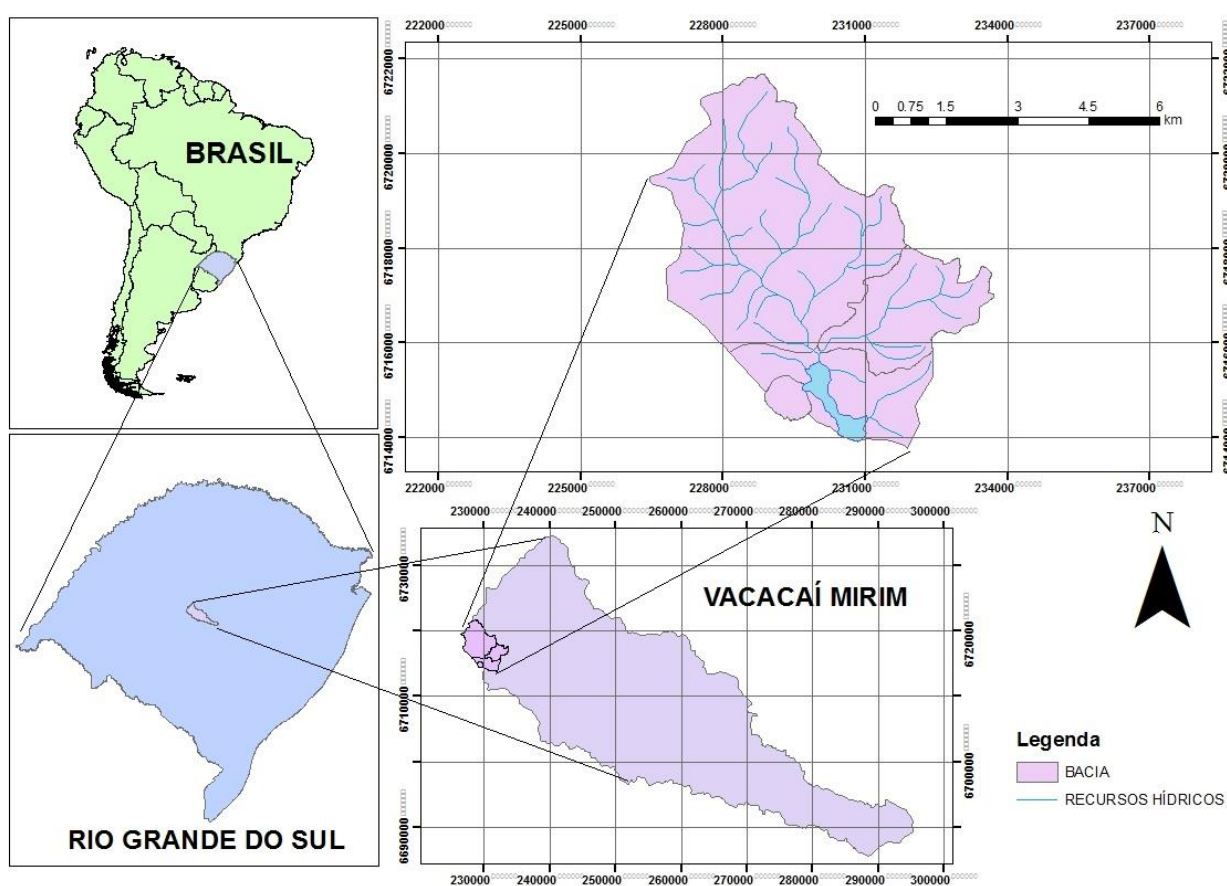
Esse coeficiente é uma medida normalizada, podendo variar entre  $-\infty$  e 1, que compara o erro quadrático médio gerado pela simulação de um modelo com a variância da série definida como meta (GERTINA et al. 2011).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo está localizada na bacia do rio Vacacaí Mirim, conforme Figura 6 na Região Central do Estado do Rio Grande do Sul nos municípios de Santa Maria e Itaara. A Figura 7 apresenta a localização das sub-bacias que foram utilizadas neste estudo.

Figura 6 - Localização da bacia hidrográfica

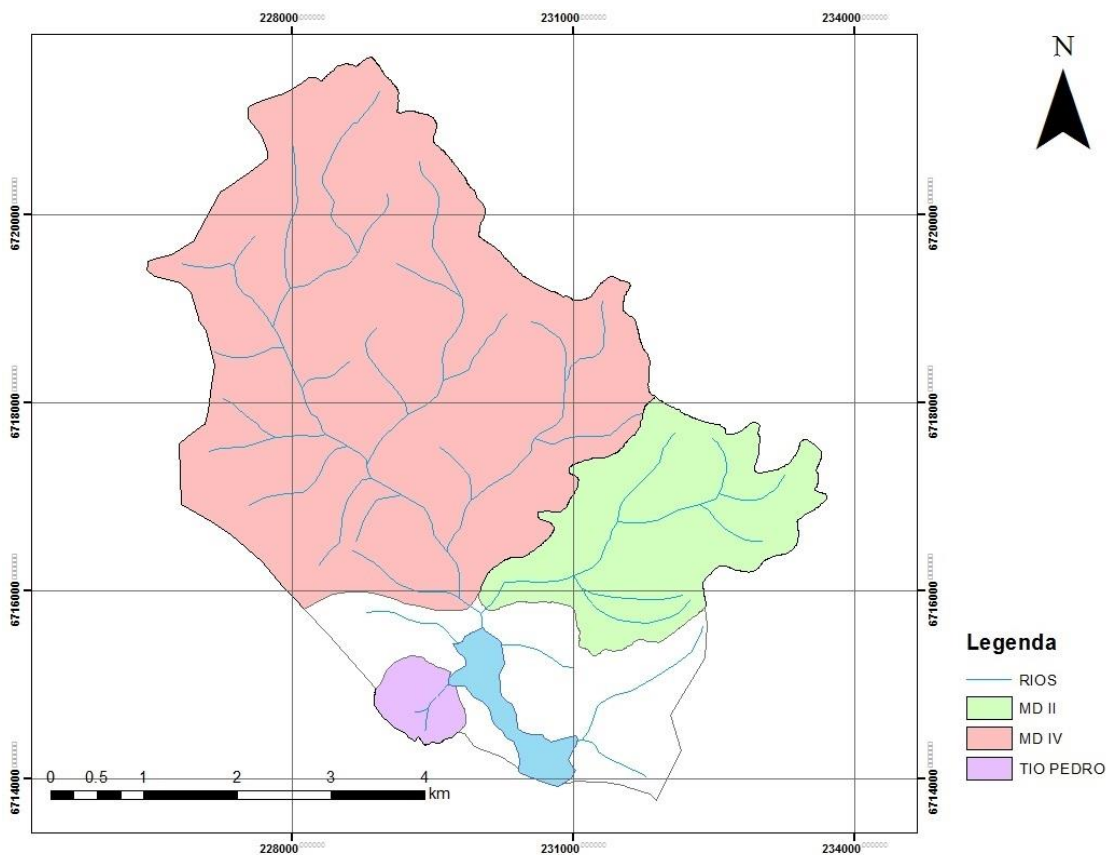


Uma das sub-bacias utilizadas foi a Menino Deus IV (MD IV), com uma área de 18,79 km<sup>2</sup>, monitorada por meio da Estação Fluviométrica localizada nas coordenadas 29°39'29,06" S e 53°47'23,9" O.

Outra sub-bacia que foi utilizada foi a Menino Deus II (MD II), com uma área de 5,03 km<sup>2</sup>, com estação de monitoramento localizada nas coordenadas 29°39'4,71" S e 53°46'10,42" O.

Também foi empregada a sub-bacia do Sítio do Tio Pedro com área de 0,53 km<sup>2</sup>, com estação de monitoramento localizada nas coordenadas 29°39'59,5" S e 53°47'37,6" O.

Figura 7 - Localização das sub-bacias



### 3.1.1 Caracterização da área de estudo

As sub-bacias hidrográficas foram caracterizadas quanto as suas características físicas, pedológicas e de uso e ocupação do solo visando por meio desta caracterização um entendimento do comportamento hidrossedimentológico.

A Tabela 4 apresenta as características físicas das bacias que foram utilizadas.

Tabela 4 - Características físicas das bacias

| Características Físicas           | MD IV | MD II | Sítio do Tio Pedro |
|-----------------------------------|-------|-------|--------------------|
| Área (km <sup>2</sup> )           | 18,79 | 5,03  | 0,53               |
| Declividade média (%)             | 22,64 | 28,92 | 26,8               |
| Comprimento de rampa (km)         | 0,66  | 0,188 | 0,086              |
| Comprimento do rio principal (km) | 7,43  | 3,87  | 0,89               |
| Fator de forma (Kf)               | 0,28  | 0,335 | 0,669              |
| Coefficiente de compacidade (Kc)  | 1,27  | 1,87  | 1,46               |
| Tempo de concentração (min.)      | 96,6  | 54    | 6,87               |

Fonte: BELLINASSO (2002) e PARANHOS (2003).

### 3.1.2 Uso e ocupação do solo

O levantamento do uso e ocupação atual do solo foi feito através da ferramenta ArcMap do software de geoprocessamento ArcGIS 10.1, utilizando-se de imagens de satélites datadas do mês de março de 2016.

A bacia em estudo pode ser caracterizada como rural como é possível observar pela Tabela 5 e pela Figura 8 da qual foram retirados os dados do mapa de classificação do solo, através de análises em cada sub-bacia, obtendo-se as porcentagens de cada uso e ocupação do solo. A vegetação predomina nas três sub-bacias, com 57,19%, 65,49% e 37,17%, respectivamente MD IV, MD II e Sítio do Tio Pedro. Segundo GRUTKA (2013), essa vegetação é composta por mata nativa, pinus e eucalipto.

Figura 8 – Mapa do uso e ocupação do solo

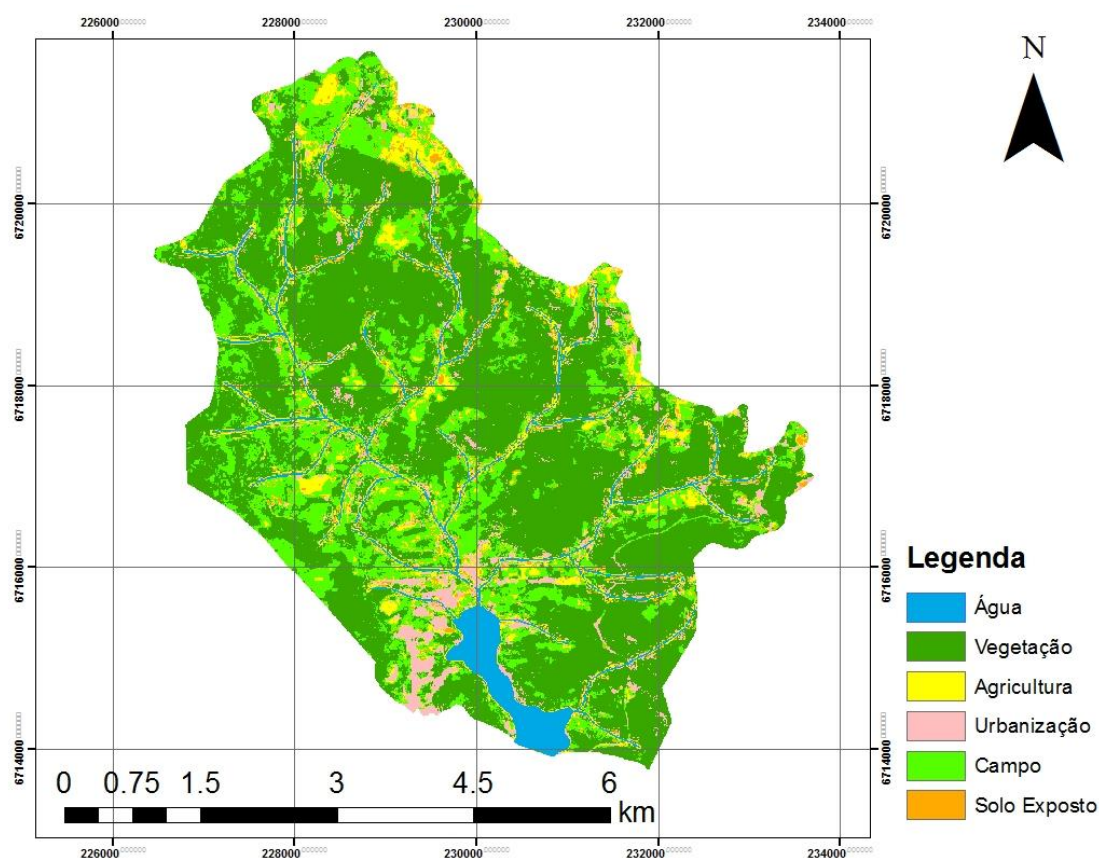


Tabela 5 - Uso e ocupação do solo das sub-bacias

| Uso do Solo  | MD IV                   |       | MD II                   |       | Sítio do Tio Pedro      |       |
|--------------|-------------------------|-------|-------------------------|-------|-------------------------|-------|
|              | Área (km <sup>2</sup> ) | (%)   | Área (km <sup>2</sup> ) | (%)   | Área (km <sup>2</sup> ) | (%)   |
| Água         | 0.57                    | 3.06  | 0.16                    | 3.16  | 0.004                   | 0.83  |
| Vegetação    | 10.75                   | 57.19 | 3.29                    | 65.49 | 0.197                   | 37.17 |
| Agricultura  | 1.51                    | 8.02  | 0.38                    | 7.46  | 0.027                   | 5.16  |
| Urbanização  | 0.76                    | 4.04  | 0.33                    | 6.47  | 0.187                   | 35.21 |
| Campo        | 4.65                    | 24.77 | 0.71                    | 14.04 | 0.111                   | 20.88 |
| Solo Exposto | 0.55                    | 2.92  | 0.17                    | 3.38  | 0.004                   | 0.75  |

### 3.1.3 Classificação do solo

Para a classificação dos solos das áreas estudadas foi utilizado como base o mapa de classificação do solo da bacia do Vacacaí Mirim, confeccionado por CASAGRANDE (2004). Por meio dessa classificação foram obtidos os tipos de solos pertencentes as sub-bacias citadas anteriormente.

A Figura 9 apresenta a classificação do solo para a bacia inteira onde posteriormente foi feito a separação por sub-bacia (Tabela 6), por tipo de solo com sua área e porcentagem presente em cada sub-bacia.

