

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AMBIENTAL

AMANDA DOMINGUES SCHAFHAUSER

ESTUDO DO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EM RIOS: ESTUDO DE
CASO NO RIO VERDE

CURITIBA
2016

AMANDA DOMINGUES SCHAFHAUSER

ESTUDO DO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EM RIOS: ESTUDO DE
CASO NO RIO VERDE

Projeto apresentado à disciplina TT037 – Projeto Final II do curso de Engenharia Ambiental, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à conclusão do curso de Engenharia Ambiental.

Orientadora: Prof. Cynara de Lourdes da Nóbrega Cunha

CURITIBA

2016



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE TECNOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

TERMO DE APROVAÇÃO DE PROJETO FINAL

AMANDA DOMINGUES SCHAFHAUSER

ESTUDO DO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EM RIOS: ESTUDO DE CASO NO RIO VERDE

Projeto Final de Curso, aprovado como requisito parcial para a obtenção do Diploma de Bacharel em Engenharia Ambiental no Curso de Graduação em Engenharia Ambiental do Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, com nota 90, pela seguinte banca examinadora:

Orientador(a): 
Cynara de Lourdes da Nóbrega Cunha
DEA / UFPR

Membro(a) 1: 
Maurício Gobbi
DEA / UFPR

Membro(a) 2: 
Emílio Graciliano Ferreira Mercuri
DEA / UFPR

Curitiba, 14 de dezembro de 2016

AGRADECIMENTOS

A Deus, que permaneceu sempre ao meu lado dando-me coragem e saúde para vencer todos os obstáculos.

Aos meus pais, Ronaldo e Marili, por serem meu porto seguro e me darem apoio e incentivo em todas as etapas da minha vida.

A minha irmã Jéssica pela companhia nas horas de estudo e na vida.

A professora Cynara pela oportunidade da orientação que associada a críticas, incentivos e sugestões foram pilares fundamentais para a minha formação.

Aos meus amigos pela amizade e ajuda em transformar este período de árduo trabalho em realizações.

Aos demais professores, pela dedicação, pelos conhecimentos transmitidos e pela motivação em seguir esta carreira.

E por fim, agradeço a todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram com a realização deste trabalho.

“Os dois dias mais importantes da sua vida são: o dia em que você nasceu e o dia que você descobre o porquê.”

Mark Twain

RESUMO

O presente trabalho mostra um estudo sobre os processos que formam o ciclo hidrossedimentológico no trecho superior do rio Verde, localizado na Região Metropolitana de Curitiba. Visando avaliar qualitativamente a descarga sólida nas seções transversais neste trecho, será utilizado o modelo HEC-RAS, um modelo unidimensional de domínio público, que permite simular escoamentos em regime quase-permanente, aproximando um hidrograma de vazão por uma série de perfis de escoamento permanente associados a uma duração de vazão correspondente. Para esta simulação foram utilizados dados geométricos do rio, vazões para cada sub-bacia de contribuição e as características específicas do sedimento do leito. Com os resultados obtidos foi possível concluir que o modelo de transporte de sedimentos implementado mostrou-se capaz de determinar qualitativamente as seções sujeitas a sedimentação e erosão no rio Verde. Analisando os resultados dos diferentes cenários observou-se que os locais que apresentaram valores elevados de velocidade longitudinal foram também os locais com maior movimentação do sedimento.

Palavras-chave: Erosão, Sedimentação, Rio Verde, HEC-RAS, Ciclo hidrossedimentológico.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - TIPO DE MOVIMENTO DE PARTÍCULAS SÓLIDAS AO LONGO DE UM CANAL.	19
FIGURA 2 - BALANÇO DE MASSA NUM ESCOAMENTO AO LONGO DE UMA DISTÂNCIA Δx	23
FIGURA 3 - FORÇAS ATUANTES EM UM VOLUME DE CONTROLE DE DISTÂNCIA ΔX	25
FIGURA 4 - MAPA DA LOCALIZAÇÃO DA BACIA DO RIO VERDE	35
FIGURA 5 - ÁREA DE ESTUDO: BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO VERDE, REGIÃO METROPOLITANA DE CURITIBA.	36
FIGURA 6 - COBERTURA VEGETAL E USO DA TERRA EM 2009 NA BACIA DO RIO VERDE – PR.....	39
FIGURA 7 - MAPA DE SOLOS DA BACIA DO RIO VERDE – PARÂNÁ	41
FIGURA 8 - LOCALIZAÇÃO DAS SUB-BACIAS DO TRECHO A MONTANTE DA ESTAÇÃO HARAS.....	42
FIGURA 9 - PERFIL LONGITUDINAL DO RIO VERDE	44
FIGURA 10 - CURVA GRANULOMÉTRICA PARA A AMOSTRA COLETADA NO PONTO 1	45
FIGURA 11 - CURVA GRANULOMÉTRICA PARA A AMOSTRA COLETADA NO PONTO 2	46
FIGURA 12 - CURVA GRANULOMÉTRICA PARA A AMOSTRA COLETADA NO PONTO 3	46
FIGURA 13 - VAZÕES MÉDIAS PARA UM ANO HIDROLÓGICO, PARA O RIO VERDE.....	48
FIGURA 14 - DIAGRAMA UNIFILAR DA BACIA DO RIO VERDE ATÉ A ESTAÇÃO HARAS.....	49
FIGURA 15 – VALORES DA POSIÇÃO DA SUPERFÍCIE LIVRE OBTIDOS PELO HEC-RAS NO CENÁRIO 1	53
FIGURA 16 - VALORES DE VELOCIDADE MÉDIA OBTIDOS PELO HEC-RAS NO CENÁRIO 1	53
FIGURA 17 - VALORES DA LÂMINA D'ÁGUA OBTIDOS PELO HEC-RAS NO CENÁRIO 1	54
FIGURA 18 - VALORES DA POSIÇÃO DA SUPERFÍCIE LIVRE OBTIDOS PELO HEC-RAS NO CENÁRIO 2	55

FIGURA 19 – VALORES DE VELOCIDADE MÉDIA OBTIDOS PELO HEC-RAS NO CENÁRIO 2	56
FIGURA 20 - VALORES DA POSIÇÃO DA SUPERFICIE LIVRE OBTIDOS PELO HEC-RAS NO CENÁRIO 3	57
FIGURA 21 – VALORES DE VELOCIDADE MÉDIA OBTIDOS PELO HEC-RAS NO CENÁRIO 3	58
FIGURA 22 - VALORES DA POSIÇÃO DA SUPERFICIE LIVRE OBTIDOS PELO HEC-RAS NO CENÁRIO 4	59
FIGURA 23 - VALORES DE VELOCIDADE MÉDIA OBTIDOS PELO HEC-RAS NO CENÁRIO 4	59
FIGURA 24 - VALORES DA POSIÇÃO DA SUPERFICIE LIVRE OBTIDOS PELO HEC-RAS NO CENÁRIO 5	61
FIGURA 25 – VALORES DE VELOCIDADE MÉDIA OBTIDOS PELO HEC-RAS NO CENÁRIO 5	61
FIGURA 26 - VALORES DA ALTURA DA LÂMINA D'ÁGUA OBTIDOS PELO HEC-RAS NO CENÁRIO 5	62
FIGURA 27 - VALORES DA POSIÇÃO DA SUPERFICIE LIVRE OBTIDOS PELO HEC-RAS NO CENÁRIO 6	63
FIGURA 28 – VALORES DE VELOCIDADE MÉDIA OBTIDOS PELO HEC-RAS NO CENÁRIO 6	63
FIGURA 29 - RESULTADOS DE MASSA TOTAL ACUMULADA NO LEITO NO CENÁRIO 1	66
FIGURA 30 - VELOCIDADE MÉDIA DE CADA SEÇÃO TRANSVERSAL E A MASSA ACUMULADA NO LEITO PARA O CENÁRIO 1	66
FIGURA 31 - RESULTADOS DA MASSA TOTAL ACUMULADA NO LEITO NO CENÁRIO 6	68
FIGURA 32 - VELOCIDADE MÉDIA DE CADA SEÇÃO TRANSVERSAL E A MASSA ACUMULADA NO LEITO PARA O CENÁRIO 6	69

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – DIÂMETRO MÉDIO DOS MATERIAIS PRESENTES NA SUPERFÍCIE DA BACIA HIDROGRÁFICA	18
TABELA 2 - PARÂMETROS PARA APLICAÇÃO DAS FUNÇÕES DE TRANSPORTE	31
TABELA 3 - DISTÂNCIA DAS SEÇÕES TRANSVERSAIS EM RELAÇÃO A SEÇÃO MAIS A MONTANTE, CONSIDERADAS PELO HEC-RAS.....	43
TABELA 4 - PORCENTAGEM DO TIPO DE SEDIMENTO E d_{50} NOS TRÊS PONTOS AMOSTRAIS	46
TABELA 5 - CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS SUSPENSOS TOTAIS (SST) NA AMOSTRA ORIGINAL PARA CADA UM DOS PONTOS AMOSTRAIS	47
TABELA 6 - RESUMO DOS DADOS GEOMÉTRICOS DO MODELO PARA OS QUATRO PRIMEIROS CENÁRIOS	51
TABELA 7 - VAZÕES USADAS NO CENÁRIO 1	52
TABELA 8 - VELOCIDADES MÁXIMAS PARA CANAIS DE FUNDO DE AREIA	54
TABELA 9 – VAZÕES USADAS NO CENÁRIO 3	57
TABELA 10 - RESUMO DOS DADOS GEOMÉTRICO DO MODELO PARA OS DOIS ÚLTIMOS CENÁRIOS	60
TABELA 11 - LIMITES DE VELOCIDADES ESTABELECIDOS A PARTIR DO DIAGRAMA DE HJULSTRÖM PARA CADA TRECHO DO RIO VERDE	65
TABELA 12- COMPARAÇÃO DOS PROCESSOS RESULTANTES DA SIMULAÇÃO NO HEC-RAS DO CENÁRIO 1 E DOS PROCESSOS APRESENTADOS POR CUNHA <i>et al</i> , 2015	67
TABELA 13 – MASSA TOTAL ACUMULADA E PROCESSOS RESULTANTES DA SIMULAÇÃO NO HEC-RAS DO CENÁRIO 6	69
TABELA 14 - RESULTADOS HIDRODINÂMICOS DA SIMULAÇÃO DO HEC-RAS NO CENÁRIO 1	75
TABELA 15 - RESULTADOS HIDRODINÂMICOS DA SIMULAÇÃO DO HEC-RAS NO CENÁRIO 2	75
TABELA 16 - RESULTADOS HIDRODINÂMICOS DA SIMULAÇÃO DO HEC-RAS NO CENÁRIO 3	76
TABELA 17 - RESULTADOS HIDRODINÂMICOS DA SIMULAÇÃO DO HEC-RAS NO CENÁRIO 4	77

TABELA 18 - RESULTADOS HIDRODINÂMICOS DA SIMULAÇÃO DO HEC-RAS NO CENÁRIO 5	78
--	----

TABELA 19 - RESULTADOS HIDRODINÂMICOS DA SIMULAÇÃO DO HEC-RAS NO CENÁRIO 6	78
--	----

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVO GERAL	16
2.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
3.1	IMPORTÂNCIA DO ESTUDO DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS	17
3.2	CICLO HIDROSSEDIMENTOLÓGICO	17
3.3	TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EM RIOS	19
3.3.1	Distribuição de Sedimentos ao longo do curso d'água e da seção transversal	20
3.3.2	Capacidade de Transporte	20
3.3.3	Formas de transporte de sedimentos em rios	21
3.4	MEDIÇÃO DE DESCARGA SÓLIDA	21
3.5	EQUAÇÕES DE SAINT-VENANT	22
3.4.1	Condição de Incompressibilidade	23
3.6	HEC-RAS	28
3.6.1	Fluxo Quase-permanente	28
3.6.1.1	Continuidade de sedimento	29
3.6.1.2	Função de Transporte	30
3.6.2	Dados necessários para o HEC-RAS	31
3.6.2.1	Dados Geométricos	31
3.6.2.2	Dados sobre o escoamento	32
3.6.2.3	Dados sobre os Sedimentos	33
3.6.3	Resultados	34
4.1	CARACTERIZAÇÃO DA BACIA DO RIO VERDE	37
4.1.1	Clima	37
4.1.2	Uso e Ocupação do Solo	37
4.1.3	Cobertura Vegetal	40
4.1.4	Tipo de Solo	40
5	METODOLOGIA	42
5.1	DADOS GEOMÉTRICOS	42
5.2	DADOS DE SEDIMENTOS	45