Tabela 6 - Classificação do solo nas sub-bacias

| Tipo de Solo | MD IV                   |       | MD II                   |       | Sítio do Tio Pedro      |       |
|--------------|-------------------------|-------|-------------------------|-------|-------------------------|-------|
|              | Área (km <sup>2</sup> ) | (%)   | Área (km <sup>2</sup> ) | (%)   | Área (km <sup>2</sup> ) | (%)   |
| Re4          | 8.43                    | 44.83 | 3.76                    | 74.75 | -                       | -     |
| Rd1          | 1.12                    | 5.95  | -                       | -     | -                       | -     |
| Tba-Rd       | 2.79                    | 14.82 | 0.74                    | 14.71 | -                       | -     |
| C1           | 0.55                    | 2.93  | 0.05                    | 0.99  | -                       | -     |
| Re-C-Co      | 5.91                    | 31.46 | 0.48                    | 9.54  | 0.436                   | 81.19 |
| Pba1         | -                       | -     | -                       | -     | 0.101                   | 18.81 |

Fonte: Modificado de AZONLIN; MUTTI (1988); PARANHOS (2003); PEREIRA (2010)

Onde:

Re4: Solo Litólico Eutrófico Relevo Montanhoso;

Rd1: Neossolo Litólico Distrófico Ondulado;

Tba-Rd: Associação Argissolo Vermelho-Amarelo Alumínico Alissólico e Neossolo Litólico Eutrófico;

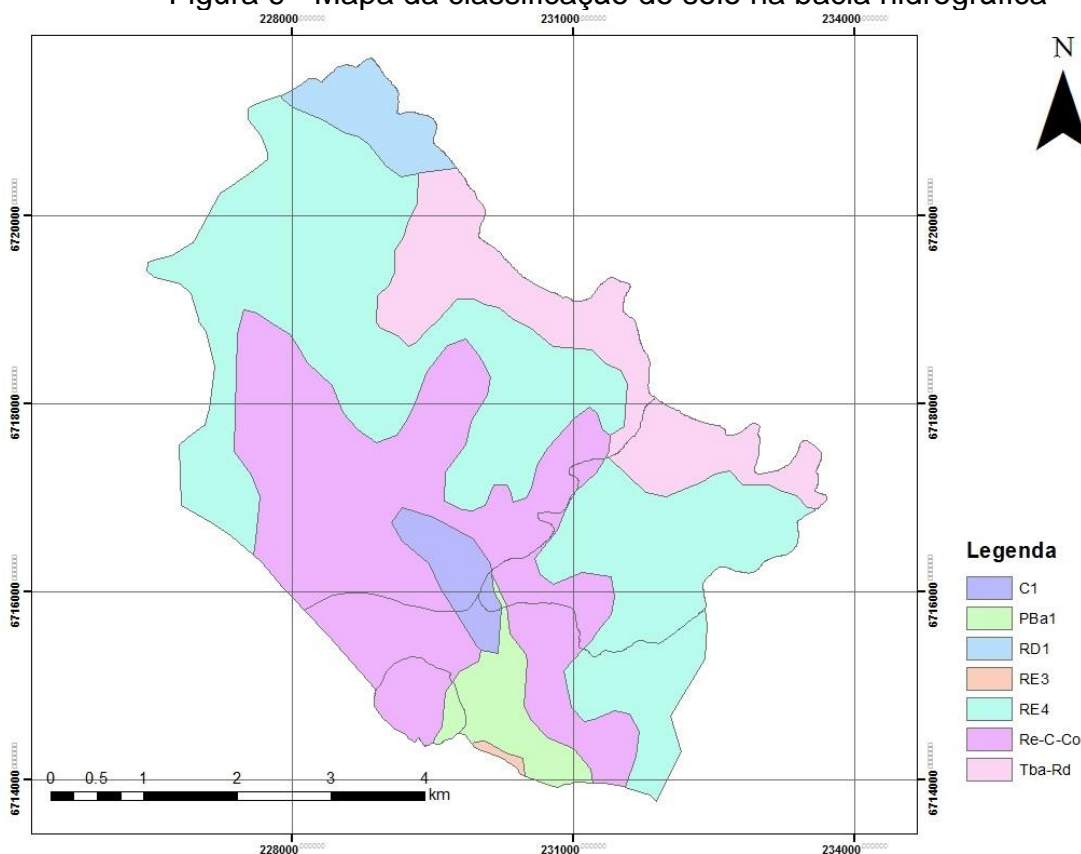
C1: Cambissolo Eutrófico e Distrófico;

Re-C-Co: Associação Neossolo Litólico Eutrófico Chernossólico-Cambissolo-Colúvios.

Pba1: Podzólico Bruno-Acizentado Álico.



Figura 9 - Mapa da classificação do solo na bacia hidrográfica



## 3.2 DADOS PLUVIOMÉTRICOS, FLUVIOMÉTRICOS E SEDIMENTOMÉTRICOS

### 3.2.1 Dados pluviométricos

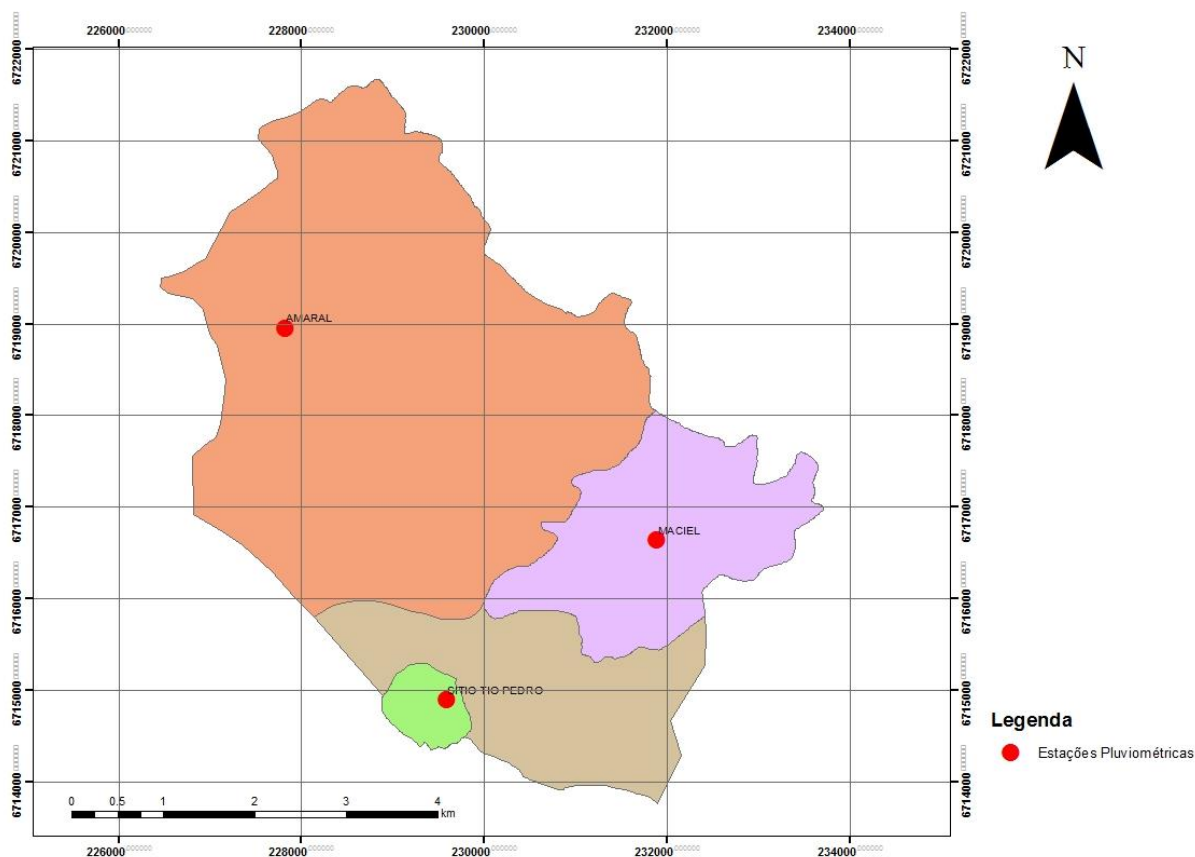
Os dados de chuvas que foram utilizados foram coletados de estações pluviométricas. As estações pluviométricas presentes na bacia, conforme Figura 10, são Rancho do Amaral, Sítio do Maciel e Sítio do Tio Pedro. A primeira localiza-se nas coordenadas  $29^{\circ}37'46,5''$  S e  $53^{\circ}48'39,6''$  O, operando por meio de pluviógrafo eletrônico do tipo cubas basculantes, a estação do Sítio do Maciel localizada nas coordenadas  $29^{\circ}39'2,50''$  S e  $53^{\circ}46'26,21''$  O, esta operada com pluviógrafo de balança com datalogger e a estação do Sítio do Tio Pedro localizada nas coordenadas  $29^{\circ}39'59,5''$  S e  $53^{\circ}47'37,6''$  O.

Conforme a Tabela 7, demonstra os períodos de chuvas diárias analisados para cada sub-bacia.

Tabela 7 - Período de chuvas diárias utilizados

| Sub-bacia          | Período utilizado       |
|--------------------|-------------------------|
| Menino Deus IV     | 06/05/2008 – 07/06/2010 |
| Menino Deus II     | 19/09/2013 - 18/11/2015 |
| Sítio do Tio Pedro | 16/07/2003 – 25/11/2003 |

Figura 10 – Localização das estações pluviométricas



### 3.2.2 Dados fluviométricos

Os dados de cotas que foram empregados no trabalho foram retirados do banco de dados mantido pelo Grupo de Pesquisa em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental (GHIDROS) da Universidade Federal de Santa Maria para o cálculo da vazão. Para se realizar o cálculo das vazões observadas foram utilizadas curvas-chaves, de cada bacia em estudo, desenvolvidas em trabalhos anteriores:

1. Curva-chave da bacia Menino Deus IV (MD IV) de acordo com GRUTKA (2013):

$$Q = 12,83.H^2 - 5,385.H + 0,585, \quad \text{para } 0,20 \leq H \leq 0,30 \text{ m} \quad (6)$$

$$Q = 19,13.H^2 - 11,45.H + 1,884, \quad \text{para } 0,30 \leq H \leq 0,795 \text{ m} \quad (7)$$

$$Q = (0,613.H + 0,696) \quad \text{para extrapolação } H \geq 0,795 \text{ m} \quad (8)$$

Onde:

H: Cota (m);

Q: Vazão (m<sup>3</sup>/s).

2. Curva-chave da bacia Menino Deus II (MD II) de acordo com DE SOUZA (2012):

$$Q = 3,3409.H^{2,2606} \quad \text{para } 0,06 \leq H \leq 0,7624 \text{ m} \quad (9)$$

Onde:

H: Cota (m);

Q: Vazão (m<sup>3</sup>/s).

3. Curva-chave da bacia Sítio do Tio Pedro de acordo com BELLÓ (2004):

$$Q = 0,387.H^{1,6772} \quad \text{para } H \leq 26 \text{ cm} \quad (10)$$

$$Q = 0,003.H^{3,1851} \quad \text{para } H > 26 \text{ cm} \quad (11)$$

Onde:

H: Cota (cm);

Q: Vazão (L/s).

### 3.3 CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO

Nos processos de calibração e validação foram utilizados os seguintes períodos de dados conforme Tabela 8, dados estes diários.

Tabela 8 - Período utilizados na calibração e validação

| Sub-bacia          | Calibração              | Validação               |
|--------------------|-------------------------|-------------------------|
| Menino Deus IV     | 30/07/2013 – 30/07/2014 | 25/07/2014 – 18/11/2015 |
| Menino Deus II     | 15/09/2013 – 15/09/2014 | 16/09/2014 – 27/05/2015 |
| Sítio do Tio Pedro | 16/07/2003 – 26/11/2003 | 16/08/2003 – 26/10/2003 |

Observa-se pela Tabela 8, que o período utilizado na sub-bacia Sítio do Tio Pedro tanto na calibração como na validação são coincidentes, isso ocorre pelo fato dos dados disponíveis para essa sub-bacia serem escassos.

Foi utilizado o coeficiente de desempenho Nash-Sutcliffe para verificar o desempenho das calibrações e validações realizadas durante o trabalho.

### 3.4 CONSTITUINTES DO MODELO

Primeiramente foi necessário a montagem das bacias em estudo no modelo HEC-HMS, para posteriormente a inserção dos dados específicos.

#### 3.4.1 Modelo bacia (Basin model)

Inicia-se o processo com a montagem do layout das bacias que serão estudadas por meio do comando modelo bacia (basin model), onde esse possibilita a inserção das bacias hidrográficas, nesta categoria são inseridos e manipulados os dados referentes à geometria da bacia hidrográfica, sendo representado o esquema hidrológico da área, com as subacias, os trechos dos rios, possíveis reservatórios, junções e divisões dos canais (USACE-HEC, 2013). Neste módulo pode ser ativado o módulo de sedimentos, no qual é possível selecionar os métodos de cálculo de erosão e transporte de sedimentos para a bacia hidrográfica, conforme Figura 11.

Figura 11 - Demonstração do módulo de sedimentos ativo e módulo de sedimentos aberto com os métodos principais e parâmetros dos sedimentos

The figure displays two screenshots of the 'Basin Model Sediment' interface. The left screenshot shows the configuration panel for 'Basin 1' with the following settings:

- Name: Basin 1
- Description: [Empty text box]
- Grid Cell File: [Empty text box]
- Local Flow: Yes
- Flow Ratios: Yes
- Replace Missing: No
- Unit System: Metric
- Sediment: Yes
- Water Quality: No

The right screenshot shows the parameter configuration panel for 'Basin 1' with the following values:

- Transport Potential: Toffaleti
- Cohesive Potential: --None--
- \*Specific Gravity: 2.65
- \*Clay Density (KG/M3): 480.55
- \*Silt Density (KG/M3): 1041.2
- \*Sand Gravel Density (KG/M3): 1489.7
- Fall Velocity: Toffaleti
- Grade Scale: Clay Silt Sand Gravel

Conforme dito anteriormente, existem 7 diferentes métodos para o cálculo da capacidade de transporte de sedimentos disponíveis no modelo HEC-HMS 4.1. Os métodos estão descritos na Tabela 1.

Para a simulação de sedimentos ter início há parâmetros padrões necessários, são eles: peso específico dos sedimentos, densidade da argila ( $\text{kg/m}^3$ ), densidade específica do silte ( $\text{kg/m}^3$ ), densidade específica da areia e do cascalho ( $\text{kg/m}^3$ ). Ainda nesse módulo são apresentados os métodos para calcular a velocidade de queda dos sedimentos, com os seguintes métodos disponíveis: TOFFALETI (1968); RELATÓRIO 12 (Committee Interinstitucional, 1957); RUBEY (1933) e VAN RIJN (1993).

Foi efetuado a simulação com todos os métodos de capacidade de transporte, de sedimentos total e em suspensão, para sedimentos não coesivos, disponíveis e realizada a comparação dos resultados médios, máximos e mínimos com as curvas-chave de trabalhos anteriores.

#### 3.4.2 Ferramenta de criação de sub-bacia (Subbasin creation tool)

A ferramenta criação de sub-bacia (subbasin creation tool) serve para a criação das sub-bacias que serão empregadas na simulação, a partir do momento que é criada uma sub-bacia é possível inserir os dados referentes a mesma, conforme Figura 12.

No elemento hidrológico sub-bacia é calculada as perdas da precipitação por interceptação, evaporação e infiltração, conforme Tabela 9.