5.3 DADOS DE VAZÃO	47
6 RESULTADOS	50
6.1 RESULTADOS DO MODELO HIDRODINÂMICO: POSIÇÃO DA SUPERFÍCIE LIVRE E VELOCIDADE MÉDIA	52
6.1.1 Cenário 1	52
6.1.2 Cenário 2	55
6.1.3 Cenário 3	56
6.1.4 Cenário 4	58
6.1.5 Cenário 5	60
6.1.6 Cenário 6	63
6.2 RESULTADO DO MODELO DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS: MASSA ACUMULADA NO LEITO	64
6.2.1 Cenário 1	65
6.2.6 Cenário 6	67
7 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES	70
8 REFERÊNCIAS	72
ANEXO 1 - RESULTADOS HIDRODINÂMICOS PARA OS SEIS CENÁRIOS.....	75

1 INTRODUÇÃO

O regime hidrológico-hidrodinâmico constitui um dos principais fatores governantes do funcionamento de todo o ecossistema, influenciando processos ecológicos, biológicos, químicos e físicos na bacia hidrográfica (PAZ *et al.*, 2009).

Estudos sobre o regime hidrológico-hidrodinâmico dos cursos d'água têm sido muito utilizados em análises de sistemas de proteção contra cheias, verificação de dimensionamento de canais sujeitos a escoamento não permanente, análises das consequências de rompimentos de barragens e do impacto de lançamento de efluentes (PAIVA *et al.*, 2011). Além disso, o regime hidrodinâmico possui grande influência sobre o transporte de sedimentos em rios e canais (ROVIRA & BATALLA, 2006).

A quantidade de sedimentos transportada pelo rio é altamente dependente da composição do material do leito, das características geométricas e hidráulicas da seção transversal do rio e das propriedades da bacia hidrográfica, como tipo e uso do solo na mesma. Por essa razão, qualquer alteração no equilíbrio natural do rio e da sua bacia pode trazer sérias consequências em termos de erosão e deposição de sedimentos (SCAPIN & PAIVA, 2005).

Considerando o ciclo hidrossedimentológico, a erosão e a deposição dos sedimentos são processos naturais e responsáveis por alterações na forma do rio. No entanto, a erosão e a deposição tornam-se um problema quando estes processos naturais são agravados pela ação do homem.

Os problemas causados pela erosão, o transporte e a sedimentação podem afetar tanto o uso do corpo d'água como o meio ambiente. Segundo Scapin e Paiva (2005), estes processos estão relacionados principalmente ao assoreamento de rios, gerando aumento das cheias e consequentemente alagamentos; redução da qualidade da água para o consumo e irrigação, devido à quantidade de sedimentos transportados; morte de espécies aquáticas e diminuição da lâmina d'água, impossibilitando muitas vezes a navegação.

No caso dos sedimentos fluviais, para se estimar a quantidade de partículas minerais erodidas, transportadas ou depositadas pela ação do

escoamento, é possível usar métodos que podem ser diretos, medições *in situ* ou métodos indiretos, com análises em laboratório; ambos visam estimar a descarga sólida do leito e a descarga em suspensão. As amostras de sedimentos devem ser coletadas juntamente com informações hidrológicas de vazão, nível de água e velocidade, de modo a possibilitar a estimativa de descarga sólida (CARVALHO & FILIZOLA, 2000).

Um dos ramos da modelagem matemática que visa prever eventos ou fenômenos ambientais é a modelagem ambiental. Trata-se de uma ferramenta computacional que utiliza modelos matemáticos, aplicados a situações relativas ao meio natural ou a situações criadas pelo homem, ao alterar o meio ambiente.

Pode-se apontar que o uso de modelos matemáticos para simular os processos que envolvem sistemas fluviais, é propício para o gerenciamento ambiental; porém, a capacidade de um modelo reproduzir um sistema natural depende principalmente do conhecimento dos elementos que o constituem e da forma como os mesmos se relacionam.

A modelagem da evolução morfológica não é um processo trivial, uma vez que os dados necessários para prever as mudanças no leito do rio são incertos e a teoria empregada é empírica e altamente sensível a uma ampla gama de variáveis físicas, sejam elas relacionadas diretamente (diâmetro) e indiretamente (características físicas do rio) aos sedimentos (USACE, 2010a).

Apesar disso, através de um bom levantamento de dados sobre o curso d'água e a bacia hidrográfica na qual ele está inserido, é possível calibrar e validar modelos hidrodinâmicos e de transporte de sedimentos e assim, prever tendências de longo prazo que apoiem tomadas de decisões de planejamento e possam ser utilizadas para avaliar alternativas em projetos de engenharia (USACE, 2010a).

Dessa forma, no presente estudo é usado o Modelo HEC-RAS (*River Analysis System*), desenvolvido pelo *Hydrologic Engineering Center (HEC) – U.S. Corps of Engineering*. Trata-se de um sistema unidimensional que reúne vários modelos que respondem a diversos propósitos da fluviologia. O modelo HEC-RAS resolve as equações de Saint-Venant usando o método de diferenças finitas e permitindo simular o escoamento em superfície livre em regime permanente e em regime não permanente (FERNANDEZ *et al.*, 2013).

Basicamente os resultados apresentados pela simulação do escoamento unidimensional são vazões, níveis d'água e velocidade médias, no tempo e no espaço. Na simulação do transporte de sedimentos em rios, considera-se a erosão e deposição destes sedimentos com o tempo, podendo resultar em modificações na geometria do canal, permitindo a simulação simultânea de sedimentos com diferentes granulometrias, havendo fornecimento de curvas granulométricas do leito para as simulações (USACE, 2010b).

2 OBJETIVO GERAL

O presente trabalho tem como objetivo determinar locais favoráveis para erosão e deposição de sedimentos, ao longo de um trecho de rio usando a modelagem ambiental. O local escolhido é o trecho superior do rio Verde, localizado na região metropolitana de Curitiba.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para alcançar o objetivo geral foram desdobrados os seguintes objetivos específicos do projeto:

- Levantamento dos dados pré-existentes da bacia hidrográfica do Verde;
- Coleta de dados geométricos e sedimentométricos no rio Verde;
- Aplicação do modelo matemático HEC-RAS para a simulação de fluxo quase-permanente e o transporte de sedimentos (descarga sólida de fundo e em suspensão);
- Avaliação quantitativa da massa acumulada nas seções transversais do trecho estudado;
- Análise dos resultados do transporte de sedimento avaliando locais de deposição e erosão no trecho superior do rio Verde.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 IMPORTÂNCIA DO ESTUDO DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

O estudo sobre o transporte de sedimentos adquiriu grande importância para a engenharia hidrológica, permitindo a identificação de problemas relacionados ao uso adequado dos cursos d'água. Os processos sedimentológicos que ocorrem na natureza têm sido acelerados e intensificados pela atividade humana, tendo como destaque o uso inadequado do solo, o desmatamento e urbanização na bacia hidrográfica e a alteração dos cursos dos rios.

O conhecimento do aporte de sedimentos em bacias hidrográficas é indispensável no planejamento e gestão dos recursos hídricos, sendo fundamental também no dimensionamento e operação de obras hidráulicas, interferindo nos custos de implantação e manutenção desses sistemas.

Os problemas relacionados ao excesso de sedimentos são inúmeros, como aumento da turbidez da água, assoreamento de rios e reservatórios, aumento da frequência de enchentes, comprometimento do rio para abastecimento, aumento da mortalidade de espécies aquáticas, devido a diminuição da penetração de luz ou a interferência os hábitos alimentares, entre diversos outros. A magnitude desses problemas depende principalmente da quantidade e da natureza dos sedimentos, fatores esses que são condicionados pelos processos de produção, transporte e deposição. (BRANCO, 1998).

3.2 CICLO HIDROSSEDIMENTOLÓGICO

Durante um evento de precipitação, a água escoar sobre rochas e solos, que formam e revestem as superfícies das bacias hidrográficas. Os sedimentos (carregados pelo escoamento superficial) provocam a redistribuição das partículas sólidas pela bacia, alterando o ciclo hidrológico e afetando o uso, a conservação e a gestão dos recursos hídricos (MARCONDES, 2011).

Paralelamente e extremamente dependente do ciclo da água, encontra-se o “ciclo hidrossedimentológico”. Este envolve o deslocamento, o transporte e a deposição de partículas sólidas de vários tamanhos e formas, suscetíveis

ao movimento. No entanto, é importante ressaltar que nesse caso não existe realmente um ciclo, uma vez que ele trata de processos irreversíveis, ou seja, quando uma partícula sólida é removida do solo e transportada águas abaixo, ela jamais volta a sua origem (MEDEIROS *et al.*, 2008). A TABELA 1 apresenta o diâmetro médio dos materiais presentes na superfície da bacia hidrográfica (TUCCI, 2007).

TABELA 1 – DIÂMETRO MÉDIO DOS MATERIAIS PRESENTES NA SUPERFÍCIE DA BACIA HIDROGRÁFICA

Material	Diâmetro (mm)
Argila	$d < 0,002$
Silte	$0,002 < d < 0,060$
Areia	$0,060 < d < 2$
Cascalho	$2 < d < 60$
Seixo	$60 < d < 200$
Pedras / pedregulho	$d > 200$

FONTE: Autora, 2016.

A erosão e a deposição, que podem ocorrer na bacia hidrográfica e na rede de drenagem, são responsáveis pela redistribuição dos sedimentos. A erosão é o processo de deslocamento das partículas sólidas da superfície do solo ou das paredes dos leitos dos córregos e rios, tendo como principal forçante a chuva ou o arraste provocado pelo escoamento. O arraste ocorre quando a velocidade de sedimentação do grão da partícula prevalece sobre a sucessão de impulsos verticais provenientes de vórtices turbulentos do escoamento (SISBAHIA, 2016).

A sedimentação representa o processo em que as partículas transportadas em suspensão (finas) tendem a retomar, pela ação da gravidade e pela diminuição da velocidade do escoamento, o contato com o fundo do leito. Uma característica importante para este processo é a resistência do meio fluido que envolve a partícula, responsável por impedir a sua “queda” para o fundo.

3.3 TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EM RIOS

O transporte de sedimentos é regido por fatores hidrológicos que influenciam na formação do material intemperizado na bacia hidrográfica e o carregamento desses materiais até os rios. Os fatores que influenciam o volume de sedimentos entregue pela bacia hidrográfica têm relação com a variação das características geomorfológicas e ambientais, que incluem a natureza, extensão e localização das fontes de sedimento, o relevo e características do declive, o padrão da rede de drenagem, a cobertura vegetal, o uso do solo, a textura e estrutura do solo (CHRISTOFOLETTI, 1981).

Os constituintes intemperizados das rochas da bacia compõem a carga dissolvida dos cursos d'água. A carga do leito é formada por partículas de granulometria maior e, devido ao volume e à densidade das partículas, se deslocam junto ou sobre o fundo por rolamento, deslizamento ou saltação. O transporte da carga do leito é muito mais lento que o transporte de sedimentos em suspensão. A carga em suspensão é formada por partículas de granulometria menor e é controlado principalmente pelo volume de sedimentos fornecidos aos cursos de água, enquanto que a carga de leito é controlado/limitado pela capacidade de transporte (TUCCI, 2007). Os tipos de movimento das partículas sólidas ao longo do ciclo hidrossedimentológico são mostrados na FIGURA 1.