Figura 12 - Informações a serem inseridas referente a subacia

| Element Name: MD IV |                      |
|---------------------|----------------------|
| Description:        | <input type="text"/> |
| Downstream:         | Reach-MD IV          |
| *Area (KM2)         | 18.79                |
| Latitude Degrees:   | 29                   |
| Latitude Minutes:   | 39                   |
| Latitude Seconds:   | 29                   |
| Longitude Degrees:  | 53                   |
| Longitude Minutes:  | 47                   |
| Longitude Seconds:  | 24                   |
| Canopy Method:      | Simple Canopy        |
| Surface Method:     | Simple Surface       |
| Loss Method:        | SCS Curve Number     |
| Transform Method:   | SCS Unit Hydrograph  |
| Baseflow Method:    | Recession            |
| Erosion Method:     | Modified USLE        |

Tabela 9 - Métodos disponíveis para cada sub-bacia

| Métodos                               | Opções disponíveis no modelo   |
|---------------------------------------|--|
| Método de Cobertura (Canopy Method)   | Cobertura Dinâmica (Dynamic Canopy)<br>Cobertura Simples Matriz (Gridded Simple Canopy)<br>Cobertura Simples (Simple Canopy)   |
| Método de Superfície (Surface Method) | Superfície Simples Matriz (Gridded Simple Surface)<br>Superfície Simples (Simple Surface)  |
| Método de Perda (Loss Method)         | Deficit e Constante (Deficit and Constant)<br>Exponencial (Exponential)<br>Green and Ampt<br>Deficit Constante Matriz (Gridded Deficit Constant)<br>Gridded Green and Ampt<br>Gridded SCS Curve Number<br>Contabilidade da umidade do solo Matriz (Gridded Soil Moisture Accounting)<br>Inicial e Constante (Initial and Constant)<br>SCS Curva Número (SCS Curve Number)<br>Smith Parlange<br>Contabilidade da umidade do solo (Soil Moisture Accounting) |
| Transform Method                      | Hidrograma Unitário de Clark (Clark Unit Hydrograph)<br>Onda Cinemática (Kinematic Wave)<br>Clark Modificado (ModClark)<br>SCS Hidrograma Unitário (SCS Unit Hydrograph)<br>Hidrograma Unitário de Snyder (Snyder Unit Hydrograph)<br>User-Specified S-Graph   |

|                 |  |
|-----------------|--|
| Baseflow Method | User-Specified Unit Hydrograph               |
|                 | Recessão limitada (Bounded Recession)        |
|                 | Constante Mensal (Constant Monthly)          |
|                 | Reservatório Linear (Linear Reservoir)       |
|                 | Boussinesq não linear (Nonlinear Boussinesq) |
| Erosion Method  | Recessão (Recession)                         |
|                 | Build-up Wash-off                            |
|                 | Gridded RHEM                                 |
|                 | MUSLE  |

Os tipos de cálculos representados são, *Canopy Method* o qual representa a cobertura vegetal existente na bacia; *Surface Method* representa a superfície da bacia, no qual a água possa ser armazenada; *Loss Method* calcula a perda por infiltração real; *Transform Method* que calcula a transformação da precipitação em escoamento superficial; *Baseflow Method* que calcula o escoamento de base, e por fim o *Erosion Method* que calcula a erosão na bacia hidrográfica estudada.

#### 3.4.2.1 Métodos utilizados no elemento subbasin creation tool

Conforme a Figura 12, onde é apresentado os métodos disponíveis no modelo hidrológico e na Tabela 10 são apresentados os métodos que foram utilizados no presente trabalho.

Tabela 10 - Métodos utilizados para a simulação no campo Subbasin

| Métodos                                    | Método escolhido                              |
|--|---|
| Método de Cobertura (Canopy Method)        | Cobertura Simples (Simple Canopy)             |
| Método de Superfície (Surface Method)      | Superfície Simples (Simple Surface)           |
| Método de Perda (Loss Method)              | SCS Curva Número (SCS Curve Number)           |
| Método de Transformação (Transform Method) | SCS Hidrograma Unitário (SCS Unit Hydrograph) |
| Método de Vazão de base (Baseflow Method)  | Recessão (Recession)                          |
| Método de Erosão (Erosion Method)          | MUSLE   |

O método SCS Curva Número (SCS Curve Number ) utilizado para o cálculo da perda por infiltração, que é calculada pelo excesso de precipitação em função da precipitação acumulada, cobertura do solo, uso da terra e umidade antecedente, conforme equação (12).

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \quad (12)$$

Onde:

- P<sub>e</sub>: excesso de precipitação acumulada durante o tempo t;
- P: profundidade de precipitação acumulada no tempo;
- I<sub>a</sub>: perda inicial, para pequenas bacias pode ser estimada pela relação empírica de I<sub>a</sub> e S, sendo I<sub>a</sub> = 0,2. S;
- S: potencial máximo de retenção do solo, calculado pela equação (13).

$$S = \frac{25400 - 254.CN}{CN} \quad (13)$$

Para o cálculo da transformação da precipitação em escoamento superficial, foi utilizado o método SCS Hidrograma Unitário (SCS Unit Hydrograph), o qual baseia-se no hidrograma unitário sintético triangular que propaga o volume gerado da separação do escoamento até o rio (TUCCI, 2005). O software HEC-HMS, utiliza o parâmetro lag time, o qual indica o tempo entre o centro de massa do excesso de água da precipitação e o pico do hidrograma.

O método de Recessão (Recession) que foi selecionado para o cálculo do escoamento de base depende de três parâmetros iniciais, a vazão de base inicial (m<sup>3</sup>/s), a constante de recessão (constante de decaimento exponencial) e a taxa de escoamento (m<sup>3</sup>/s). Conforme a equação (14), o método é definido pela relação do escoamento de base em um instante t, para o valor inicial.

$$Q_t = Q_0 \cdot K^t \quad (14)$$

Onde:

- Q<sub>t</sub>: escoamento de base em um instante t;
- Q<sub>0</sub>: escoamento de base inicial;
- K: constante de decaimento exponencial.



O método de erosão utilizado na simulação foi a equação universal de perdas de solo modificada (MUSLE), conforme citado na Tabela 10, o qual depende de 7 parâmetros iniciais, fator de erodibilidade, fator topográfico, fator de uso e manejo do solo, fator de práticas conservacionistas, limite mínimo de escoamento que causa erosão (m<sup>3</sup>/s), expoente, utilizado para distribuir a carga de sedimentos em um sedimentograma e curva granulométrica do solo do leito do rio. Este método calcula a perda de solo média, em períodos longos, provenientes da erosão laminar e por sulco e é expressa pela equação (15).

$$Y = R.K.LS.C.P \quad (15)$$

Onde:

- Y: perda de solo (ton/ha.ano);
- R: fator de escoamento (m<sup>3</sup>/s);
- K: fator de erodibilidade do solo (ton.h/mj.mm);
- LS: fator topográfico do comprimento de rampa e o grau de declividade;
- C: fator de uso e manejo do solo;
- P: fator de práticas conservacionistas.

Os parâmetros que foram utilizados na simulação para o cálculo da MUSLE, são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 - Valores dos parâmetros da MUSLE utilizado na simulação

| Parâmetros                        | Menino Deus<br>IV | Menino Deus<br>II | Sítio do Tio<br>Pedro |
|-----------------------------------|-------------------|-------------------|-----------------------|
| Fator de escoamento (R)           | 0,3               | 0,3               | 0,3                   |
| Erodibilidade (K)                 | 0,118             | 0,0338            | 0,045                 |
| Topográfico (LS)                  | 0,7646            | 0,145             | 0,371                 |
| Uso e manejo (C)                  | 0,0141            | 0,0166            | 0,021                 |
| Práticas Conservacionistas<br>(P) | 1,0               | 0,2               | 0,2                   |
| Expoente                          | 0,59              | 0,59              | 0,59                  |

Fonte: BRANCO (1998); PARANHOS (2003); BELLÓ (2004)

### 3.4.3 Ferramenta de criação de trecho (Reach creation tool)

Na ferramenta criação de trecho (*Reach Creation Tool*) é calculado a propagação da precipitação no canal com suas perdas e ganhos juntamente com o transporte de sedimentos. Por meio da Figura 13, observa-se que há disponível três opções para o comando, *Routing Method* responsável pela propagação da precipitação, *Loss/Gain Method*, calcula das perdas e ganhos e o *Sediment Method* responsável pelo cálculo do transporte de sedimentos.

Conforme Tabela 12, apresenta-se a quantidade de métodos disponíveis para cada opção citada anteriormente.

Figura 13 - Métodos disponíveis no Reach Creation Tool

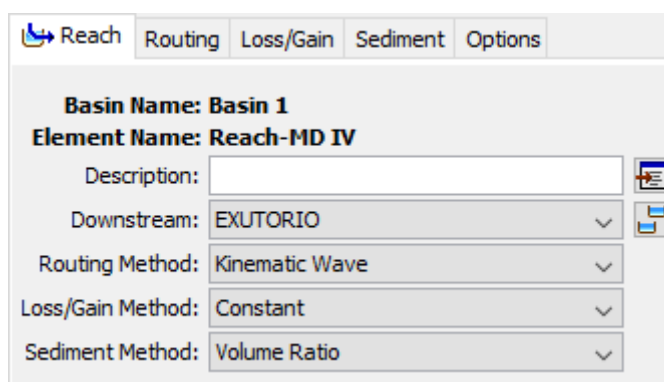


Tabela 12 - Fluxograma dos métodos de cálculo do *Reach Creation Tool*

| Método de Propagação<br>(Routing Method) | Método de<br>Perdas/Ganhos<br>(Loss/Gain Method) | Método de Sedimentos<br>(Sediment Method)      |
|--|--|--|
| Onda Cinemática<br>(Kinematic Wave)      | Constante (Constant)                             | Dispersão de Fischer<br>(Fischer's Dispersion) |
| Lag                                      | Percolação (Percolation)                         | Reservatório Linear<br>(Linear Reservoir)      |
| Puls Modificado (Modified<br>Puls)       |  | Equilíbrio Uniforme<br>(Uniform Equilibrium)   |
| Muskingum                                |  | Proporção de Volume<br>(Volume Ratio)          |
| Muskingum-cunge                          |  |  |
| Straddle Stragger                        |  |  |

### 3.4.3.1 Métodos utilizados no elemento reach creation tool

De acordo com a Tabela 12, onde é apresentado os métodos disponíveis para o cálculo da propagação da precipitação no canal com suas perdas e ganhos juntamente com o transporte de sedimentos. Os métodos que foram utilizados estão presentes na Tabela 13.

Tabela 13 - Métodos escolhidos para a simulação no campo Reach

| Métodos          | Método escolhido                 |
|------------------|----------------------------------|
| Routing Method   | Kinematic Wave / Muskingum-cunge |
| Loss/Gain Method | Constant                         |
| Sediment Method  | Volume Ratio                     |

No método de propagação da precipitação, o método da onda cinemática (kinematic wave) foi utilizado para as sub-bacias Menino Deus IV e Menino Deus II, e o método de Muskingum-cunge foi utilizado para a sub-bacia Sítio do Tio Pedro, devido na calibração e validação, apresentarem os melhores coeficientes de Nash-Sutcliffe.

O método Constante (Constant) depende de dois parâmetros iniciais, a taxa de escoamento e a fração. Este método baseia-se em uma relação empírica para calcular a perda de água no canal utilizando uma redução fixa da taxa de escoamento (é a quantidade de água escoada a ser subtraída pelo escoamento que entra no trecho de rio) e uma fração (é usada para reduzir linearmente o escoamento de entrada em relação à taxa de escoamento). Este escoamento reduzido será a vazão de saída do canal (USACE-HEC, 2013).

O método Proporção de Volume (Volume Ratio) baseia-se na relação do transporte de sedimentos com o escoamento no trecho de rio, calcula a porcentagem de sedimento disponível que sai no trecho de rio para cada intervalo de tempo assumindo como sendo igual à proporção de fluxo de água que sai no mesmo intervalo. Depende de quatro principais parâmetros iniciais, a curva granulométrica inicial do sedimento de leito, que define a distribuição dos sedimentos de leito pelo tamanho do grão no início da simulação; a largura do leito que é utilizada no cálculo do volume das camadas superiores e inferiores do leito; a profundidade do leito que representa a profundidade máxima de mistura ao longo do tempo; fator de leito ativo que é usado para calcular a espessura da camada de fundo do modelo de leito. Em

cada intervalo de tempo, a espessura da camada de fundo é calculada como o D90 do sedimento de leito, multiplicado pelo fator de leito ativo (USACE-HEC, 2013).

As curvas granulométricas dos sedimentos de leito, foram retiradas de trabalhos anteriores e serão apresentados para cada sub-bacia, para a sub-bacia Menino Deus IV, conforme Tabela 14, Menino Deus II, conforme Tabela 15 e para a sub-bacia Sítio do Tio Pedro conforme Tabela 16.

Tabela 14 - Dados granulométricos do material do leito da sub-bacia Menino Deus IV

| Diâmetro (mm) | % passa |
|---------------|---------|
| 0,0014        | 0,00    |
| 0,0089        | 0,19    |
| 0,0648        | 4,85    |
| 0,1251        | 15,80   |
| 0,1769        | 32,75   |
| 0,2291        | 69,85   |
| 0,3202        | 77,60   |
| 0,5869        | 95,00   |

Fonte: BRANCO (1998)

Tabela 15 - Dados granulométricos do material do leito da sub-bacia Menino Deus II

| Diâmetro (mm) | % passa |
|---------------|---------|
| 0,001         | 0,0     |
| 0,010         | 0,0     |
| 0,100         | 0,0     |
| 0,450         | 10,0    |
| 0,500         | 16,0    |
| 1,000         | 35,0    |
| 10,000        | 45,0    |
| 15,000        | 50,0    |
| 30,000        | 58,0    |
| 40,000        | 65,0    |
| 47,000        | 76,0    |
| 50,000        | 84,0    |

Fonte: PARANHOS (2003)

Tabela 16 - Dados granulométricos do material do leito da sub-bacia Sítio do Tio Pedro

| Diâmetro (mm) | % passa |
|---------------|---------|
| 0,025         | 10,0    |
| 0,075         | 20,0    |
| 0,100         | 30,0    |
| 0,140         | 40,0    |

|       |      |
|-------|------|
| 0,180 | 60,0 |
| 0,450 | 90,0 |

---

Fonte: BELLINASO (2002)

#### 3.4.4 Ferramenta de criação de nó (Junction creation tool)

A ferramenta de criação de nó (*Junction Creation Tool*) possui uma ou mais entradas de fluxo e somente uma saída. Todo o fluxo é adicionado conjuntamente para produzir o fluxo de saída, assumindo zero de armazenamento.

Esse elemento não apresenta nenhuma propriedade ou necessidade de inserção de dados.

Foi utilizado para fazer com que os fluxos provenientes das três sub-bacias em análise fossem direcionados somente para um ponto, para que fosse possível realizar a análise e contribuição total das sub-bacias na simulação.

### 3.5 MODELO METEOROLÓGICO (METEOROLOGIC MODEL)

#### 3.5.1 Precipitação

O método utilizado para a inserção dos dados pluviométricos no modelo foi o Hietograma especificado, onde é inserido os dados para cada sub-bacia separadamente, conforme Figura 14.

Figura 14 - Hietograma Especificado

| Specified Hyetograph   |           |
|------------------------|-----------|
| <b>Met Name: Met 1</b> |           |
| Subbasin Name          | Gage      |
| MD II                  | MD II     |
| MD IV                  | MD IV     |
| TIO PEDRO              | TIO PEDRO |

### 3.5.2 Evapotranspiração

O método empregado para a inserção dos dados de evapotranspiração foi o da Evapotranspiração especificada, onde é inserido os dados para cada sub-bacia conforme Figura 15.

Figura 15 - Evapotranspiração Especificada

| Specified Evapotranspiration |               |
|------------------------------|---------------|
| Met Name: Met 1              |               |
| Subbasin Name                | Gage          |
| MD II                        | EVAPO - MD II |
| MD IV                        | EVAPO - MD IV |
| TIO PEDRO                    | EVAPO - TP    |

### 3.6 SIMULAÇÃO HIDROSEDIMENTOMÉTRICA E DESEMPENHO DO MODELO

Realizou-se a divisão dos períodos do ano de acordo com as estações do ano, conforme Tabela 17.

Tabela 17 - Períodos utilizados nas simulações

| Período                                     | Estação do ano |
|---|----------------|
| 21 de dezembro 2013 até 20 de março 2014    | Verão          |
| 21 de março 2014 até 20 de junho 2014       | Outono         |
| 21 de junho 2014 até 20 de setembro 2014    | Inverno        |
| 21 de setembro 2014 até 20 de dezembro 2014 | Primavera      |

Para cada sub-bacia, foi simulado o período de um ano e também nos períodos citados acima referentes as estações, gerando assim cinco simulações para cada uma delas, totalizando um total de quinze simulações.

Foram utilizados os dados de precipitação da estação Sítio do Maciel, localizada na sub-bacia Menino Deus II, para realizar as simulações de sedimentos, pois o mesmo apresentava o período mais recente e com maior constância de dados.