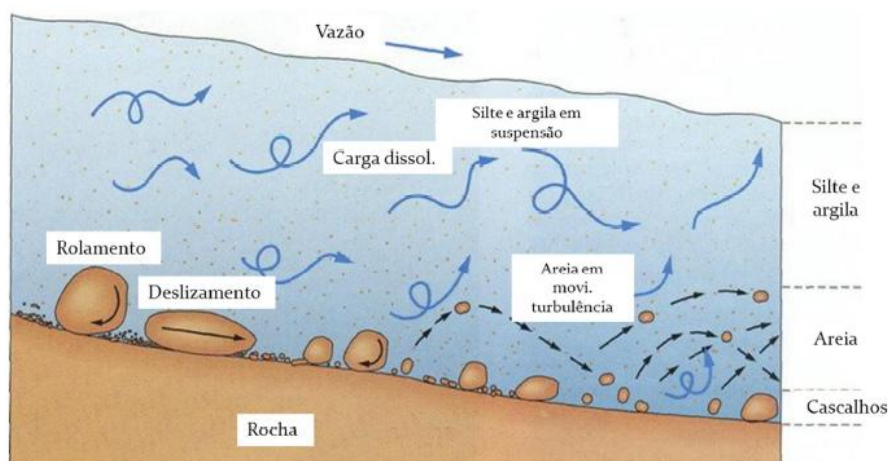


FIGURA 1 - TIPO DE MOVIMENTO DE PARTÍCULAS SÓLIDAS AO LONGO DE UM CANAL.
FONTE: MARCONDES, 2011

3.3.1 Distribuição de Sedimentos ao longo do curso d'água e da seção transversal

Os sedimentos estão distribuídos nos cursos d'água na direção longitudinal e ao longo da seção transversal. A distribuição longitudinal pode ser expressa em termos da produção de sedimentos. Observa-se que a parte superior do curso d'água é composta por sedimentos de fundo de tamanhos maiores (pedras e pedregulhos). Conforme o curso de água se desenvolve para a jusante, uma maior quantidade de sedimentos finos são observados, isso ocorre devido ao peso das partículas, uma vez que sedimentos maiores e mais pesados vão sendo depositados ao longo do rio. A carga em suspensão é predominantemente maior que a de fundo no curso superior do rio e, de acordo com a diminuição da erosão e da declividade do curso de água, a carga de fundo vai aumentando.

Dessa forma, a erosão dos solos predomina no curso superior do rio, enquanto que a sedimentação de partículas é maior no curso baixo do rio (CARVALHO, 2008).

Como o transporte das partículas em suspensão sofre influência da velocidade longitudinal e do seu peso, o sedimento em suspensão estará presente ao longo da coluna d'água, sendo que as concentrações maiores de sedimentos estão próximas ao fundo e os menores, na superfície. E ainda, como as velocidades são menores perto das margens, as concentrações também são pequenas, aumentando gradativamente em direção ao centro do rio (MARCONDES, 2011).

3.3.2 Capacidade de Transporte

O conhecimento sobre os vários mecanismos de sedimentação fluvial é necessário para que se possa prever o que acontecerá, caso sejam modificadas as condições naturais do sistema hidrológico.

A capacidade de transporte é a quantidade máxima de sólido que um escoamento de superfície livre pode transportar. Esta capacidade não possui um valor máximo único, sendo função da carga de sedimento transportado, do tipo de sedimento e das propriedades tanto do escoamento como da geometria

do leito. A capacidade de transporte por arraste pode diminuir ou aumentar devido à dissipação de parcelas de energia do escoamento por atrito, fazendo com que essa energia não seja utilizada para o transporte de sedimentos, isso pode ser provocado pela existência de rugas, dunas e outras formações no curso d'água (PARANHOS, 2013).

Haverá assoreamento do curso d'água se a capacidade de transporte for menor que a descarga sólida. Já se a capacidade de transporte for superior à descarga sólida e o material do fundo e lateral puder ser removido, o curso d'água com ao aumento da viscosidade do fluído e das tensões cisalhantes, tem capacidade energética para escavar o seu próprio leito levando a fenômenos de erosão. (PORTUGUÊS, 2008).

3.3.3 Formas de transporte de sedimentos em rios

Como os sedimentos presentes no rio apresentam granulometria variável, o transporte sofrido por eles também varia em função do tamanho, peso e forma da partícula. As formas de transporte podem ser definidas como: transporte por arraste, quando os sedimentos que estão em contato com o leito podem rolar, saltar ou escorregar longitudinalmente no fundo dos cursos d'água e, transporte em suspensão, que representam os sedimentos finos que permanecem em suspensão e são suportados pelos componentes verticais da velocidade e transportados pelos componentes horizontais. O transporte em suspensão corresponde à maior parte do transporte de sedimentos em rios (CARVALHO & FILIZOLA, 2000).

3.4 MEDIÇÃO DE DESCARGA SÓLIDA

Para quantificar os sedimentos transportados por um rio é necessário realizar medições da descarga sólida em suspensão, da descarga sólida de arraste e assim, obter a descarga sólida total.

A determinação das descargas sólidas em suspensão ou de arraste pode ser feita diretamente (in situ), com a medição da concentração de sedimentos em suspensão, das características hidráulicas da seção ou trecho

de rio e do material de fundo ou indiretamente, com equipamentos que coletam as amostras para serem analisadas em laboratório (LOUREIRO, 2008).

Para calcular a quantidade de sedimentos que é transportada pelos cursos d'água, existem diversos métodos capazes de estimar isoladamente a carga de arraste ou fundo e a carga em suspensão, obtendo assim, através da soma das duas, a carga total. Então, de acordo com PAIVA (2001) a descarga total (Q_{st}) pode ser expressa como a soma da descarga de sedimentos por arraste de fundo (Q_{sf}) e da descarga de sedimentos em suspensão (Q_{ss}) representada pela Equação (1)

$$Q_{st} = Q_{sf} + Q_{ss} \quad (1)$$

A descarga de sedimentos em suspensão pode ser obtida multiplicando a concentração média dos sedimentos em suspensão pela vazão líquida. Na determinação da concentração média dos sedimentos em suspensão, é necessário coletar várias amostras; apenas uma amostra em um ponto qualquer do rio não pode ser considerada como representativa da quantidade de sedimento transportada pelo rio, uma vez que o sedimento em suspensão não está distribuído uniformemente na seção. Dessa forma, é necessário levar em conta a variação da distribuição da concentração, fazendo várias amostragens ao longo da seção transversal, e ao longo do curso do rio.

3.5 EQUAÇÕES DE SAINT-VENANT

Os modelos hidrodinâmicos unidimensionais utilizam as equações de conservação de massa (ou Equação da Continuidade) e de quantidade de movimento, que juntas formam um sistema conhecido como equações de Saint Venant (CUNGE *et al.*, 1980). Essas equações são habitualmente aceitas na modelagem unidimensional de escoamentos com superfície livre em rios e canais naturais, com inclinação e geometria variável, possibilitando acompanhar a evolução temporal das grandezas envolvidas (MENDES *et al.*, 2001).

Nesse estudo, na descrição das grandezas relativas ao escoamento foi usada a descrição euleriana, ou seja, determinam-se as características do escoamento ao longo do tempo, para uma dada posição de observação.

3.4.1 Condição de Incompressibilidade

Uma das equações fundamentais no escoamento em canais é a Equação da Continuidade, a qual é deduzida através do estudo da massa líquida e sua conservação ao longo de um volume de controle. Este princípio estabelece que a massa total seja conservada ao acompanharmos o fluido quando ele ocupa o volume de controle, ou seja, sua taxa de variação deve ser igual ao somatório das entradas e saídas de massa no volume de controle. (SOUSA, 2010).

Na forma diferencial, a equação da continuidade pode ser obtida por meio do balanço de massa em um volume de controle elementar, como ilustrado na FIGURA 2.

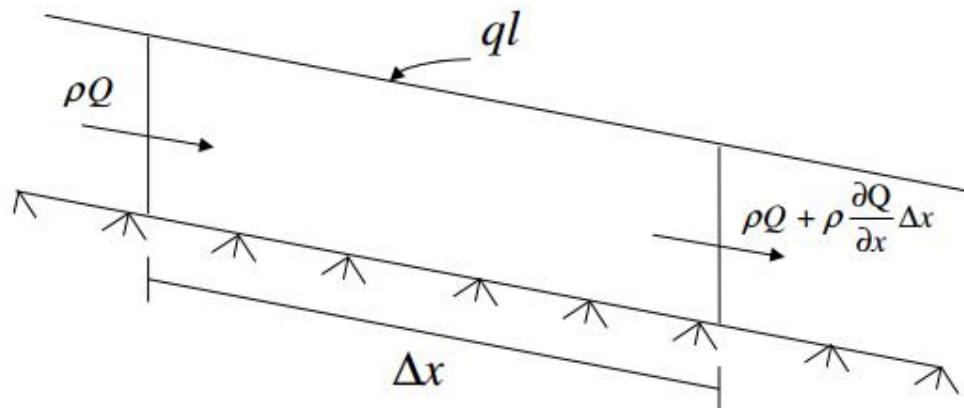


FIGURA 2 - BALANÇO DE MASSA NUM ESCOAMENTO AO LONGO DE UMA DISTÂNCIA Δx
 FONTE: SOUSA, 2010.

No balanço de massa esquematizado acima ρQ representa a vazão de massa afluente ao trecho, ql a vazão lateral em massa por unidade de comprimento. A vazão lateral ql pode ocorrer da planície para o rio ou com o

transbordamento do rio para a planície. Sendo assim, as parcelas do balanço de massa no volume de controle podem ser expressas da seguinte maneira:

1. Massa do fluido que entra no volume de controle pela seção transversal, em um intervalo de tempo Δt :

$$\rho \cdot Q \cdot \Delta t \quad (2)$$

2. Massa que entra no volume de controle ao longo da lateral, em um intervalo de tempo Δt :

$$\rho \cdot ql \cdot \Delta x \cdot \Delta t \quad (3)$$

3. Massa que sai do volume de controle pela seção transversal a jusante, em um determinado intervalo de tempo Δt :

$$\rho \cdot Q \cdot \Delta t + \rho \cdot \frac{\partial Q}{\partial x} \cdot \Delta x \cdot \Delta t \quad (4)$$

4. Variação da massa no volume de controle, em um intervalo de tempo Δt :

$$\rho \cdot \frac{\partial A}{\partial x} \cdot \Delta x \cdot \Delta t \quad (5)$$

Considerando nesta expressão que Δx é pequeno o suficiente para que o volume de controle seja equivalente ao produto do Δx pela área A.

Assim a variação de massa no interior do volume de controle se dá pelo somatório de todas as parcelas, conforme apresentado na Equação 6:

$$\rho \cdot Q \cdot \Delta t + \rho \cdot ql \cdot \Delta x \cdot \Delta t + \left(\rho \cdot Q \cdot \Delta t + \rho \cdot \frac{\partial Q}{\partial x} \cdot \Delta x \cdot \Delta t \right) = \rho \cdot \frac{\partial A}{\partial x} \cdot \Delta x \cdot \Delta t \quad (6)$$

$$ql - \frac{\partial Q}{\partial x} = \frac{\partial A}{\partial x} \quad (7)$$

Colocando a Equação (7) na forma mais conhecida da Equação da Continuidade dos escoamentos em rios temos a Equação (8):

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial x} = ql \quad (8)$$

3.6.2 Princípio da Conservação da Quantidade de Movimento

O princípio da conservação da quantidade de movimento é regido pela 2ª Lei de Newton, ou seja, o somatório das forças externas aplicadas a um corpo é igual a taxa de variação da quantidade de movimento armazenada no tempo (GUIMARÃES, 2009). Assim para ilustrar esse princípio adotamos o mesmo volume de controle da equação da continuidade, com a massa m igual a $\rho \cdot A \cdot \Delta x$ e a aceleração resultante igual a $\frac{dv}{dt}$. Este volume de controle está representado pela FIGURA 3.