Pode-se observar o desempenho do modelo, com base nos valores do coeficiente de Nash-Sutcliffe, conforme Tabela 18, segundo MORIASI et al. (2007)

Tabela 18 - Classificação do desempenho por meio do coeficiente de Nash-Sutcliffe, segundo MORIASI et al. (2007)

| Classificação do desempenho | Nash-Sutcliffe (NSE)   |
|-----------------------------|------------------------|
| Muito Bom                   | $0,75 < NSE < 1,00$    |
| Bom                         | $0,65 < NSE < 0,75$    |
| Satisfatório                | $0,50 < NSE \leq 0,65$ |
| Insatisfatório              | $NSE \leq 0,50$        |

#### 4 REPRESENTAÇÃO CONCEITUAL DO COMPORTAMENTO DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS PELO MODELO HEC-HMS

Nesse capítulo é descrito como o modelo HEC-HMS descreve conceitualmente a representação do comportamento das bacias hidrográficas.

##### 4.1 PROCESSO DE ESCOAMENTO

O processo de escoamento inicia-se pela precipitação, onde ela cai na vegetação da bacia hidrográfica, na superfície do solo e nos corpos da água (rios e lagos).

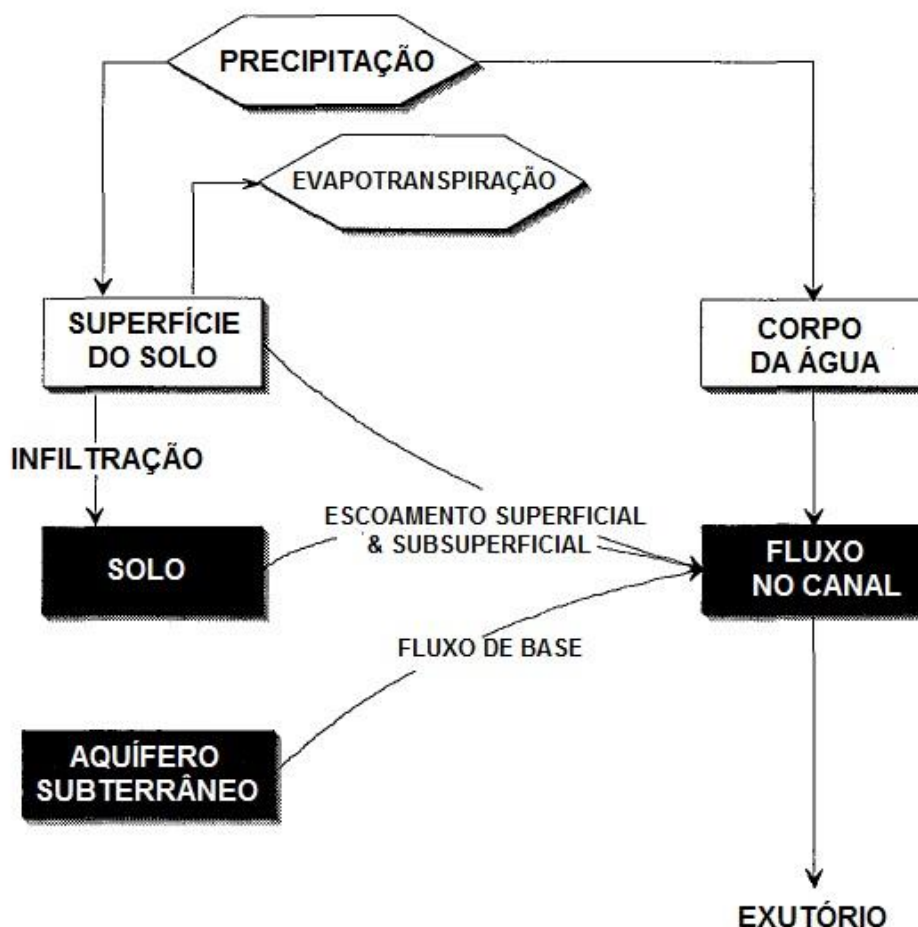
Em um sistema hidrológico natural, grande parte da água que cai em forma de precipitação retorna a atmosfera através da evaporação da vegetação, superfície do solo, corpos da água e através da transpiração da vegetação. Durante um evento de magnitude maior, essa evaporação e transpiração é limitada.

Um pouco da precipitação acaba caindo nas folhas da vegetação ou desce por meio dos ramos, troncos até a superfície do solo, se juntando com a precipitação que caiu diretamente na superfície. A água pode ficar represada no solo, e dependendo do tipo de solo, cobertura do solo, umidade antecedente e outras propriedades da bacia hidrográfica, uma parte pode infiltrar.

Essa água infiltrada é armazenada temporariamente nas camadas superiores parcialmente saturadas do solo. A partir disso, ela ascende novamente por meio da ação da capilaridade, movendo-se horizontalmente como fluxo subsuperficial logo abaixo da superfície, ou ele percola verticalmente para o aquífero de águas subterrâneas abaixo da bacia hidrográfica.

Na Figura 16, é apresentado um diagrama típico da representação do escoamento de uma bacia hidrográfica no modelo HEC-HMS.

Figura 16 - Diagrama típico da representação do escoamento de uma bacia hidrográfica no modelo HEC-HMS



Fonte: Traduzido de FELDMAN (2000)

O HEC-HMS usa modelos separados para representar cada componente do escoamento que estão ilustrados na Figura 16, incluindo:

- Modelos que calculam o volume do escoamento superficial;
- Modelos de escoamento direto (escoamento superficial e subsuperficial);
- Modelos de escoamento de base;
- Modelos de fluxo de canal.



## 4.2 PRECIPITAÇÃO

Conforme ilustrado na Figura 16, a resposta da bacia hidrográfica é dada pela precipitação que cai na bacia e sua evapotranspiração. A precipitação pode ser observada através de eventos históricos, pode ser um evento hipotético baseado na frequência, ou pode ser um evento que representa o limite superior da precipitação disponível numa dada localização.

Dados de precipitação históricos são úteis para a calibração e validação dos parâmetros do modelo, para a previsão em tempo real, e para avaliar o desempenho de obras e regularizações propostas. Os dados das outras categorias, comumente referidos como hipotéticos ou projetos de tempestade, onde são úteis caso a performance deva ser testada com eventos que estão fora do intervalo de observações. Do mesmo modo, os dados de evapotranspiração podem ser valores observados de um registro histórico, ou podem ser valores hipotéticos.

## 4.3 VOLUME DE ESCOAMENTO

O modelo HEC-HMS considera que toda a superfície e água presente na bacia hidrográfica podem ser classificadas como:

- Superfície impermeável;
- Superfície permeável.

Superfície impermeável em uma bacia hidrográfica é aquela porção onde toda contribuição da precipitação se transforma em escoamento, sem infiltração, evaporação ou outras perdas. Precipitação na superfície permeável está sujeita a perdas. O modelo inclui as seguintes alternativas para as perdas acumulativas:

- Modelo de perda inicial e taxa constante;
- Modelo SCS curva número;
- Modelo de perda de Green and Ampt.

#### 4.4 ESCOAMENTO DIRETO

O processo de escoamento direto do excesso de precipitação em uma bacia hidrográfica no modelo HEC-HMS é referido como “transformação” da precipitação em excesso em um ponto de escoamento. Com o modelo, há duas opções para esses métodos de transformação:

- Modelos empíricos (também conhecidos como modelos teóricos do sistema);
- Modelo conceitual.

#### 4.5 ESCOAMENTO DE BASE

O modelo HEC-HMS inclui três modelos alternativos de escoamento de base:

- Escoamento constante, variando mensalmente;
- Modelo de recessão exponencial;
- Modelo de reservatório linear.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados da simulação hidrossedimentométrica realizada nas sub-bacias, MD IV, MD II e Sítio do Tio Pedro, estas inseridas dentro da bacia hidrográfica do Vacacaí Mirim.

### 5.1 DESEMPENHO DO MODELO

Em relação a calibração e validação referente a vazão para cada sub-bacia estudada no presente trabalho, Tabela 19 e Tabela 20 respectivamente.

Inicialmente, foi utilizado os valores dos coeficientes calibrados por TEIXEIRA (2015), como base para a calibração e validação do período que foi utilizado no presente trabalho, devido apresentar em seu trabalho as mesmas áreas.

Tabela 19 - Desempenho da calibração com o coeficiente Nash-Sutcliffe

| Sub-bacia          | Nash-Sutcliffe |
|--------------------|----------------|
| Menino Deus IV     | 0,573          |
| Menino Deus II     | 0,825          |
| Sítio do Tio Pedro | 0,724          |

Tabela 20 - Desempenho da validação com o coeficiente Nash-Sutcliffe

| Sub-bacia          | Nash-Sutcliffe |
|--------------------|----------------|
| Menino Deus IV     | 0,335          |
| Menino Deus II     | 0,575          |
| Sítio do Tio Pedro | 0,831          |

Na Tabela 21 é apresentado os valores de cada parâmetro hidrológico calibrado utilizado no modelo para a simulação.

Tabela 21 - Parâmetros hidrológicos calibrados

| Elemento | Método   | Parâmetro  | Valor Calibrado |
|----------|--|--|-----------------|
| MD IV    | Método de Fluxo Base<br>(Baseflow Method): Recessão<br>(Recession)                                 | Descarga Inicial<br>(Initial Discharge)<br>(m <sup>3</sup> /s) | 0.4027          |
|          |  | Tempo ao pico (Ratio<br>to peak)                               | 0.74657         |
|          |  | Constante de<br>Recessão (Recession<br>Constant)               | 0.88603         |
|          | Método de Perdas (Loss<br>Method): SCS Curva Número<br>(SCS Curve Number)                          | Curva Número (Curve<br>Number)                                 | 20              |
|          |  | Absorção Inicial<br>(Initial Abstraction)<br>(mm)              | 4.8911          |
|          | Método de Cobertura (Canopy<br>Method): Cobertura Simples<br>(Simple Canopy)                       | Armazenamento<br>inicial (Initial Storage)<br>(%)              | 0.0147381       |
|          |  | Armazenamento<br>máximo (Max<br>Storage) (mm)                  | 15.173          |
|          | Método de Superfície (Surface<br>Method): Superfície Simples<br>(Simple Surface)                   | Armazenamento<br>inicial (Initial Storage)<br>(%)              | 6.597           |
|          |  | Armazenamento<br>máximo (Max<br>Storage) (mm)                  | 39.954          |
|          | Método de Transformação<br>(Transform Method): SCS<br>Hidrograma Unitário (SCS Unit<br>Hydrograph) | Tempo de atraso (Lag<br>time) (min)                            | 1600            |

|  |   |  |           |
|--|---|--|-----------|
| Reach -<br>MD IV   | Método de Perdas/Ganhos<br>(Loss/Gain Method): Constante<br>(Constant)                            | Quociente de vazão<br>(Flow rate) (m <sup>3</sup> /s)    | 0.0150598 |
|  |   | Fração (Fraction)  | 0.0382166 |
|  |   | Manning's n  | 0.0550676 |
| MD II  | Método de Fluxo Base<br>(Baseflow Method): Recessão<br>(Recession)                                | Vazão Inicial (Initial<br>Discharge) (m <sup>3</sup> /s) | 0.10449   |
|  |   | Tempo ao pico (Ratio<br>to peak)                         | 0.32711   |
|  |   | Constante de<br>recessão (Recession<br>Constant)         | 0.99323   |
|  | Método de Perdas (Loss<br>Method): SCS Curva Número<br>(SCS Curve Number)                         | Curva número (Curve<br>Number)                           | 29        |
|  |   | Absorção inicial<br>(Initial Abstraction)<br>(mm)        | 0.21035   |
|  | Método de Cobertura (Canopy<br>Method): Cobertura Simples<br>(Simple Canopy)                      | Armazenamento<br>inicial (Initial Storage)<br>(%)        | 0.0508298 |
| Armazenamento<br>máximo (Max<br>Storage) (mm)                                    |   | 20.187   |           |
| Método de Superfície (Surface<br>Method): Superfície Simples<br>(Simple Surface) | Armazenamento<br>inicial (Initial Storage)<br>(%)   | 6.4745   |           |
|  | Armazenamento<br>máximo (Max<br>Storage) (mm)   | 41.138   |           |
|  | Método de Transformação<br>(Transform Method): SCS<br>Hidrogama Unitário (SCS Unit<br>Hydrograph) | Tempo de atraso (Lag<br>time) (min)                      | 1600      |

|                  |  |  |           |
|------------------|--|--|-----------|
| Reach –<br>MD II | Método de Perdas/Ganhos<br>(Loss/Gain Method): Constante<br>(Constant)                             | Quociente de vazão<br>(Flow rate) (m <sup>3</sup> /s)    | 0.0770855 |
|                  |  | Fração (Fraction)  | 0.0664364 |
|                  |  | Manning's n  | 0.3765    |
| TIO<br>PEDRO     | Método de fluxo de base<br>(Baseflow Method): Recessão<br>(Recession)                              | Vazão Inicial (Initial<br>Discharge) (m <sup>3</sup> /s) | 0.001     |
|                  |  | Tempo ao pico (Ratio<br>to peak)                         | 0.6686    |
|                  | Método de Perda (Loss<br>Method): SCS Curva Número<br>(SCS Curve Number)                           | Constante de<br>recessão (Recession<br>Constant)         | 0.57576   |
|                  |  | Curva número (Curve<br>Number)                           | 30        |
|                  | Método de cobertura (Canopy<br>Method): Cobertura Simples<br>(Simple Canopy)                       | Absorção inicial<br>(Initial Abstraction)<br>(mm)        | 0.0436257 |
|                  |  | Armazenemnto inicial<br>(Initial Storage) (%)            | 0.12269   |
|                  |  | Armazenamento<br>máximo (Max<br>Storage) (mm)            | 55.597    |
|                  | Método de Superfície (Surface<br>Method): Superfície simples<br>(Simple Surface)                   | Armazenamento<br>inicial (Initial Storage)<br>(%)        | 0.30695   |
|                  |  | Armazenamento<br>máximo (Max<br>Storage) (mm)            | 39.262    |
|                  | Método de Transformação<br>(Transform Method): SCS<br>Hidrograma Unitário (SCS Unit<br>Hydrograph) | Tempo de atraso (Lag<br>time) (min)                      | 898.89    |

|                         |  |   |                            |
|-------------------------|--|---|----------------------------|
| Reach -<br>TIO<br>PEDRO | Método de Perdas/Ganhos<br>(Loss/Gain Method): Constante<br>(Constant) | Quociente de vazão<br>(Flow rate) (m <sup>3</sup> /s)<br>Fração (Fraction)<br>Manning's n | 0.002<br><br>0.05<br>0.125 |
|-------------------------|--|---|----------------------------|

A calibração e a validação do modelo HEC-HMS versão 4.1 referente a vazão, é considerada aceitável para as sub-bacias Menino Deus II e Sítio do Tio Pedro, com valores de calibração de 0,825 e 0,724 respectivamente e valores de validação de 0,575 e 0,831, demonstrando assim um bom desempenho conforme os critérios apresentados em MORIASI et al. (2007), segundo o qual um valor superior a 0,5 pode ser considerado bom desempenho.

## 5.2 SEDIMENTOS TOTAIS

Foram efetuadas as simulações para todos os métodos disponíveis de produção e transporte de sedimentos não coesivos no modelo, conforme Tabela 22 para a sub-bacia Menino Deus IV, Tabela 23 para a sub-bacia Menino Deus II e a Tabela 24 para a sub-bacia Sítio do Tio Pedro.