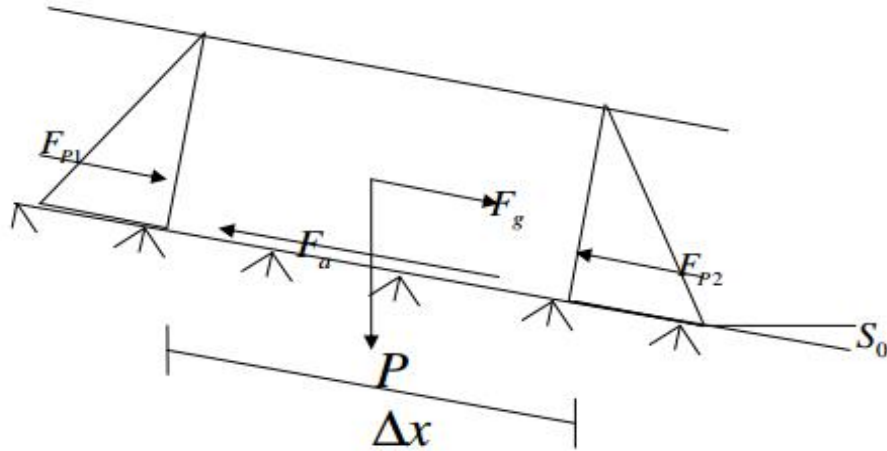


FIGURA 3 - FORÇAS ATUANTES EM UM VOLUME DE CONTROLE DE DISTÂNCIA Δx
FONTE: SOUSA, 2010.

O somatório das forças aplicadas ao volume de controle, segundo a lei de Newton é:

$$\sum F_i = m \cdot a = \rho \cdot A \cdot \Delta x \cdot \frac{dv}{dt} \quad (9)$$

Onde:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v}{\partial x} \cdot \frac{dx}{dt} \quad (10)$$

Como:

$$\frac{dx}{dt} = v \quad (11)$$

Assim:

$$\sum Fi = m \cdot a = \rho \cdot A \cdot \Delta x \cdot \left(\frac{\partial v}{\partial t} + v \cdot \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad (12)$$

São consideradas três tipos de forças que atuam no volume de controle:

1. Força gravitacional (F_g), representada pela componente na direção do escoamento do peso do volume de controle:

$$F_g = P \cdot \sin(So) = \rho \cdot A \cdot \Delta x \cdot g \cdot \sin(So) = \rho \cdot A \cdot \Delta x \cdot g \cdot So \quad (13)$$

2. Força de pressão (F_p), a qual é a força provocada pela variação da profundidade entre duas seções que delimitam o volume de controle, sendo:

$$F_p = F_{p1} - F_{p2} \quad (14)$$

Considerando a hipótese de seção retangular, $B = C^{te}$, teremos:

$$F_{p1} = \gamma h \frac{h}{2} B = \frac{\gamma h^2}{2} B \quad (15)$$

$$F_{p2} = \gamma \left(h + \frac{\partial h}{\partial x} \Delta x \right) \cdot \frac{\left(h + \frac{\partial h}{\partial x} \Delta x \right) B}{2} \quad (16)$$

Reescrevendo (16):

$$F_{p2} = \frac{\gamma}{2} \cdot \left[h^2 + 2 \cdot h \cdot \frac{\partial h}{\partial x} \cdot \Delta x + \left(\frac{\partial h}{\partial x} \cdot \Delta x \right)^2 \right] \cdot B \quad (17)$$

Desprezando os termos de segunda ordem:

$$F_{p2} = \left[\frac{\gamma}{2} h^2 + \gamma \cdot h \cdot \frac{\partial h}{\partial x} \cdot \Delta x \right] \cdot B \quad (18)$$

Reescrevemos (14):

$$F_{p1} - F_{p2} = -\gamma \cdot h \cdot \frac{\partial h}{\partial x} \cdot \Delta x \cdot B = -\gamma \cdot A \cdot \frac{\partial h}{\partial x} \cdot \Delta x \quad (19)$$

A Força de atrito (F_a), é produzida pelas tensões de cisalhamento entre a superfície da calha do rio e o escoamento. Considerando P o perímetro molhado da seção de escoamento e τ_0 a tensão exercida pelo escoamento na calha, temos:

$$F_a = \tau_0 \cdot P \cdot \Delta x \quad (20)$$

Substituindo (20), (19) e (13) no somatório da equação (12) temos:

$$\rho \cdot A \cdot \Delta x \cdot \left(\frac{\partial v}{\partial t} + v \cdot \frac{\partial v}{\partial x} \right) = \rho \cdot A \cdot \Delta x \cdot g \cdot S_o - \gamma \frac{\partial h}{\partial x} \cdot A \cdot dx - \tau_0 \cdot P \cdot \Delta x \quad (21)$$

Sendo γ igual a $\rho \cdot g$ a Equação (21) fica:

$$\rho \cdot A \cdot \Delta x \cdot \left(\frac{\partial v}{\partial t} + v \cdot \frac{\partial v}{\partial x} \right) = \rho \cdot A \cdot \Delta x \cdot g \cdot S_o - \rho \cdot g \cdot \frac{\partial h}{\partial x} \cdot A \cdot dx - \tau_0 \cdot P \cdot \Delta x \quad (22)$$

Substituindo o perímetro P pela relação do Raio Hidráulico tal que $P = \frac{A}{R}$ e dividindo tudo pela massa do volume de controle $\rho \cdot A \cdot \Delta x$, teremos:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \cdot \frac{\partial v}{\partial x} = g \cdot S_o - g \cdot \frac{\partial h}{\partial x} - g \cdot \frac{\tau_0}{\gamma \cdot R} \quad (23)$$

Substituindo τ_0 por $\gamma \cdot R \cdot S_f$, teremos:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \cdot \frac{\partial v}{\partial x} = g \cdot S_o - g \cdot \frac{\partial h}{\partial x} - g \cdot S_f \quad (24)$$

Agrupando os termos procedentes da força gravitacional e de atrito encontramos a forma mais conhecida da equação dinâmica dos escoamentos em rios:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \cdot \frac{\partial v}{\partial x} + g \cdot \frac{\partial h}{\partial x} = g \cdot (S_o - S_f) \quad (25)$$

Cada termo da equação tem um significado físico que definimos da seguinte maneira:

1. Contribuição da inércia:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \cdot \frac{\partial v}{\partial x} \quad (26)$$

2. Contribuição da pressão:

$$g \cdot \frac{\partial h}{\partial x} \quad (27)$$

3. Contribuição da gravidade e da força de atrito:

$$g \cdot (S_o - S_f) \quad (28)$$

Então, o modelo matemático que rege o escoamento unidimensional é composto pelas Equações (8) e (25)

3.6 HEC-RAS

O HEC- RAS é um modelo de domínio público, desenvolvido pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos e é amplamente utilizado na modelagem hídrica. O seu principal objetivo é o cálculo da elevação da superfície livre, que varia de acordo com as condições de fluxo específico (GARCIA, 2012).

O HEC-RAS é capaz de calcular o transporte de sedimentos em rios e canais, que é objeto do presente trabalho. O modelo calcula quatro componentes unidimensionais de análise fluvial: a posição da superfície livre para escoamentos permanentes; simula escoamentos transitórios, calculando as velocidades nas seções transversais; calcula do transporte de sedimento com fronteira móvel e realiza análise de parâmetros de qualidade da água.

Um elemento importante no HEC-RAS é a representação dos dados geométricos, definida para todas as etapas do modelo e a rotina do cálculo geométrico e hidráulico, iguais para os quatro componentes.

3.6.1 Fluxo Quase-permanente

Para o cálculo do transporte de sedimentos, o HEC-RAS utiliza uma simplificação hidrodinâmica. Supondo um fluxo quase-permanente, é possível aproximar um hidrograma contínuo por uma série discreta de vazões constantes, ou seja, para cada dado de vazão há um período de tempo que a

mesma é constante. Para isso, o HEC-RAS utiliza as seguintes divisões de tempos: a duração de fluxo, que representa o intervalo de tempo em que a vazão e as suas características, como a temperatura ou carga de sedimentos, são constantes, e o incremento de cálculo, que divide a duração de fluxo. Ainda que a vazão continue sendo o mesmo na duração do fluxo, a geometria do leito e a hidrodinâmica do rio são atualizadas depois de cada incremento de cálculo; a estabilidade do modelo é muito sensível a esta subdivisão (CAMPOS, 2011).

3.6.1.1 Continuidade de sedimento

O HEC-RAS resolve a equação da continuidade de sedimentos para determinar o volume de erosão e deposição e dessa forma definir a nova configuração do leito (USACE, 2010b). A equação da continuidade simplificada na condição de equilíbrio é conhecida como equação de Exner, a qual é escrita como:

$$(1 - \lambda) \left(\frac{\partial A_b}{\partial t} \right) + \left(\frac{\partial Q_s}{\partial x} \right) = q_s \quad (13)$$

Onde, A_b é a área da seção transversal, λ a porosidade do material de fundo variando de 0 a 1, t é o tempo, x é a distância e Q_s é a descarga sólida e q_s é a contribuição.

Por meio dessa equação, demonstra-se que as variações de sedimento no volume de controle são iguais a diferença entre os ganhos e as perdas da carga de sedimento.

A equação de continuidade de sedimentos é resolvida calculando a capacidade de transporte de sedimentos aplicada as diferentes classes de tamanhos de partículas do volume de controle associado a cada seção transversal. Esta capacidade é comparada com toda a entrada de sedimentos no volume de controle. Se essa capacidade é maior que a entrada, há uma deficiência de sedimentos, e assim a mesma é satisfeita erodindo o leito. Se a entrada é maior, há um superávit de sedimentos, causando a deposição do material transportado (GARCIA, 2012).

3.6.1.2 Função de Transporte¹

Devido às funções de transporte de sedimentos serem desenvolvidas sob diferentes condições, uma ampla gama de resultados pode ser esperada quando dos usos das diferentes funções. Portanto, é importante verificar a precisão da previsão de sedimentos para uma quantidade apreciável de dados medidos, a partir do curso d'água em estudo ou um curso d'água com características semelhantes. É muito importante compreender os processos utilizados no desenvolvimento das funções, para aplicar a função adequada ao curso d'água em estudo.

Geralmente, as funções de transporte de sedimentos preveem taxas de transporte a partir de um dado conjunto de parâmetros hidráulicos permanentes e de propriedades dos sedimentos. Algumas funções calculam o transporte do leito do canal e outras calculam o transporte de sedimentos total, ou seja, o transporte do leito somado ao transporte em suspensão.

Há sete funções disponíveis no HEC-RAS, elas estão listadas abaixo:

- Ackers and White;
- England and Hansen;
- Copeland's form of Laursen;
- Meyer, Peter and Muller;
- Toffaleti;
- Yang;
- Wilcock.

A TABELA 2 mostra uma tabela com os parâmetros específicos utilizados para a aplicação das Equações de Transporte.

¹ Esta subseção trata de Funções de Transporte contidas em mais detalhes na Referência Técnica do SisBaHia, que pode ser baixada de www.sisbahia.coppe.ufrj.br

TABELA 2 - PARÂMETROS PARA APLICAÇÃO DAS FUNÇÕES DE TRANSPORTE

Função	d_{50} (mm)	S	V (m/s)	D (m)	S	W (m)	T_{min} (°C)
Ackers - White	NA	1,0 - 2,7	0,02 - 2,2	0,003 - 0,4	0,00006-0,037	0,07-1,2	28,8 -
Englund - Hansen	0,19 - 0,93	NA	0,2 - 1,9	0,06 - 0,4	0,000055 - 0,019	NA	27,8
Laursen	0,08 - 0,7	NA	0,02 - 2,4	0,02 - 16,5	0,0000021 - 0,0018	19,2 - 1109,5	14,8
Laursen	0,011-29	NA	0,2 - 2,9	0,009 - 1,1	0,00025 - 0,025	0,07 - 2,0	28,8
Meyer - Peter Muller	NA	1,25 - 4,0	0,4 - 2,9	0,009 - 1,2	0,0004-0,02	0,2 - 2	NA
Tofaletti	0,095 - 0,76	NA	0,2-2,4	0,02 - 17,3 (R)	0,000002-0,0011	19,2 - 1109,5	14,8
Yang	NA	NA	0,2 - 2,0	0,01 - 15,24	0,000043 - 0,028	0,1 - 533,4	14,8
Yang	NA	NA	0,4 - 1,6	0,02 - 0,2	0,0012 - 0,029	0,1 - 533,4	14,8

FONTE: Modificado de USACEa, 2010

NA = Dados indisponíveis.

Onde d_{50} é o diâmetro médio da partícula, s é a gravidade específica do sedimento, V é a velocidade média do canal, D é a profundidade do canal, S é o gradiente de energia, W é a largura do canal e T_{min} é a temperatura mínima da água.

3.6.2 Dados necessários para o HEC-RAS

Para a simulação de escoamento quase-permanente, o HEC-RAS necessita de três conjuntos de dados: dados geométricos, dados sobre o escoamento e dados sobre os sedimentos .

3.6.2.1 Dados Geométricos

Desenho do rio

O desenho do rio define como os trechos do rio estão conectados. A conectividade dos trechos é importante para que o modelo entenda como os cálculos deverão proceder de um trecho a outro. O sistema é construído dentro do editor de dados geométricos, antes de qualquer outro dado possa ser inserido.

Seções transversais

O contorno geométrico para a análise do escoamento em canais naturais é especificado em termos dos perfis estabelecidos pelas seções transversais e as distâncias entre elas.

As seções transversais são localizadas em intervalos ao longo do rio para caracterizar a capacidade de deslocamento da vazão do curso d'água e suas planícies adjacentes. São requeridas em locais representativos ou onde ocorrem alterações na descarga, inclinação, forma ou rugosidade do canal.

As seções transversais são inseridas de montante para jusante. Para cada uma das seções são requeridos pontos de estação e elevação (coordenadas x e y) para caracterização do perfil do canal naquele ponto. O modelo requer ainda a inclinação das margens direita e esquerda das seções transversais

Outros dados exigidos para cada seção transversal são o comprimento do trecho até a próxima seção a jusante, o coeficientes de rugosidade de Manning e os coeficientes de contração e expansão.

3.6.2.2 Dados sobre o escoamento

Os dados sobre o escoamento requeridos pelo modelo para a simulação em regime quase-permanente consistem nas condições iniciais e as condições de contorno, nas seções a jusante e a montante.

Condições iniciais

As condições iniciais são necessárias para estabelecer a superfície livre inicial nas extremidades do rio (montante e jusante). Uma superfície livre inicial é necessária para que o HEC-RAS possa iniciar os cálculos.

Condição de contorno

É necessário especificar as condições de contorno nas seções tanto a montante como a jusante, sendo possível a adição de condições de contorno para as seções intermediárias. Há cinco tipos de condições de contorno disponíveis, elas são:

i) Série de vazões: essa condição é específica para a seção a montante, devendo ser inserido uma série de perfis de fluxo permanente e o tempo de duração do mesmo.

ii) Série de vazões Laterais: essa opção serve para contabilizar fluxos afluentes de tributários não modelados. Deverá ser informada uma série de perfis de fluxo permanente associado a uma duração de fluxo.

iii) Série de níveis d'água: essa condição de contorno é aplicada na seção mais a jusante e permite o usuário informar uma série de cotas de nível d'água associadas a uma duração em que permanecem constantes.

iv) Curva-chave: essa condição também é aplicada a última seção e requer a inserção de uma curva-chave. Para cada perfil, a elevação é interpolada a partir da curva-chave dada.

v) Profundidade normal: aplicada a seção mais a jusante, permite que uma inclinação da linha de energia possa ser inserida e será utilizada no cálculo da profundidade normal nessa seção.

3.6.2.3 Dados sobre os Sedimentos

Os dados sobre os sedimentos requeridos pelo modelo consistem nas dimensões do volume de controle, na granulometria do leito e nas condições de contorno.

Dimensões do volume de controle

O volume de controle inicia no ponto intermediário entre a seção transversal em estudo e a seção mais próxima a montante e termina no ponto intermediário com relação à próxima seção a jusante.

Para a espessura vertical do volume de controle deve-se definir a profundidade máxima erodível como sendo a distância abaixo do nível d'água original do canal ou a mínima elevação abaixo da qual o modelo não pode erodir.

A largura é a dimensão final requerida para cada volume de controle de sedimento. O HEC-RAS permitirá que a deposição ocorra ao longo de todo o perímetro molhado de uma seção transversal, enquanto que para a erosão permitirá apenas que esta ocorra entre os limites do leito móvel definidos.

Granulometria do Leito

Para esta opção é possível que o usuário insira os dados de granulometria dos sedimentos presentes no leito, construindo curvas granulométricas específicas para cada seção transversal.

Condições de contorno

Há três possíveis condições de contorno para os sedimentos:

i) Carga de equilíbrio: a carga de equilíbrio, disponível apenas para seções transversais externas a montante, é determinada pela capacidade de transporte. O HEC-RAS calculará, para cada intervalo de tempo, a capacidade de transporte de sedimento na seção transversal especificada e essa será utilizada como entrada de sedimento. Uma vez que a carga é definida como sendo igual a capacidade para cada tamanho de partícula, não haverá assoreamento ou erosão nessa seção transversal.

ii) Curva-chave de sedimentos: nessa opção deve ser informado uma séries de entradas de sedimentos associado a uma curva-chave de vazões.

iii) Série de carga de sedimentos: esta condição não depende de um escoamento, sendo assim é possível que a carga de sedimento seja especificada em qualquer seção transversal, exceto à montante.

3.6.3 Resultados

O modelo HEC-RAS permite a visualização de resultados em gráficos espaciais e temporais dos valores referentes à velocidade, à vazão, à elevação do talvegue e da superfície da água, e alteração do leito, com a quantificação da massa de entrada, saída e acumulada em cada seção transversal.

4 ÁREA DE ESTUDO

A bacia hidrográfica do rio Verde está situada no Estado do Paraná, na Região Metropolitana de Curitiba, abrangendo os municípios de Campo Magro, Campo Largo e Araucária. É uma sub-bacia da bacia do Alto Iguaçu e sua área de drenagem é de aproximadamente 242 km². A bacia hidrográfica do rio Verde esta inserida na Área de Proteção Ambiental (APA) do Rio Verde. A localização da bacia do Rio Verde é mostrada na FIGURA 4.

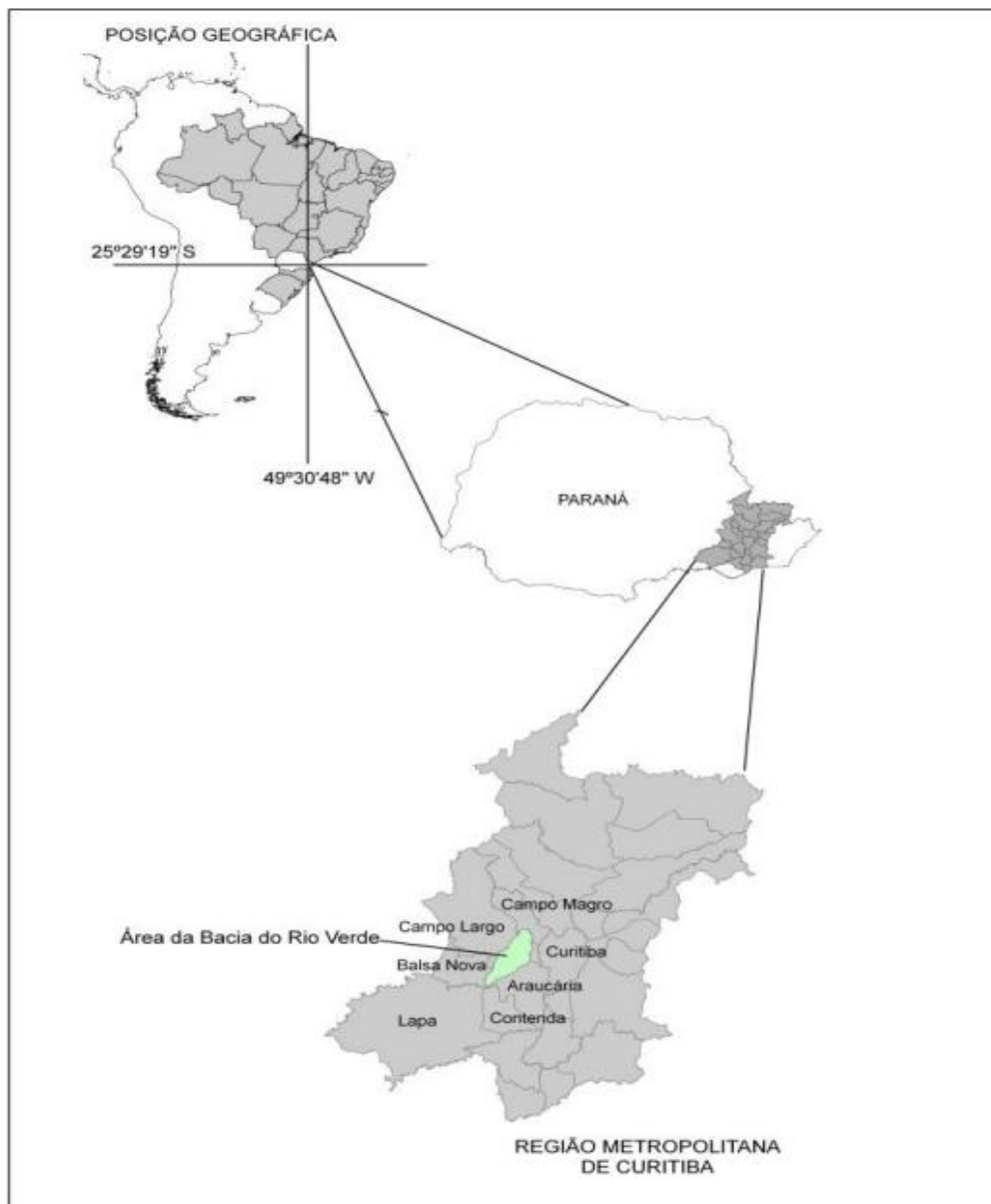


FIGURA 4 - MAPA DA LOCALIZAÇÃO DA BACIA DO RIO VERDE
FONTE: ANDREOLI *et al*, 2011

O Rio Verde possui sua nascente no município de Campo Magro. Foi construído o Reservatório do Rio Verde com a finalidade de atender à refinaria Presidente Getúlio Vargas (REPAR), sob responsabilidade da PETROBRAS. O reservatório localiza-se na porção centro-sudeste da bacia.

O foco do presente estudo abrange cerca de 165 km² da bacia do Rio Verde e compreende a região entre a nascente (coordenadas 25°21'55"S e 49°27'00"O) e a estação fluviométrica Haras Rio Verde (coordenadas 25°27'23"S e 49°27'43"O), ou seja, a montante do reservatório e sem sua influência (ANDREOLI et al., 2011). O trecho estudado pode ser observado na FIGURA 5.