Tabela 22 - Valores simulados (t/dia) de produção e transporte de sedimentos para a sub-bacia Menino Deus IV

| Métodos disponíveis | Menino Deus IV<br>Sedimentos Totais |          |        | Menino Deus IV<br>Sedimentos em Suspensão |        |        |
|---------------------|-------------------------------------|----------|--------|---|--------|--------|
|                     | Média                               | Máximo   | Mínimo | Média                                     | Máximo | Mínimo |
| Ackers-White        | 773.40                              | 4693.45  | 26.92  | 36.60                                     | 68.08  | 5.55   |
| Engelund-Hansen     | 3690.39                             | 56370.87 | 0.00   | 122.69                                    | 923.61 | 0.00   |
| Laursen-Copeland    | 2414.48                             | 13973.23 | 131.85 | 101.33                                    | 200.84 | 14.73  |
| Meyer-Peter Muller  | 197.53                              | 787.59   | 21.26  | 10.30                                     | 13.14  | 4.36   |
| Toffaleti           | 118.49                              | 151.35   | 83.59  | 8.54                                      | 21.78  | 1.62   |
| Wilcock             | 56.80                               | 231.74   | 6.20   | 2.96                                      | 3.81   | 1.28   |
| Yang                | 2234.34                             | 13365.54 | 77.65  | 94.85                                     | 193.41 | 9.04   |

Tabela 23 - Valores simulados (t/dia) de produção e transporte de sedimentos para a sub-bacia Menino Deus II

| Métodos disponíveis | Menino Deus II<br>Sedimentos Totais |         |        | Menino Deus II<br>Sedimentos em Suspensão |        |        |
|---------------------|-------------------------------------|---------|--------|---|--------|--------|
|                     | Média                               | Máximo  | Mínimo | Média                                     | Máximo | Mínimo |
| Ackers-White        | 9.24                                | 110.23  | 0.00   | 0.45                                      | 2.79   | 0.00   |
| Engelund-Hansen     | 315.99                              | 4055.00 | 0.00   | 10.65                                     | 57.38  | 0.00   |

|                    |        |         |      |       |       |      |
|--------------------|--------|---------|------|-------|-------|------|
| Laursen-Copeland   | 315.96 | 2102.90 | 0.00 | 13.87 | 33.01 | 0.00 |
| Meyer-Peter Muller | 11.54  | 167.76  | 0.04 | 0.49  | 2.44  | 0.02 |
| Toffaleti          | 3.97   | 4.90    | 1.23 | 0.31  | 0.85  | 0.04 |
| Wilcock            | 44.89  | 251.24  | 1.32 | 2.13  | 3.89  | 0.37 |
| Yang               | 9.27   | 198.81  | 0.00 | 0.59  | 11.01 | 0.00 |

Tabela 24 - Valores simulados (t/dia) de produção e transporte de sedimentos para a sub-bacia Sítio do Tio Pedro

| Métodos disponíveis | Sítio do Tio Pedro Sedimentos Totais |         |        | Sítio do Tio Pedro Sedimentos em Suspensão |        |        |
|---------------------|--------------------------------------|---------|--------|--|--------|--------|
|                     | Média                                | Máximo  | Mínimo | Média                                      | Máximo | Mínimo |
| Ackers-White        | 4.95                                 | 94.99   | 0.00   | 0.09                                       | 0.68   | 0.00   |
| Engelund-Hansen     | 20.09                                | 1699.94 | 0.00   | 0.39                                       | 8.33   | 0.00   |
| Laursen-Copeland    | 17.78                                | 241.45  | 0.00   | 0.34                                       | 1.69   | 0.00   |
| Meyer-Peter Muller  | 2.09                                 | 26.29   | 0.00   | 0.05                                       | 0.21   | 0.00   |
| Toffaleti           | 3.86                                 | 10.43   | 0.00   | 0.18                                       | 1.78   | 0.00   |
| Wilcock             | 6.85                                 | 72.83   | 0.00   | 0.20                                       | 0.56   | 0.01   |
| Yang                | 20.10                                | 489.07  | 0.00   | 0.25                                       | 3.37   | 0.00   |

É possível observar, por meio da Tabela 25, onde é apresentado o valor médio em ton/dia de sedimentos, calculado através do método de TOFFALETI (1969) para transporte de sedimentos e a MUSLE para a erosão nas sub-bacias, em relação ao período de um ano, que a maior contribuição em relação a produção de sedimentos é da sub-bacia MD IV, pelo fato de ter a maior área.

Foi utilizado o método de TOFFALETI (1969), pelo mesmo apresentar os valores sedimentos próximos de trabalhos já efetuados por PARANHOS (2003), BELLINASO (2002), BELLÓ (2004), conforme Tabela 26.

Tabela 25 - Média da descarga total de sedimentos no período de um ano, simulado pelo modelo, usando o método de Toffaleti (1969)

| Sub-bacia          | Média ton/dia |
|--------------------|---------------|
| MD IV              | 118,49        |
| MD II              | 3,97          |
| Sítio do Tio Pedro | 3,86          |

Tabela 26 - Valores médios de trabalhos anteriores

| Trabalho Anterior                     | Valor médio observado | Valor Médio Calculado pela MUSLE |
|---------------------------------------|-----------------------|----------------------------------|
| BRANCO (1998) – MD IV                 | 25,96 ton/dia         | 73,15 ton/dia                    |
| PARANHOS (2003) – MD II               | 6,09 ton/dia          | 7,94 ton/dia                     |
| BELLINASO (2002) – Sítio do Tio Pedro | 7,63 ton/dia          | 23,56 ton/dia                    |



BELLÓ (2004) – Sítio do Tio Pedro                      5,37 ton/dia                      4,93 ton/dia

Por meio dessas médias da descarga total de sedimentos, obtém-se conforme a Tabela 27, a quantidade equivalente de produção de sedimentos em mm/ano para cada sub-bacia, utilizando o peso específico dos sedimentos como  $Y = 2,65 \text{ ton/m}^3$ .

Tabela 27 - Produção de sedimentos em mm/ano

| Sub-bacia          | mm/ano |
|--------------------|--------|
| Menino Deus IV     | 0,87   |
| Menino Deus II     | 0,11   |
| Sítio do Tio Pedro | 1,00   |

Para efeito de comparação, foi efetuado o cálculo de produção de sedimentos em mm/ano com os dados médios dos trabalhos anteriores, conforme Tabela 28.

Tabela 28 - Valores da produção de sedimento em mm/ano de trabalhos anteriores

| Trabalho anterior                      | mm/ano observado | mm/ano calculado pela MUSLE |
|--|------------------|-----------------------------|
| BRANCO (1998) – MD IV                  | 0,19             | 0,54                        |
| PARANHOS (2003) – MD II                | 0,17             | 0,22                        |
| BELLINASSO (2002) – Sítio do Tio Pedro | 1,98             | 6,12                        |
| BELLÓ (2004) – Sítio do Tio Pedro      | 1,39             | 1,28                        |

Para a sub-bacia Menino Deus IV, a mesma apresentou valores de calibração considerado aceitável, 0,573, porém na sua validação apresentou valores abaixo da média esperada, 0,335, o que classifica o seu desempenho como pouco satisfatório.

A produção de sedimentos totais encontrada para as sub-bacias estudadas é considerada elevada em relação aos trabalhos anteriores analisados na mesma área, tendo em vista que a produção média em ton/dia foi de 118,49, equivalente à 0,87 mm/ano, 3,97, equivalente à 0,31 mm/ano e 3,86, equivalente à 0,18 mm/ano, respectivamente para Menino Deus IV, Menino Deus II e Sítio do Tio Pedro, referente ao período de 21 de dezembro de 2013 a 20 de dezembro de 2014.

### 5.2.1 Simulação da produção de sedimentos das estações do ano

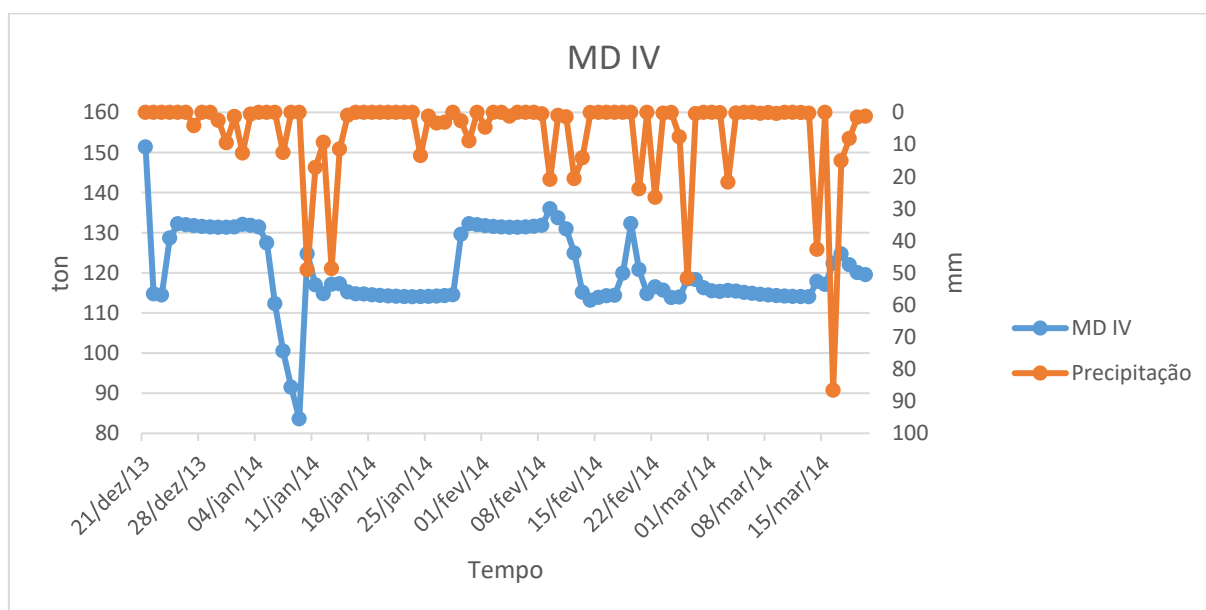
A seguir são apresentados os dados referentes as simulações da produção de sedimentos realizadas para cada estação do ano em cada sub-bacia.

Em relação a simulação, referente às estações climáticas, pode-se observar que a maior produção média de sedimentos ocorreu no verão, por apresentar maior quantidade de precipitações, ou seja, um verão chuvoso. E a menor produção média de sedimentos ocorreu no inverno, época que apresenta menor quantidade de precipitações, ou seja, inverno seco.

#### 5.2.1.1 Menino Deus IV

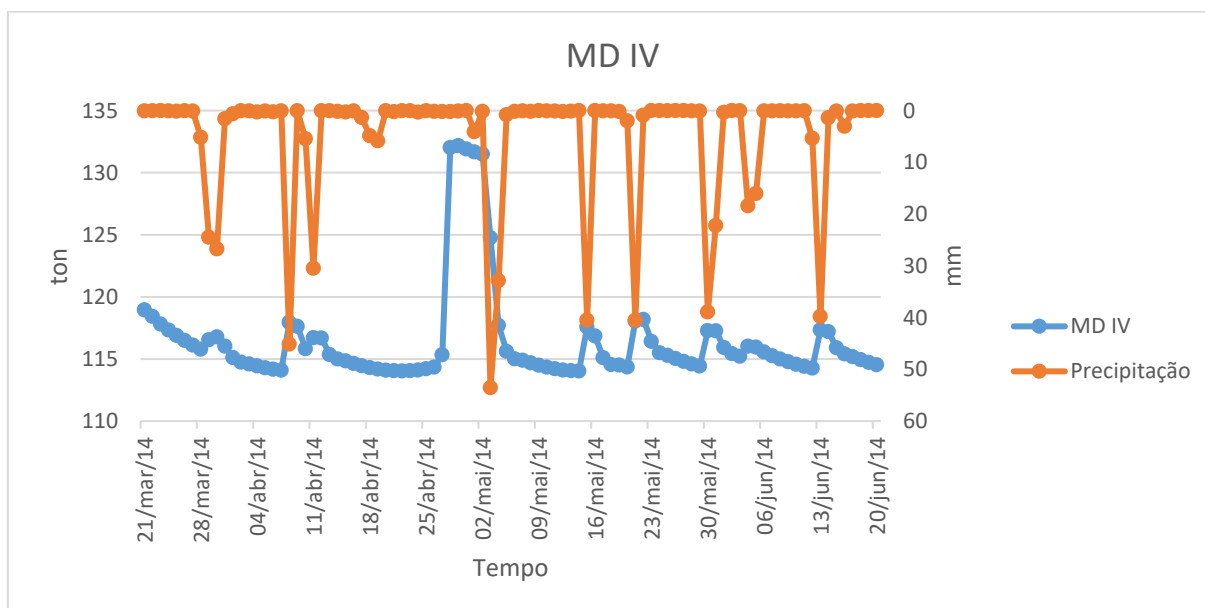
No período correspondente ao verão, 21 de dezembro de 2013 até 20 de março de 2014, a simulação realizada gerou os dados que compõem o gráfico mostrado na Figura 17, e sua produção de sedimentos média foi de 120,48 ton/dia. Pode ser observado a concordância do aumento da produção de sedimentos conforme a quantidade de precipitação presente no determinado dia.

Figura 17 - Gráfico da produção de sedimentos totais em MD IV – Verão



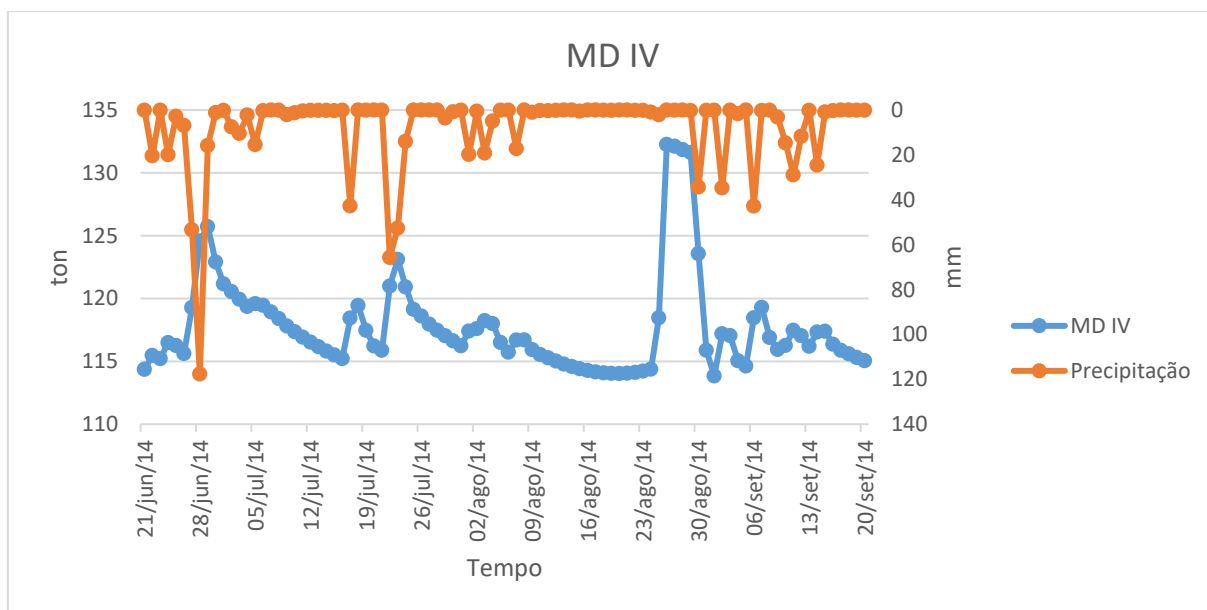
O período correspondente ao outono, 21 de março de 2015 até 20 de junho de 2014, a simulação realizada gerou os dados apresentados no gráfico da Figura 18, e sua produção de sedimentos média foi de 116,47 ton/dia. Pode ser observado a concordância do aumento da produção de sedimentos conforme a quantidade de precipitação presente no determinado dia.