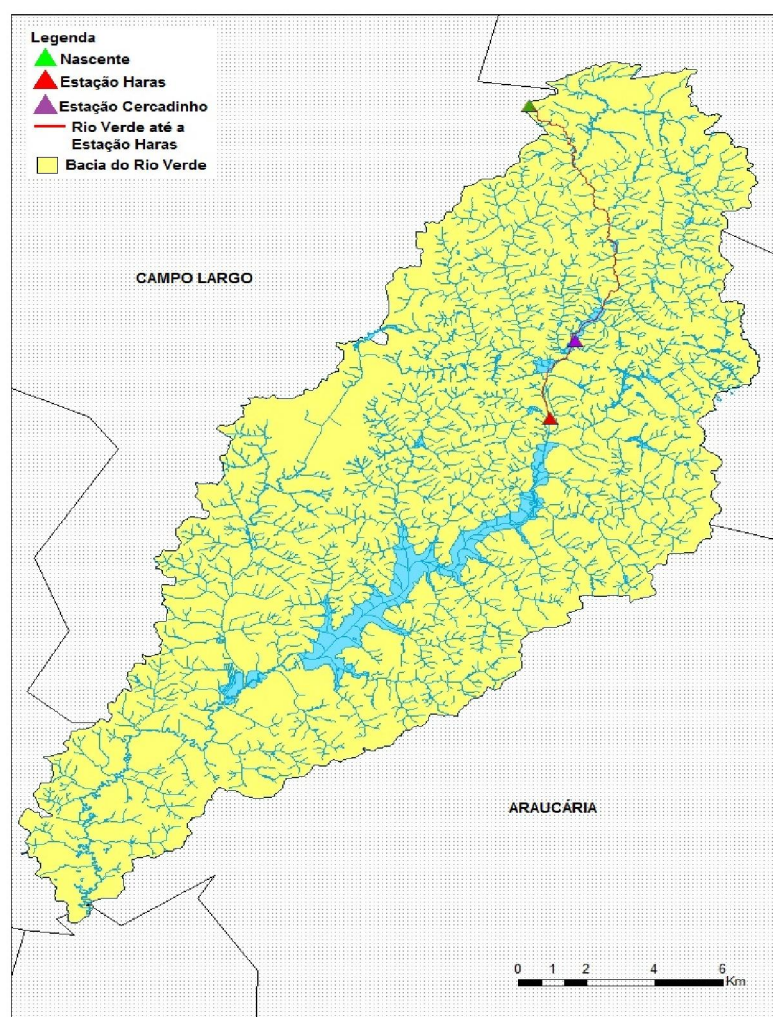


FIGURA 5 - ÁREA DE ESTUDO: BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO VERDE, REGIÃO METROPOLITANA DE CURITIBA.

FONTE: Matheus Vidal Prado², 2014.

² PRADO, M. V. - Universidade Federal do Paraná - (Comunicação pessoal, 2014)

A escolha desta área de estudo deve-se principalmente a três fatores: a disponibilidade de dados de outros estudos (ANDREOLI et al., 2011) já realizados na região, a possibilidade de confrontar os dados obtidos pelo modelo com a observação da situação atual e ainda, devido a presença da Estação de Tratamento de Água (ETA) do Cercadinho. A ETA realiza a captação da água através de um sistema subsuperficial, de modo que a turbidez, que pode estar relacionada à presença de sólidos em suspensão, é um fator que pode causar o mau funcionamento da Estação de Tratamento de Água.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA BACIA DO RIO VERDE

4.1.1 Clima

A Bacia Hidrográfica do Rio Verde tem clima tipo Cfb segundo a classificação de KÖEPPEN. Ou seja, clima subtropical com verões frescos e úmidos e invernos brandos com ocorrência de geada. A temperatura média anual é de 16,5°C. Sendo que o mês mais frio (julho) tem temperatura média igual a 12,7°C e o mês mais quente (fevereiro) igual a 20,3°C.

A umidade relativa do ar apresenta pouca variação anual, com valores médios de 80%. A precipitação média anual é de aproximadamente 1468 mm. Os meses que possuem maior precipitação são os meses de verão e os mais secos são os meses que correspondem ao inverno.

A direção dos ventos predominante é de leste para oeste, com velocidade média aproximadamente de 2,8 m/s e velocidade máxima de 10,3 m/s (ANDREOLI et al., 2011).

4.1.2 Uso e Ocupação do Solo

A APA do Rio Verde ocupa a área a montante do Reservatório do Rio Verde, e abrange partes dos Municípios de Araucária e Campo Largo.

Durante as três últimas décadas, a Bacia do Rio Verde sofreu algumas modificações devido às mais variadas formas de atividades antrópicas, como exploração madeireira, aumento de atividades agropecuárias e expansão

urbana e industrial. No ano de 1976, as áreas com vegetação representavam 52% da bacia hidrográfica e as áreas edificadas correspondiam a uma pequena porção na região leste da bacia. Segundo ANDREOLI *et al.* 2011, tendo como base dados de 2009, 49% da bacia é ocupada por atividades agropecuárias, 41% por florestas (com predomínio de capoeirão); as áreas urbanas totalizam 7% e 3% correspondem aos corpos d'água, o que pode ser observada na FIGURA 6.

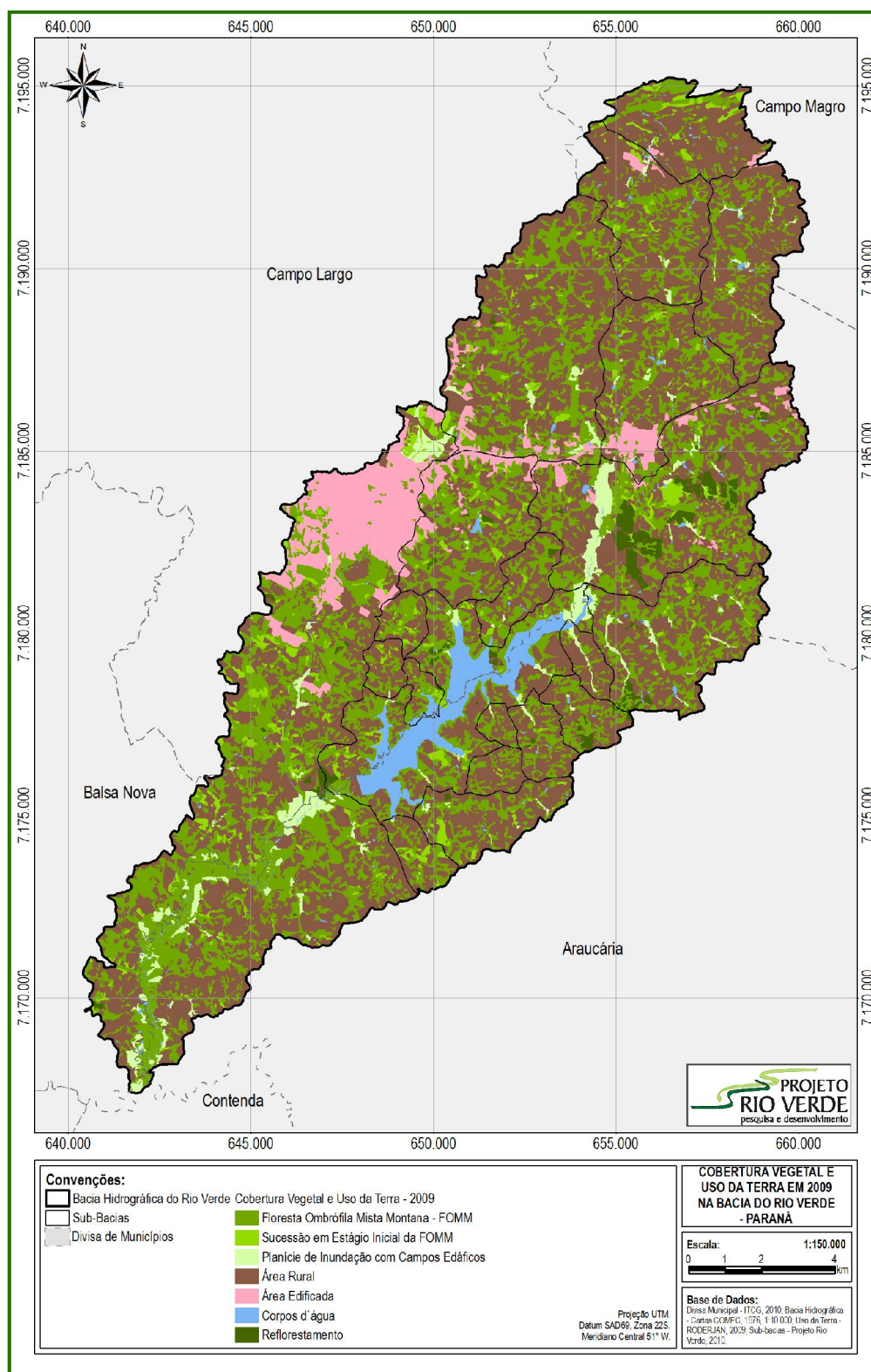


FIGURA 6 - COBERTURA VEGETAL E USO DA TERRA EM 2009 NA BACIA DO RIO VERDE – PR

FONTE: ANDREOLI *et al.*, 2011

4.1.3 Cobertura Vegetal

A superfície da região onde está inserida a Bacia do Rio Verde foi profundamente modificada por algumas intervenções feitas pelo homem, iniciando pela exploração madeireira, seguida pela troca das florestas para cultivo agropecuário e nas últimas décadas, fortemente pressionada pela expansão urbana e industrial, restando pouca composição vegetal original (ANDREOLI *et al.*, 2011)

Procurando contemplar os cenários mais característicos e expressivos da cobertura vegetal natural e as formas de uso do solo mais relevantes classificou-se a área da bacia em três tipos:

- Região da Floresta Ombrófila Mista – 37,32 %
- Áreas de Formações Pioneiras (Planície de inundação com campos edáficos) - 2,9 %
- Áreas de Antropismos (Áreas rurais e edificadas) - 59,78 %

Essa classificação pode ser observada na FIGURA 6

4.1.4 Tipo de Solo

Na bacia do Rio Verde observa-se que predominam Gleissolos, Latossolos, Nitossolos, Cambissolos e Organossolos. As porções ocupadas por Gleissolos são planícies aluviais, merecendo um cuidado especial no que diz respeito a decisões de planejamento e gestão ambiental. Áreas ocupadas por Latossolos são as que detêm as menores restrições de utilização, enquanto que as partes do terreno ocupadas por Nitossolos e Cambissolos são marcadas por serem pouco permeáveis e de alto potencial de erosão hídrica. Os solos argilosos, por fim, possuem grande quantidade de poros, possuindo capacidade hídrica e pouca permeabilidade. Essa configuração de solo pode ser observada no mapa da FIGURA 7, onde é possível observar que na porção a montante do reservatório do rio Verde prevalecem os solos do tipo Nitossolo e Cambissolo e, como já descrito anteriormente, a erosão é facilitada.