Figura 18 - Gráfico da produção de sedimentos totais em MD IV – Outono



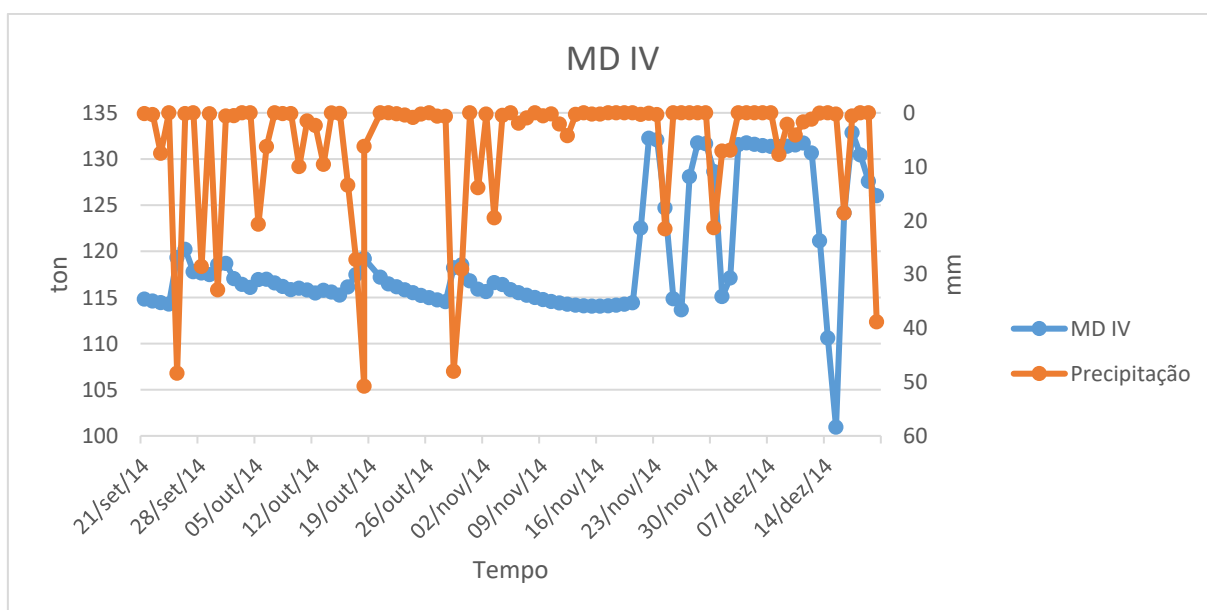
O período correspondente ao inverno, 21 de junho de 2014 até 20 de setembro de 2014, a simulação realizada gerou os dados apresentados no gráfico da Figura 19, onde a produção de sedimentos média foi de 117,76 ton/dia. Pode ser observado a concordância do aumento da produção de sedimentos conforme a quantidade de precipitação presente no determinado dia.

Figura 19 - Gráfico da produção de sedimentos totais em MD IV - Inverno



O período correspondente a primavera, 21 de setembro de 2014 até 20 de dezembro de 2014, a simulação realizada gerou os dados apresentados no gráfico da Figura 20, onde a produção de sedimentos totais média foi de 119,30 ton/dia. Pode ser observado a concordância do aumento da produção de sedimentos conforme a quantidade de precipitação presente no determinado dia.

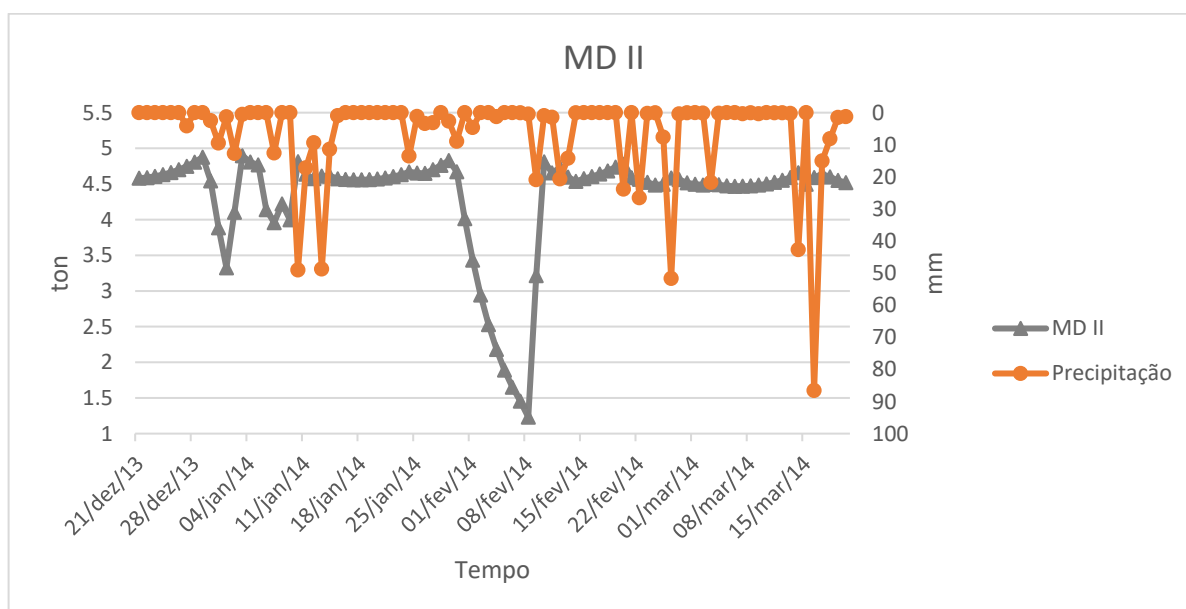
Figura 20 - Gráfico da produção de sedimentos totais em MD IV – Primavera



### 5.2.1.2 Menino Deus II

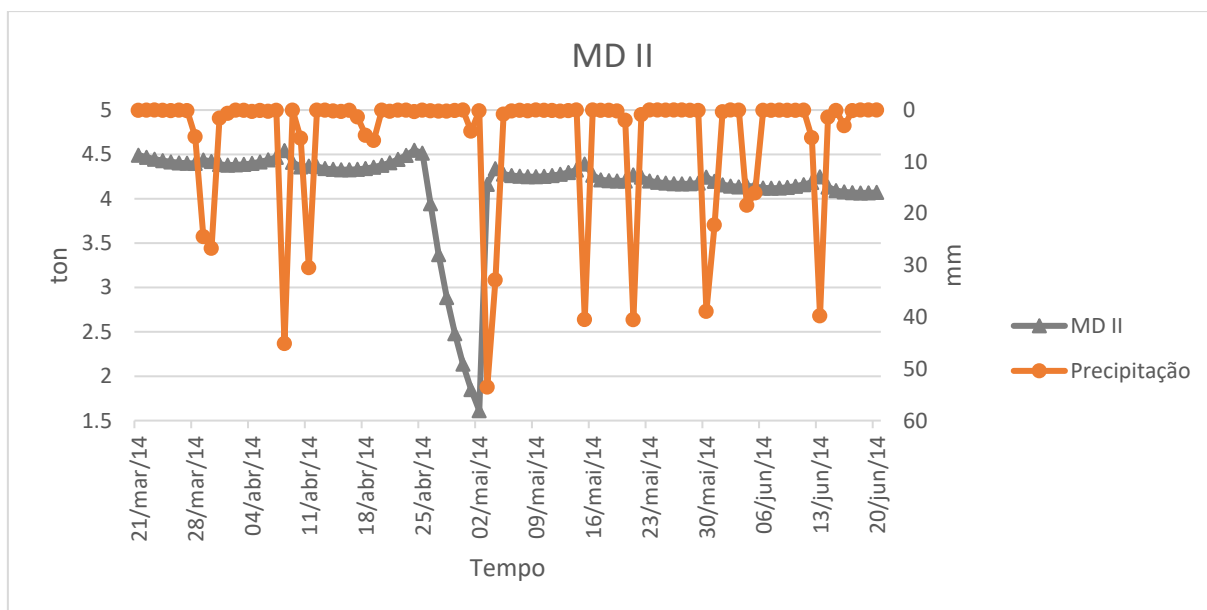
O período correspondente ao verão, 21 de dezembro de 2013 até 20 de março de 2014, a simulação realizada gerou os dados que compõem o gráfico que é demonstrado na Figura 21, onde a produção de sedimentos totais média foi de 4,32 ton/dia. Pode ser observado a concordância do aumento da produção de sedimentos conforme a quantidade de precipitação presente no determinado dia.

Figura 21 - Gráfico da produção de sedimentos totais em MD II – Verão



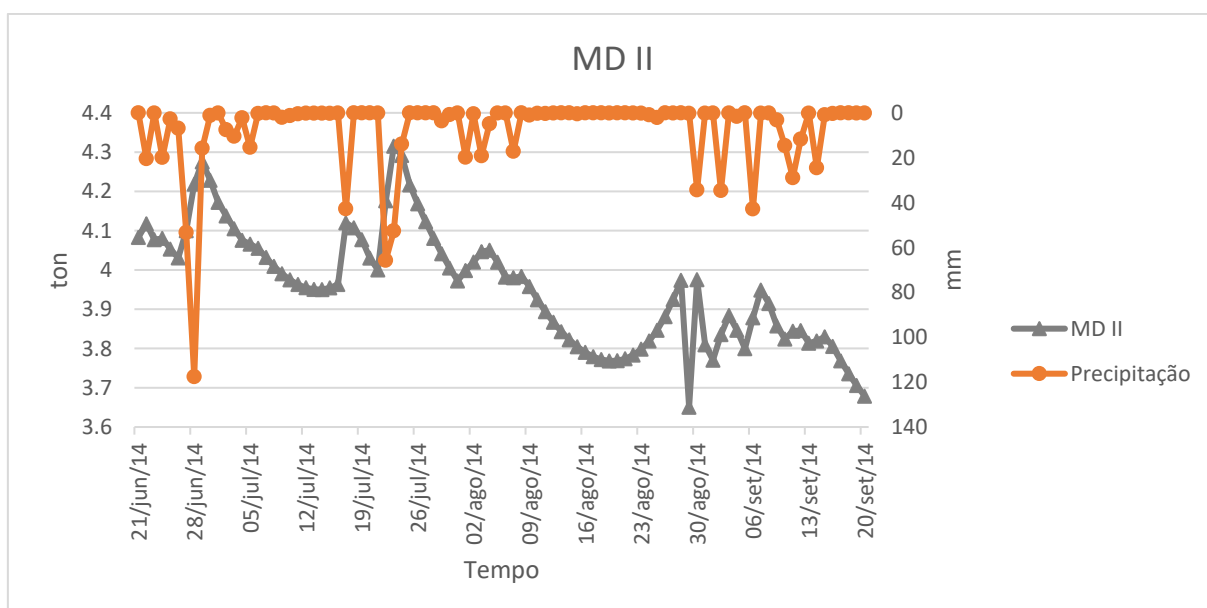
O período correspondente ao outono, 21 de março de 2014 até 20 de junho de 2014, a simulação realizada gerou os dados apresentados no gráfico da Figura 22, onde a produção de sedimentos totais média foi de 4,15 ton/dia. Pode ser observado a concordância do aumento da produção de sedimentos conforme a quantidade de precipitação presente no determinado dia.

Figura 22 - Gráfico da produção de sedimentos totais em MD II – Outono



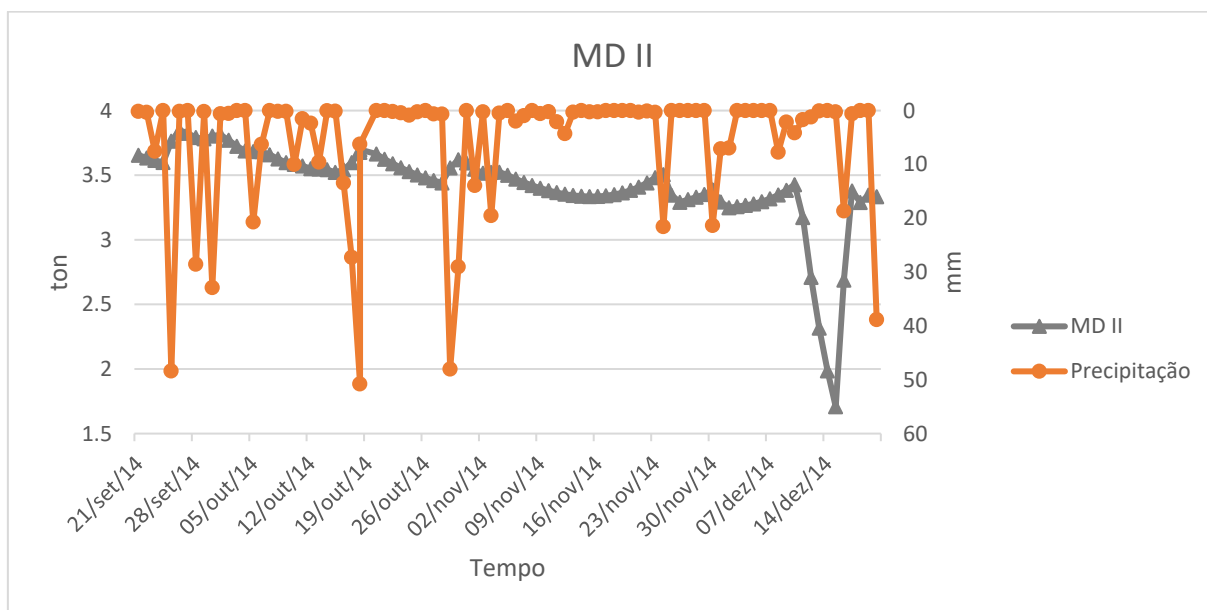
O período correspondente ao inverno, 21 de junho de 2014 até 20 de setembro de 2014, a simulação realizada gerou os dados apresentados no gráfico da Figura 23, onde a produção de sedimentos totais média foi de 3,96 ton/dia. Pode ser observado a concordância do aumento da produção de sedimentos conforme a quantidade de precipitação presente no determinado dia.

Figura 23 - Gráfico da produção de sedimentos totais em MD II - Inverno



O período correspondente a primavera, 21 de setembro de 2014 até 20 de dezembro de 2014, a simulação realizada gerou os dados apresentados no gráfico da Figura 24, onde a produção de sedimentos totais média foi de 3,43 ton/dia. Pode ser observado a concordância do aumento da produção de sedimentos conforme a quantidade de precipitação presente no determinado dia.

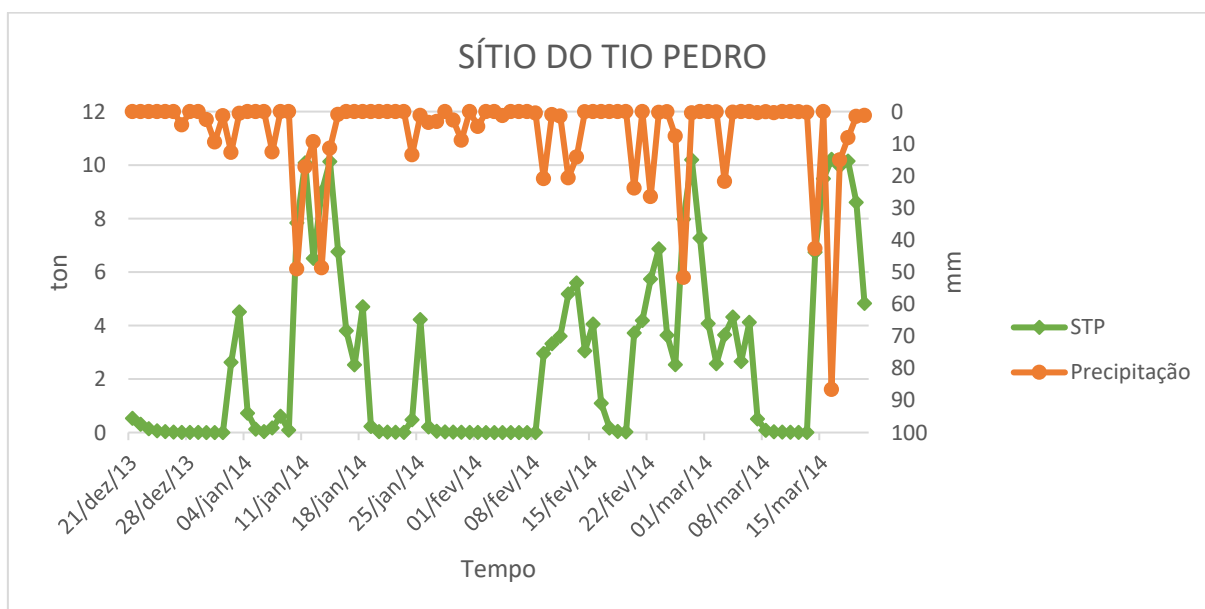
Figura 24 - Gráfico da produção de sedimentos totais em MD II - Primavera



### 5.2.1.3 Sítio do Tio Pedro

O período correspondente ao verão, 21 de dezembro de 2013 até 20 de março de 2014, a simulação realizada gerou os dados que compõem o gráfico da Figura 25, onde a produção de sedimentos totais média foi de 2,67 ton/dia. Pode ser observado a concordância do aumento da produção de sedimentos conforme a quantidade de precipitação presente no determinado dia.