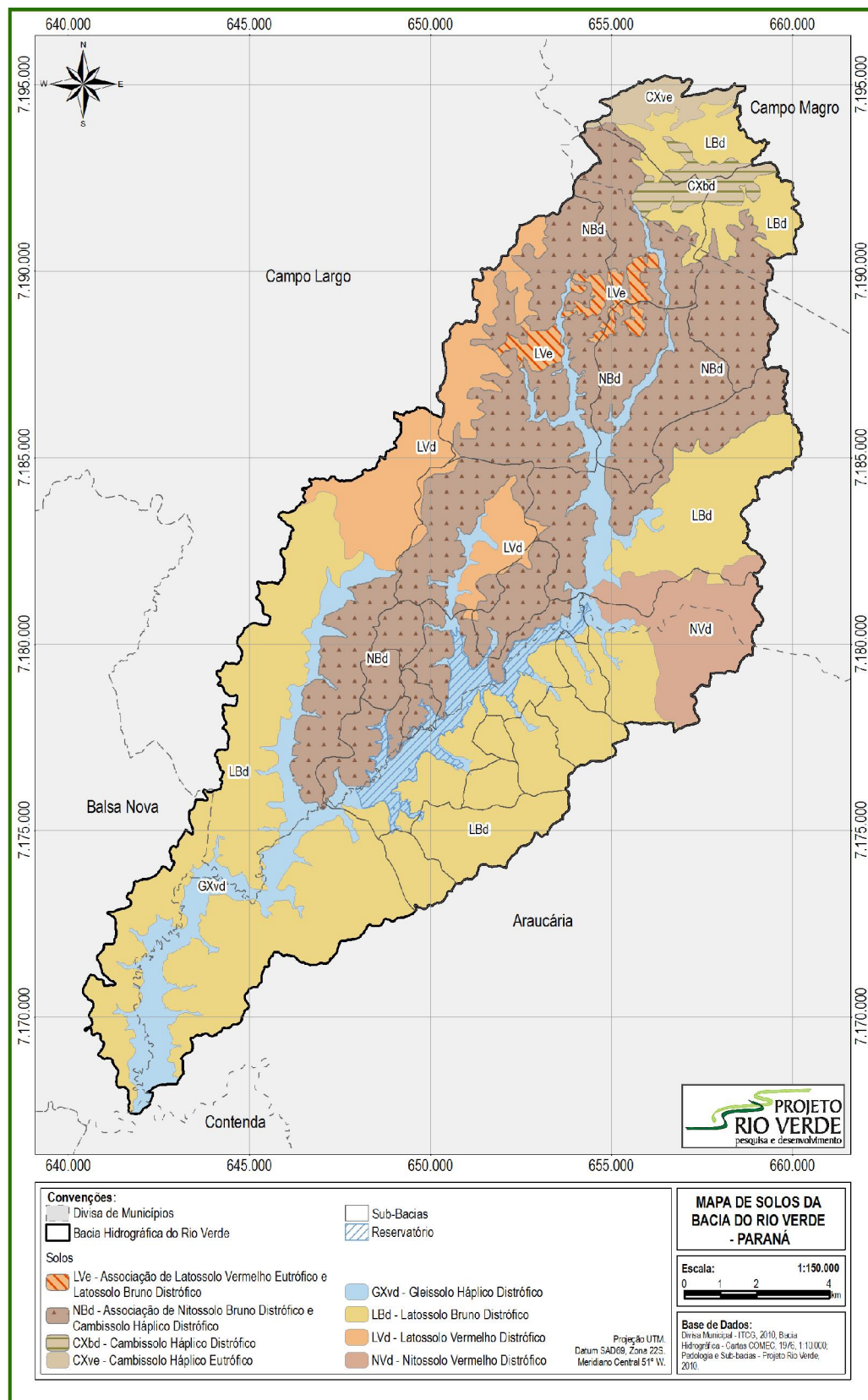


FIGURA 7 - MAPA DE SOLOS DA BACIA DO RIO VERDE – PARANÁ
 FONTE: ANDREOLI *et al.*, 2011

5 METODOLOGIA

Nesta seção detalha-se os dados geométricos, de escoamentos e do tipo de sedimento necessários ao modelo HEC-RAS.

5.1 DADOS GEOMÉTRICOS

Primeiro, foi realizada a delimitação da bacia na qual o trecho do rio Verde está inserido, definindo também as sub-bacias de contribuição, baseando-se na hidrografia e no relevo da região, e fixando a seção exutória, definida na Estação Haras. Essa delimitação foi feita manualmente através do software Surfer com mapas da hidrografia e o modelo digital do terreno da região. A divisão das sub-bacias usada no modelo pode ser observada na FIGURA 8.

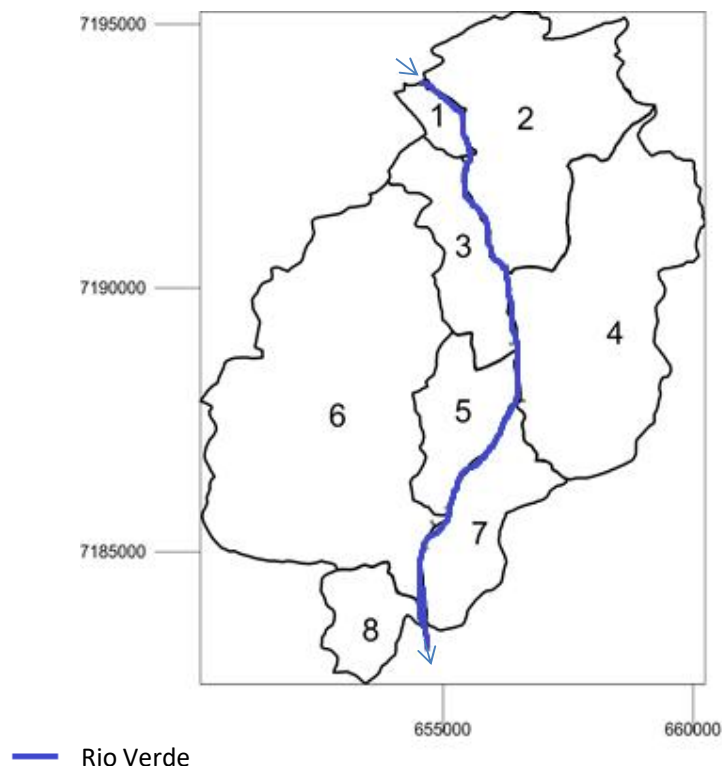


FIGURA 8 - LOCALIZAÇÃO DAS SUB-BACIAS DO TRECHO A MONTANTE DA ESTAÇÃO HARAS

FONTE: Autora, 2015

A extensão do trecho do rio Verde estudado é de 10286,17 m, e foi dividida em 24 seções transversais. O espaçamento entre as seções transversais é variável, determinado a partir das distâncias entre uma seção e a próxima seção, a jusante. O modelo numera as seções de jusante para montante. Assim, a seção transversal 24 é a seção mais a montante. A distância das seções transversais pode ser observada na TABELA 3.

TABELA 3 - DISTÂNCIA DAS SEÇÕES TRANSVERSAIS EM RELAÇÃO A SEÇÃO MAIS A MONTANTE, CONSIDERADAS PELO HEC-RAS

Seções Transversais	Distâncias das seções (m) em relação a seção 24, consideradas pelo HEC-RAS
24	0
23	371,46
22	887,51
21	1369,34
20	1948,46
19	2409,89
18	2816,72
17	3254,81
16	3810,12
15	4237,94
14	4628,15
13	5102,07
12	5485,25
11	5788,72
10	6225,47
9	6569,47
8	6942,70
7	7592,29
6	8176,84
5	8610,82
4	9030,12
3	9435,61
2	9868,01
1	10286,17

Após a determinação da área de estudo, foi realizada a escolha de quais seriam as seções onde os dados de sedimento e geométricos seriam medidos. Para esta escolha foi necessário conhecer o perfil longitudinal do rio, caracterizando-o em seções com aproximadamente 500 metros.

Os perfis longitudinais demonstram uma relação entre a variação de altitude da superfície e o comprimento do rio, sendo que são esperadas declividades maiores perto da nascente e declividades mais suaves em direção a foz do rio.

Dessa forma, com base na declividade dos pontos em questão e as características da bacia, o rio foi dividido em três trechos com características semelhantes. Dentro de cada trecho foi observado onde haveria maior probabilidade de depósito de sedimentos, devido à presença de curvas ou locais de águas mais calmas. Dessa forma, os pontos amostrais foram estabelecidos. O perfil longitudinal do rio Verde está representado pela FIGURA 9.

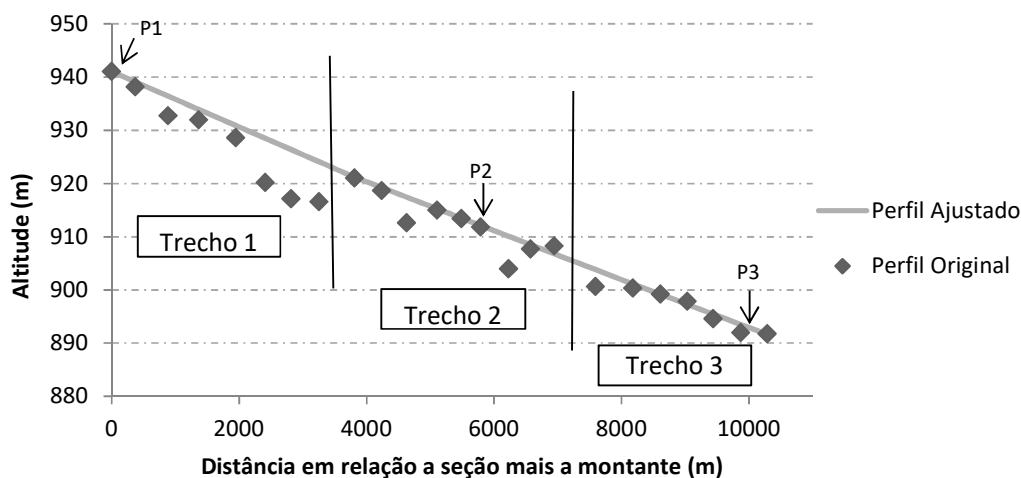


FIGURA 9 - PERFIL LONGITUDINAL DO RIO VERDE

Os dados geométricos e de sedimentos foram obtidos através de uma visita de campo em novembro de 2014, onde as características das seções transversais foram mensuradas. Considerou-se o rio com seção transversal trapezoidal. Para esta configuração, a largura de fundo varia linearmente entre 1,0 m (na primeira seção transversal a montante) e aproximadamente 2,0 metros (na última seção a jusante), com um ângulo de inclinação de 45° nas margens. Dessa forma, a largura do topo, ao e longo do rio, varia entre 2,0 e 3,0 m.

5.2 DADOS DE SEDIMENTOS

As coletas de amostras de sedimentos foram realizadas na seção mais a montante (seção 24), no meio do trecho (seção 11) e na seção próxima ao Haras (seção 2), que correspondem os pontos 1, 2 e 3 respectivamente. As amostras de sedimentos foram encaminhadas ao laboratório TECLAB – Tecnologia em Análises Ambientais para análise granulométrica e volumétrica.

Com as amostras analisadas, foram construídas curvas granulométricas e encontrado o diâmetro médio (d_{50}) das partículas para cada ponto de amostragem, sendo possível identificar o tipo de sedimento predominante no rio Verde. As curvas granulométricas para o Ponto 1, Ponto 2 e Ponto 3 podem ser observadas nas FIGURAS 10, 11 e 12 respectivamente. A TABELA 4 mostra a porcentagem do tipo de sedimento presente em cada ponto amostral.