Figura 25 - Gráfico da produção de sedimentos totais em STP - Verão



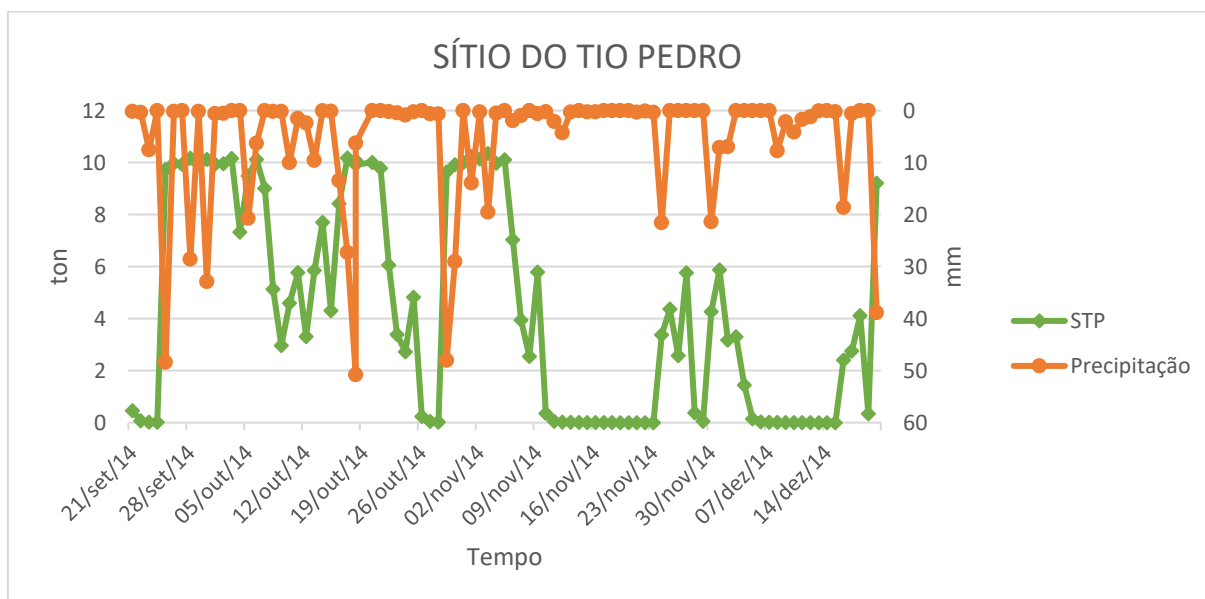
O período correspondente ao outono, 21 de março de 2014 até 20 de junho de 2014, a simulação realizada gerou os dados apresentados no gráfico da Figura 26, onde a produção de sedimentos totais média foi de 2,64 ton/dia. Pode ser observado a concordância do aumento da produção de sedimentos conforme a quantidade de precipitação presente no determinado dia.





O período correspondente a primavera, 21 de setembro de 2014 até 20 de dezembro de 2014, a simulação realizada gerou os dados apresentados no gráfico da Figura 28, onde a produção de sedimentos totais média foi de 4,35 ton/dia. Pode ser observado a concordância do aumento da produção de sedimentos conforme a quantidade de precipitação presente no determinado dia.

Figura 28 - Gráfico da produção de sedimentos totais em STP - Primavera



### 5.3 SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO

Conforme gerado pela simulação e demonstrado na Tabela 29, a produção de sedimentos em suspensão média referente a um dia durante o período de um ano para cada sub-bacia.

Tabela 29 – Média da produção de sedimentos em suspensão

| Sub-bacia          | ton/dia |
|--------------------|---------|
| Menino Deus IV     | 8,54    |
| Menino Deus II     | 0,31    |
| Sítio do Tio Pedro | 0,18    |

Por meio da Tabela 29, observa-se que a maior contribuição de sedimentos em suspensão é referente a sub-bacia Menino Deus IV.

Para comparação dos resultados referente a sub-bacia Menino Deus IV, foi utilizado o trabalho de GRUTKA (2013), onde é apresentado a curva-chave referente a sedimentos em suspensão, obtendo-se os seguintes valores de média, máximo e mínimo com os valores de vazão utilizados na simulação, conforme Tabela 30.

| Tabela 30 - Valores referentes a curva-chave de GRUTKA (2013) (t/dia) |       |        |        |
|---|-------|--------|--------|
| Menino Deus IV – Sedimentos em Suspensão                              |       |        |        |
|   | Média | Máximo | Mínimo |
| GRUTKA (2013)   | 4.12  | 73.93  | 0.07   |

Para comparação referente a sub-bacia Menino Deus II, foi utilizado o trabalho de PARANHOS (2003), onde foi utilizado dois tipos de amostradores, USDH-48 e ANA, para os sedimentos em suspensão para o cálculo da curva-chave, conforme Tabela 31.

| Tabela 31 - Valores referentes a curva-chave de PARANHOS (2003) (t/dia) |         |        |        |       |        |        |
|---|---------|--------|--------|-------|--------|--------|
| Menino Deus II – Sedimentos em Suspensão                                |         |        |        |       |        |        |
|   | USDH-48 |        |        | ANA   |        |        |
|   | Média   | Máximo | Mínimo | Média | Máximo | Mínimo |
| PARANHOS (2003)   | 12.01   | 294.10 | 0.24   | 61.42 | 557.96 | 7.21   |

Para comparação dos resultados obtidos na simulação, com trabalhos já realizados, foram utilizadas as curvas-chave dos trabalhos de BELLINASO (2002), conforme Tabela 32 e BELLÓ (2004), conforme Tabela 33, para os sedimentos totais e em suspensão.

Tabela 32 - Valores referentes a curva-chave de BELLINASO (2002) (t/dia)

|                 | Sítio do Tio Pedro |        |        |                         |        |        |
|-----------------|--------------------|--------|--------|-------------------------|--------|--------|
|                 | Sedimentos Totais  |        |        | Sedimentos em Suspensão |        |        |
|                 | Média              | Máximo | Mínimo | Média                   | Máximo | Mínimo |
| BELLINASO, 2002 | 0,073              | 1,3167 | 0,0002 | 0,26                    | 26,17  | 0,00   |

Tabela 33 - Valores referentes a curva-chave de BELLÓ (2004) (t/dia)

|             | Sítio do Tio Pedro |        |        |                         |        |        |
|-------------|--------------------|--------|--------|-------------------------|--------|--------|
|             | Sedimentos Totais  |        |        | Sedimentos em Suspensão |        |        |
|             | Média              | Máximo | Mínimo | Média                   | Máximo | Mínimo |
| BELLÓ, 2004 | 0,10               | 15,13  | 0,00   | 1,18                    | 25,43  | 0,00   |

A produção de sedimentos em suspensão também apresentou valores elevados em relação a trabalhos anteriores e não estão condizentes com a produção de sedimentos totais, apresentando valores de 8,54, 0,31 e 0,18 ton/dia, respectivamente para as sub-bacias Menino Deus IV, Menino Deus II e Sítio do Tio Pedro.

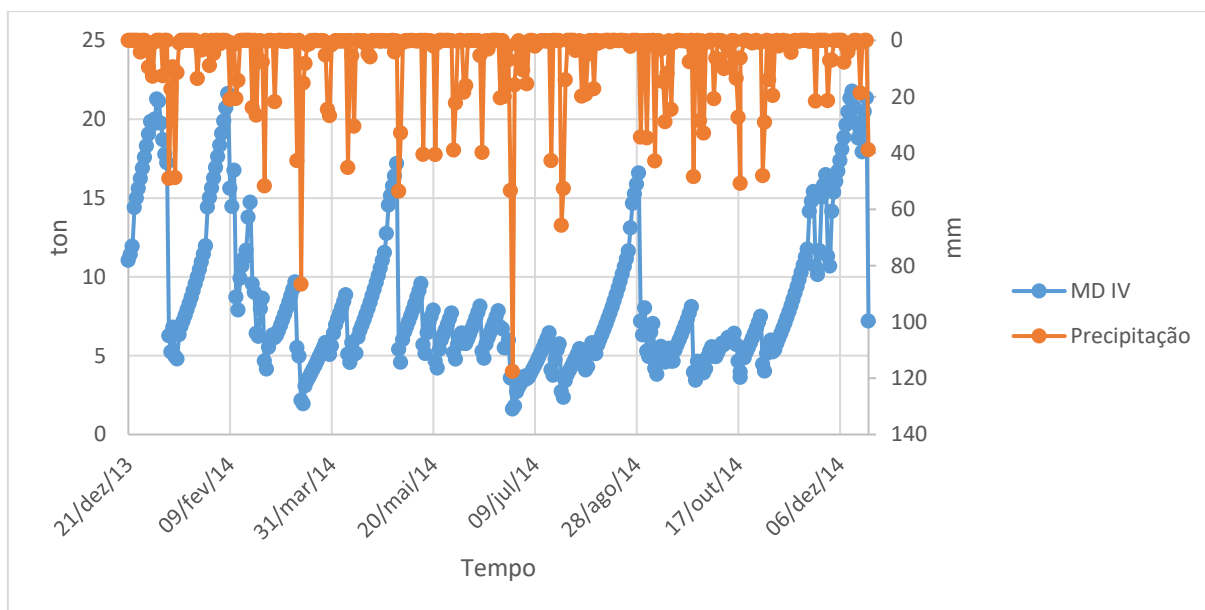
### 5.3.1 Simulação da produção de sedimentos em suspensão

A seguir, será apresentado os dados referentes a produção de sedimentos em suspensão para cada sub-bacia no período de um ano.

#### 5.3.1.1 Menino Deus IV

O gráfico apresentado na Figura 29, é referente a produção de sedimentos em suspensão no período de 21 de dezembro de 2013 até 20 de dezembro de 2014. Pode ser observado a concordância do aumento da produção de sedimentos conforme a quantidade de precipitação presente no determinado dia.

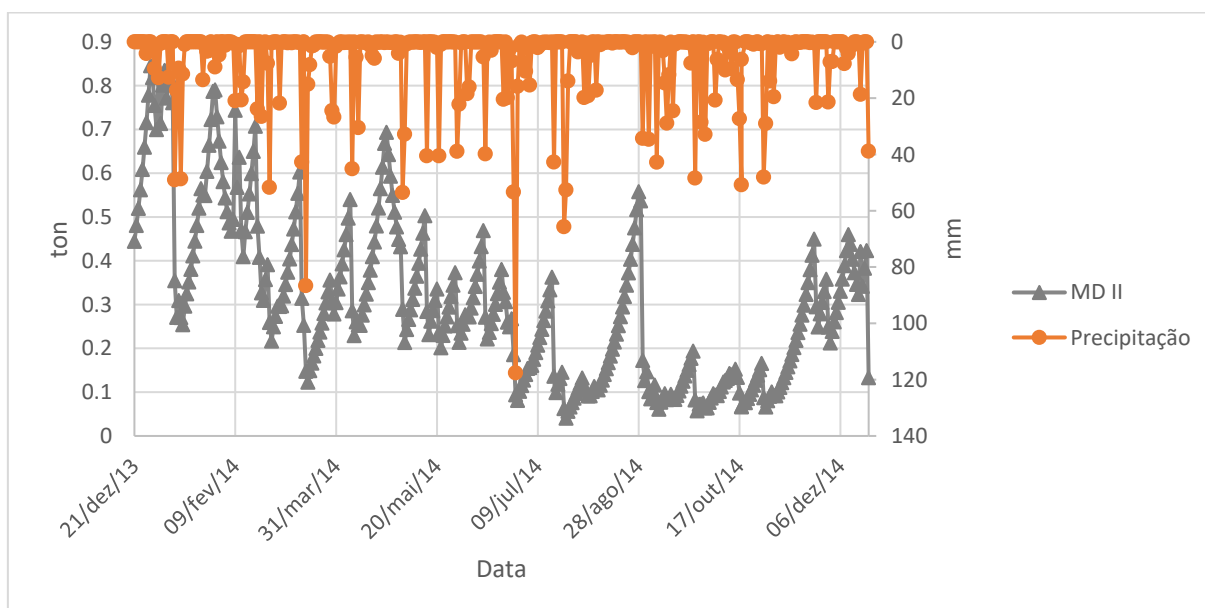
Figura 29 - Gráfico da produção de sedimentos em suspensão em MD IV



### 5.3.1.2 Menino Deus II

O gráfico apresentado na Figura 30, é referente a produção de sedimentos em suspensão no período de 21 de dezembro de 2013 até 20 de dezembro de 2014. Pode ser observado a concordância do aumento da produção de sedimentos conforme a quantidade de precipitação presente no determinado dia.

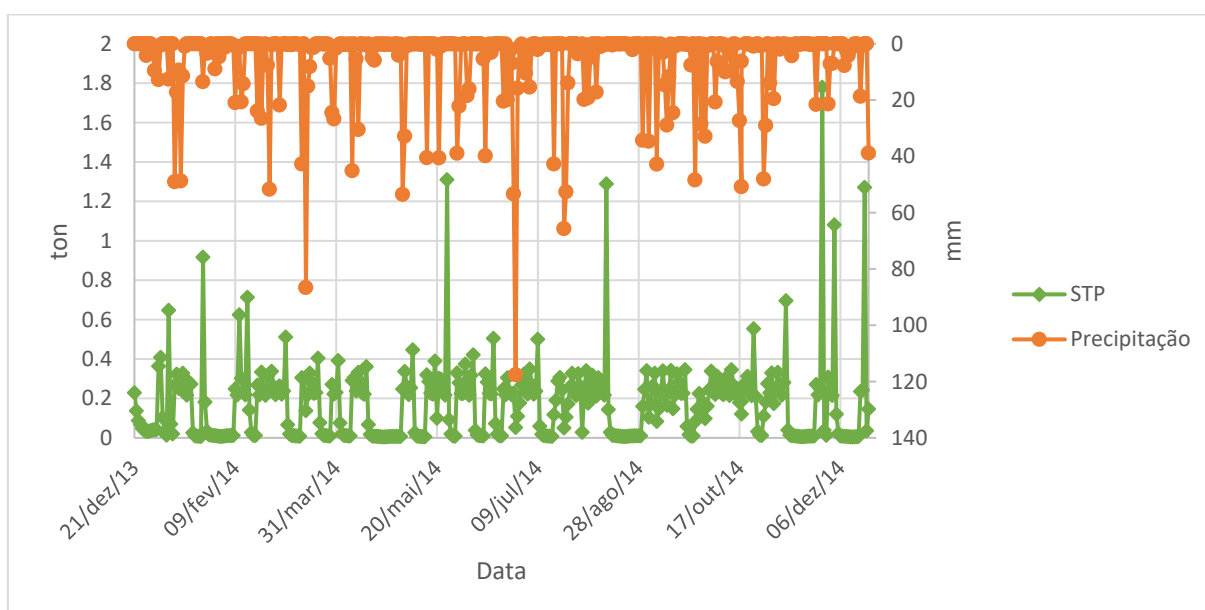
Figura 30 - Gráfico da produção de sedimentos em suspensão em MD II



### 5.3.1.3 Sítio do Tio Pedro

O gráfico apresentado na Figura 31, é referente a produção de sedimentos em suspensão no período de 21 de dezembro de 2013 até 20 de dezembro de 2014. Pode ser observado a concordância do aumento da produção de sedimentos conforme a quantidade de precipitação presente no determinado dia.

Figura 31 - Gráfico da produção de sedimentos em suspensão em STP



Os valores calculados pelo modelo quando comparados com os valores observados nos trabalhos anteriores desenvolvidos na mesma bacia, mostram-se aparentemente discrepantes com relação de BRANCO (1998), PARANHOS (2003) e BELLINASSO (2002), BELLÓ (2004) respectivamente para as bacias Menino Deus IV, Menino Deus II e Sítio do Tio Pedro.

Tais discrepâncias possivelmente podem ser devidas ao fato que o Modelo HEC-HMS considera a produção de sedimentos como sendo a calculada pela Equação Universal de Perda de Solos Modificada (MUSLE), WILLIAMS (1975), tendo como limite de transferência da bacia para o rio a capacidade de transporte obtida pelo método e cálculo de sedimentos fluviais adotado.

No presente trabalho, foram feitas simulações por todos os métodos disponíveis, obtendo-se os melhores resultados finais com o método de TOFFALETI

(1969), tomando-se como referência a ordem de grandeza dos resultados obtidos nos trabalhos anteriores, que por sua vez tem a limitação de terem sido obtidos à partir de curvas-chave de sedimentos obtidas em períodos distintos dos dados de chuva utilizados na simulação. Esses por sua vez foram obtidos de apenas uma das estações na bacia que possuía uma série mais recente de um ano de dados.

Cabe ressaltar que no caso da bacia do Menino Deus II os resultados medidos referem-se apenas ao transporte de sedimentos em suspensão obtidos das curvas-chave publicadas por PARANHOS (2003), o mesmo ocorrendo na bacia do Menino Deus IV, para a qual foram utilizados as curvas-chave de BRANCO (1998). Os resultados referentes à Bacia Sítio do Tio Pedro foram obtidos de curvas-chave desenvolvidas por BELLINASSO (2002) e BELLÓ (2004) referentes a descargas de fundo e em suspensão, ou seja representam descargas totais de sedimentos.

Cabe ainda ressaltar que sistematicamente a literatura nacional e internacional, KAUARK LEITE & MOUCHEL (1990), JOHNSON et al. (1985), GOLDENFUM (1991), BRANCO (1998), BELLINASSO (2002), relatam que a equação Universal de Perda de Solos Modificada (MUSLE) superestima a produção de sedimentos, especialmente quando é aplicada sem a discretização da bacia, e utilização de uma rotina de propagação que leve em conta as perdas no trajeto entre a fonte de geração e a saída da bacia, a exemplo do Modelo de Propagação desenvolvido por WILLIAMS (1975) e WILLIAMS e BERNDT (1977).

Apesar dessas discrepâncias e das incertezas envolvidas no processo os resultados do modelo para a simulação de sedimentos na bacia, podem ser considerados satisfatórios.

#### 5.4 AFLUÊNCIA MÉDIA AO RESERVATÓRIO

Conforme informado anteriormente, foi realizada a simulação no período de 21 de dezembro de 2013 até 20 de dezembro de 2014, com isso, pode-se observar por meio da Tabela 34, a afluência média referente a um ano de sedimentos que chegam ao reservatório localizado na saída da bacia hidrográfica para cada sub-bacia estudada.

Tabela 34 - Afluência média ao reservatório - sedimentos

| Sub-bacia          | ton/ano  |
|--------------------|----------|
| Menino Deus IV     | 43249,57 |
| Menino Deus II     | 1447,68  |
| Sítio do Tio Pedro | 1410,72  |

Foi efetuada também a afluência média referente a um ano das vazões, conforme a Tabela 35, onde mostra a contribuição de cada sub-bacia separadamente.

Tabela 35 - Afluência média ao reservatório - vazões

| Sub-bacia          | m <sup>3</sup> /ano |
|--------------------|---------------------|
| Menino Deus IV     | 17395344,00         |
| Menino Deus II     | 8381491,20          |
| Sítio do Tio Pedro | 531187,20           |

Por meio da Tabela 35, obteve-se um total de 26308022,40 m<sup>3</sup>/ano que chegaram no reservatório durante o período analisado.



## 6 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos nas simulações, demonstraram mesma ordem de grandeza apresentada em outros trabalhos realizados na mesma área de estudo, houve algumas discrepâncias devido ao fato de os períodos em análise serem diferentes e de ter sido utilizado somente dados de precipitação de uma bacia hidrográfica, pelo fato da mesma apresentar os dados mais recentes.

Os valores obtidos para o coeficiente de Nash-Sutcliffe na calibração de 0,573; 0,825; 0,724 respectivamente para as sub-bacias Menino Deus IV, Menino Deus II e Sítio do Tio Pedro, são considerados como satisfatório, muito bom e bom.

Para os valores referentes a validação, os coeficientes de Nash-Sutcliffe foram 0,335; 0,575; 0,831 respectivamente para as sub-bacias Menino Deus IV, Menino Deus II e Sítio do Tio Pedro, são considerados como insatisfatório, satisfatório e muito bom.

Os valores simulados para os sedimentos totais e em suspensão, foram referentes a MUSLE, o que pode ser observado que a MUSLE superestima a produção de sedimentos para as sub-bacias do estudo.

A utilização de modelos hidrológicos serve como ferramenta para o gerenciamento de recursos hídricos buscando informações compatíveis com a realidade local para um melhor planejamento dos mesmos. Assim, os resultados deste trabalho servem como ferramenta e subsídios iniciais para as futuras pesquisas da área de sedimentos para pequenas bacias hidrográficas.

## **7 RECOMENDAÇÕES**

Algumas dificuldades encontradas foram em relação a base de dados de precipitação, pois as mesmas não apresentavam uma grande concordância de períodos, recomenda-se portanto, fazer um monitoramento contínuo, nas sub-bacias analisadas gerando assim um banco de dados com períodos iguais.

Referente a base de dados de vazão, também apresentar um monitoramento mais recente, fazendo com que se tenha uma base relativamente grande no momento de realizar a calibração e validação, e atualização das curvas-chave.

Em relação a sedimentos, empregar uma estação sedimentométrica em cada sub-bacia, para se ter um banco de dados onde se possa utilizá-lo como base para as simulações, calibração e validação, ajustando assim os parâmetros em relação a uma base física existente.

## 8 REFERÊNCIAS

ANDRADE, C. D. **Avaliação de escala de monitoramento e do comportamento hidrológico na bacia do rio Piabanha/RJ** Tese (Doutorado). – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2016.

AZOLIM, L. S. M.; MUTTI, M. A. D. **Solos da Bacia Hidrográfica do Vacacaí-Mirim**. Relatório técnico. Acordo DNOS - UFSM (FATEC), 1987/88.

BELLINASSO, T. B. **Monitoramento hidrossedimentométrico e avaliação da produção de sedimentos em eventos chuvosos em uma pequena bacia hidrográfica urbana de encosta**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, 2002.

BELLÓ, S. L. **Avaliação do impacto da ocupação urbana sobre as características hidrossedimentométricas de uma pequena bacia hidrográfica de encosta**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, 2004.

BRANCO, N.. **Avaliação da produção de sedimentos de eventos chuvosos em uma pequena bacia hidrográfica rural de encosta**. 1998. 135f. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 1998.

CARVALHO, N. O. **Hidrossedimentologia prática**. 2ª Edição Rio de Janeiro: CPRM, 2008.

CARVALHO, N. O.; FILIZOLA Jr, N. P.; SANTOS, P. M. C. dos; *et alii*. **Guia de avaliação de assoreamento de reservatórios**. Brasília: ANEEL, 2000b.

CASAGRANDE, L. **Avaliação do parâmetro de propagação de sedimentos do modelo de williams (1975) na bacia do rio Vacacaí-Mirim com o auxílio de técnicas de geoprocessamento**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, 2004.

FELDMAN, A. D. **Hydrologic modeling system HEC-HMS: technical reference manual**. US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, 2000.

GETIRANA, A. C. V. et al. **Calibração e validação de modelo hidrológico com observações in situ, altimetria e gravimetria espaciais**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 16, n. 1, p. 29-45, 2011.

GOLDENFUM, J. A. **Simulação Hidrossedimentológica em pequenas Bacias Rurais**. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Curso de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento. n.p. Diss. mest. hidrologia aplicada.1991.

GOLDENFUM, J. A. **Pequenas bacias hidrológicas: Conceitos Básicos**. In: PAIVA, JBD de; PAIVA, E. M. C. D. Hidrologia aplicada à mgestão de pequenas bacias hidrográficas. Porto Alegre: ABRH, p. 3, 2001.

GRUTKA, L. **Estudo das relações entre descargas sólidas e líquidas obtidas por meio de diferentes métodos de medição**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2013.

GUERRA, A. J. T.; BOTELHO, R. G. M. **Características e propriedades dos solos relevantes para os estudos pedológicos e análise dos processos erosivos**. Anuário do Instituto de Geociências, v. 19, p. 93-114, 1996.

HALWATURA, D.; NAJIM, M. M. M. **Application of the HEC-HMS model for runoff simulation in a tropical catchment**. Environmental Modelling & Software, v.46, p.155-162, 2013.

HEGEDÜS, P.; CZIGÁNY, S.; BALATONYI, L.; PIRKHOFFER, E. **Analysis of Soil Boundary Conditions of Flash Floods in a Small Basin in SW Hungary**. Central European Journal of Geosciences, v. 5, n. 1, p.97-111, 2013.

JOHNSON, C. W. et al. (1985). **Northwest rangeland sediment yield analysis by the MUSLE**. Transactions of the ASAE, 28(6). 1989-1895.

KAUARK LEITE, L. A. & MOUCHEL, J. M. **Contribuição à modelagem da poluição difusa de origem agrícola. Transporte de sólidos em suspensão e de nitrogênio em pequenas bacias hidrográficas**. Revista Brasileira de Engenharia. Rio de Janeiro: 1990. 1. nº. Dez. 1990. p. 5-19.

LOPES, G. R. et al. **Reflexões sobre a elaboração e a aplicação de curva-chave de sedimentos em pequenas bacias**. In: LIMA, J. E. F.; LOPES, W. T. A. (Org.). Engenharia de Sedimentos: na busca de soluções para problemas de erosão e assoreamento. Brasília: ABRH, cap. 8, p. 141-155, 2011.

MACEDO, R. L. **Estudo hidrológico da bacia do rio negrinho – SC utilizando o HEC-HMS. 2010**. Trabalho de conclusão de curso (Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

MACHADO, R. E. **Simulação de escoamento e de produção de sedimentos em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, 2002.

MEENU, R.; REHANA, S.; MUJUMDAR, P. P. **Assessment of hydrologic impacts of climate change in Tunga–Bhadra river basin, India with HEC-HMS and SDSM**. Hydrological Processes, v. 27, p. 1572-1584, 2013.

MORIASI, D. N.; ARNOLD J. G.; VAN LIEW, M. W.; BINGNER, R. L.; HARMEL, R. D.; VEITH, T.L. **Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations**. Transactions of the ASABE, v. 50, n. 3, p. 885-900, 2007.

PAIVA, E. M. C. D.; PAIVA, J. B. D.; PARANHOS, R. M. **Produção de Sedimentos em Pequenas Bacias Hidrográficas Rurais**. In: PAIVA, E. M. C. D.; PAIVA, J. B. D. (Ed.). **Caracterização Quali-Quantitativa da Produção de Sedimentos**. Santa Maria: ABRH: UFSM, p. 35-51, 2000.

PAK, J. H. et al. **Modeling Surface Soil Erosion and Sediment Transport Processes in the Upper North Bosque River Watershed, Texas.** Journal of Hydrologic Engineering, 2015. DOI: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584. 0001205.

PAK, J. H. et al. **Soil erosion and sediment yield modeling with the hydrologic modeling system (HEC-HMS).** In: World Environmental and Water Resources Congress. 2008.

PAK, J. H. et al. **Sensitivity analysis for sediment transport in the hydrologic modeling system (HEC-HMS).** In: Proc., Joint Federal Interagency Conf. 2015.

PARANHOS, R. M. **Avaliação de metodologia para a estimativa de produção de sedimentos em uma pequena bacia rural de encosta.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.

PEREIRA, M. A. **Processos hidrossedimentológicos em diferentes escalas espaço temporais no bioma mata atlântica.** 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2010.

PINTO, C. S. B. **Modelagem da resposta hidrológica às mudanças de uso e cobertura da terra na bacia do Barro Branco/São José de Ubá – RJ.** Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

SANTOS, I. et al. **Hidrometria aplicada.** Curitiba: Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, 2001.

SARDOII, E. R. et al. Calibration of loss estimation methods in HEC-HMS for simulation of surface runoff (Case Study: Amirkabir Dam Watershed, Iran). **Advances in Environmental Biology**, v. 6, n. 1, p. 343-348, 2012.

SCHARFFENBERG, W. A. **Hydrologic Modeling System HEC-HMS: User's Manual**. US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, 2015.

SIFONTES, V. E.; MOYA, R. M. P. Aplicación del esquema hidrometeorológico para HEC-HMS en Las Coloradas. **Ingeniería Hidráulica y Ambiental**, v. 33, n. 3, p. 72-85, 2012.

SILVA, M. M. G. T.; WEERAKOON, S. B.; HERATH, S. **Modeling of Event and Continuous Flow Hydrographs with HEC–HMS: Case Study in the Kelani River Basin, Sri Lanka**. *J. Hydrol. Eng.*, v. 19, p. 800-806, Apr. 2014.

SKHAKHFA, I, D.; OUERDACHI, L. Hydrological modelling of wadi Ressoul watershed, Algeria, by HEC-HMS model. **Journal of Water and Land Development**, v. 31, n. 1, p. 139-147, 2016.

SOUZA, M. M. D. **Carga de poluição difusa em bacias hidrográficas com diferentes impactos antrópicos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012.

TEIXEIRA, L. C. **Caracterização Hidrossedimentométrica de uma pequena bacia hidrográfica e balanço sedimentométrico no reservatório do Vacacaí Mirim**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.

TOFFALETI, F. B. (1969) “**Definitive Computations of Sand Discharge in Rivers**”. *Journal of the Hydraulics Division. ASCE.*, Vol. 95, no. HY1, p. 225-246.

TUCCI, C.E.M. **Modelos hidrológicos**. 1. ed. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 669p, 1998

TUCCI, C.E.M. **HIDROLOGIA: Ciência e aplicação**. Porto Alegre, Editora da Universidade-ABRH-EPUSP, 1993.

TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos**. Porto Alegre: Ed. UFRGS/ABRH, 2. ed., 678 p. 2005.

WILLIAMS, J. R. **Sediment routing for agricultural watersheds**. Water Resources Bulletin, 1975. v.11 no 5, p. 965- 974.

WILLIAMS, J. R.; BERNDT, H. D. **Sediment yield prediction based on watershed hydrology**. Transactions of the ASAE, 1977. v.20, no 6, p. 1100-1104.