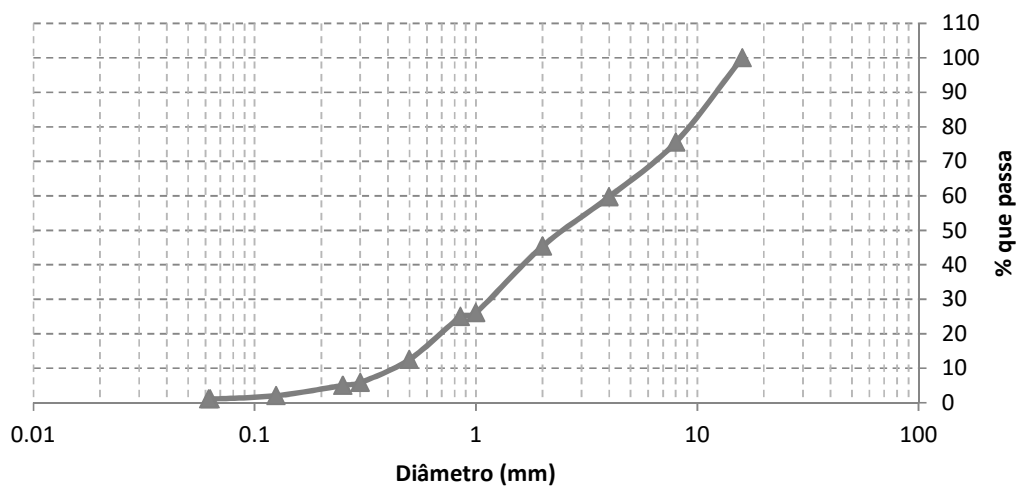


FIGURA 10 - CURVA GRANULOMÉTRICA PARA A AMOSTRA COLETADA NO PONTO 1

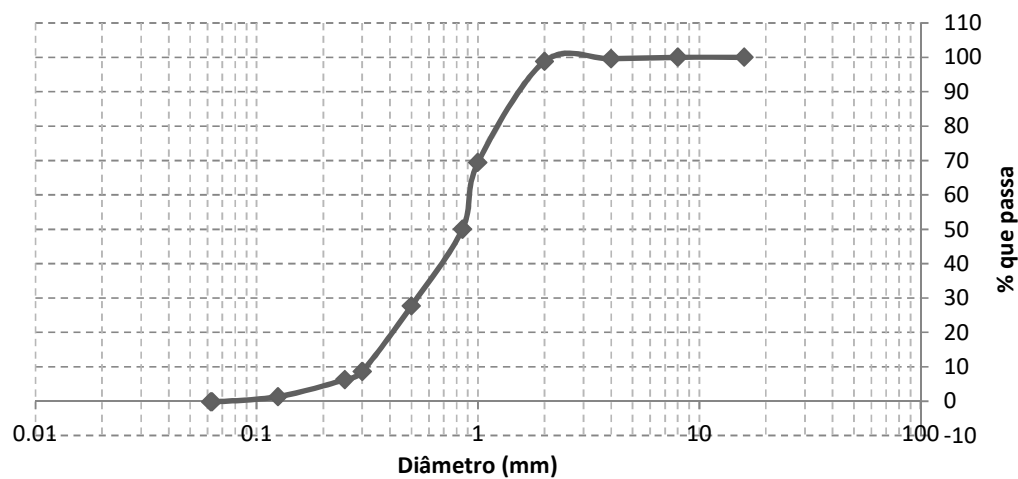


FIGURA 11 - CURVA GRANULOMÉTRICA PARA A AMOSTRA COLETADA NO PONTO 2

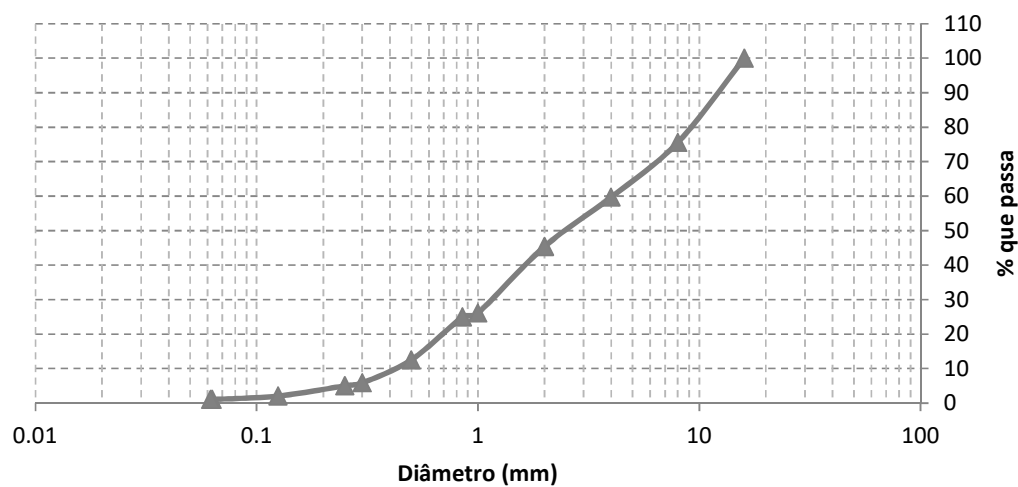


FIGURA 12 - CURVA GRANULOMÉTRICA PARA A AMOSTRA COLETADA NO PONTO 3

TABELA 4 - PORCENTAGEM DO TIPO DE SEDIMENTO E d_{50} NOS TRÊS PONTOS AMOSTRAIS

Sedimento	Ponto 1 Seção 24	Ponto 2 Seção 11	Ponto 3 Seção 2
Argila	0,00%	0,00%	0,00%
Silte	0,00%	0,00%	0,00%
Areia Fina	3,95%	6,48%	23,11%
Areia Média	19,94%	43,72%	36,53%
Areia Grossa	44,73%	49,58%	30,91%
Cascalho	30,32%	0,43%	0,72%
d_{50} (mm)	2,5	0,6	0,577

Como é possível observar na TABELA 4, para o ponto 1 e ponto 2 prevalece a areia grossa ($0,6 < \text{diâmetro} \leq 2,5 \text{ mm}$), e para o ponto 3 areia média ($0,2 < \text{diâmetro} \leq 0,6 \text{ mm}$) como sedimento predominante.

Além disso, também obtivemos dados de Concentração de Sólidos Suspensos Totais (SST) na coluna d'água para as três amostras levadas ao laboratório. O Ponto 1 possui a maior concentração de Sólidos Suspensos Totais (49,00 mg/L) e essa concentração diminui conforme o rio se desenvolve a jusante. Os resultados encontrados são mostrados na TABELA 5.

TABELA 5 - CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS SUSPENSOS TOTAIS (SST) NA AMOSTRA ORIGINAL PARA CADA UM DOS PONTOS AMOSTRAIS

Pontos	Concentração de SST na amostra original (mg/L)
Ponto 1 / Seção 24	49,00
Ponto 2 / Seção 11	20,00
Ponto 3 / Seção 2	9,00

Como condição inicial para os dados de sedimento, assumiu-se que a mínima elevação erodível é igual a elevação do fundo de cada seção transversal. A condição de contorno em relação aos sedimentos na seção mais a montante (seção 24) foi escolhida como sendo a condição de carga de equilíbrio.

Em relação às Equações de Transporte foi escolhido aplicar a equação de Yang, uma vez que os parâmetros necessários para aplicação dessa função transporte (TABELA 2) estão de acordo com os parâmetros apresentados no rio Verde.

5.3 DADOS DE VAZÃO

Esta etapa foi realizada como parte do projeto 'Critérios de escolha para localização de captação subsuperficial', no âmbito do programa paranaense de pesquisas em saneamento ambiental (CUNHA *et al.*, 2015).

Para o cálculo da vazão utilizada no fluxo quase-permanente aplicou-se o Modelo de Redes Neurais (RNAs) obtendo uma série de vazões médias, as quais abrangem um período de 10/01/1979 a 31/12/2013. Com essas vazões

foi necessário calcular valores de vazão média para um ano hidrológico, representadas na FIGURA 13.

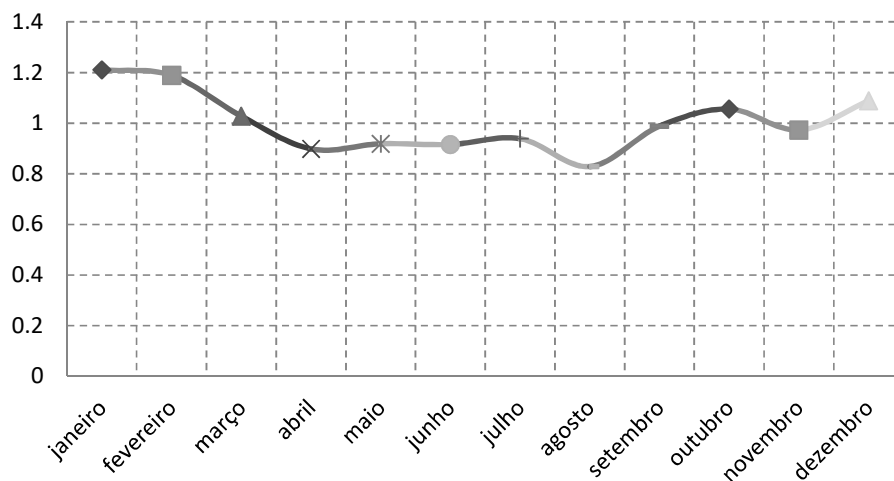


FIGURA 13 - VAZÕES MÉDIAS PARA UM ANO HIDROLÓGICO, PARA O RIO VERDE.

Assumiu-se como tributários a contribuição de sete sub-bacias, a divisão das mesmas pode ser observada na FIGURA 8. A vazão específica foi definida através da divisão da vazão total pela área total da bacia e depois multiplicada pela área de cada sub-bacia, encontrando vazões afluentes para cada sub-bacia. É importante destacar que a sub-bacia 1, sub-bacia 2 e sub-bacia 3 foram somadas e representam a condição de contorno da seção mais a montante do rio.

As demais vazões foram distribuídas ao longo do rio, como pode ser observado no diagrama unifilar do rio Verde entre a nascente e a estação Haras, mostrado na FIGURA 14. Também pode-se observar na FIGURA 14 onde os principais tributários estão localizados: o rio Cachoeira na sub-bacia 4 e o rio Rondinha na sub-bacia 6, os demais tributários são menores e não possuem denominação.

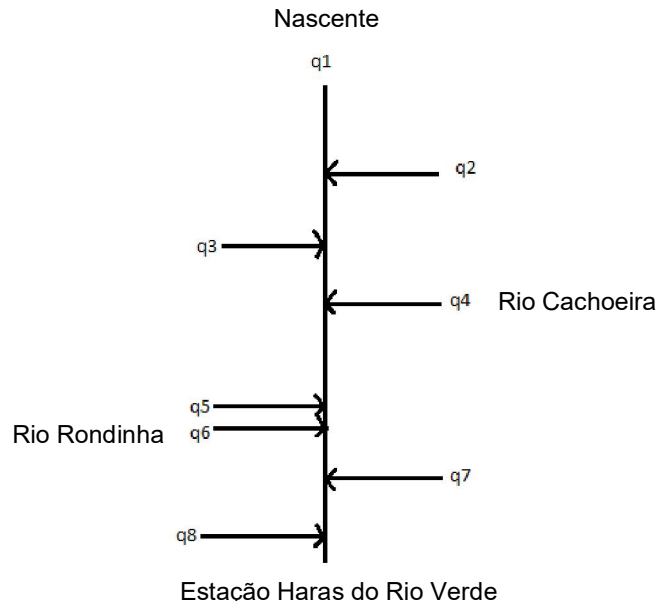


FIGURA 14 - DIAGRAMA UNIFILAR DA BACIA DO RIO VERDE ATÉ A ESTAÇÃO HARAS.

Como condição de contorno na seção transversal mais a jusante, foram estabelecidos uma série de cotas de nível d'água, a partir das vazões totais, ou seja, soma das vazões consideradas para as sete sub-bacias de contribuição e da vazão de entrada na seção mais a montante (Seção 24).

Dessa forma, com a vazão total e a utilização de uma curva-chave para a estação Haras previamente realizada em outro estudo (ANDREOLI, *et al.*, 2011), foi possível calcular os valores de cotas de nível d'água necessários.

6 RESULTADOS

No decorrer do desenvolvimento desse projeto, antes de analisar quantitativamente os resultados de transporte de sedimentos, foi necessária a realização de varias simulações no HEC-RAS. Simulações como estas possuem diversas finalidades, como verificar inconsistências na implementação do modelo, comparar os resultados obtidos com outros modelos e constatar se os resultados hidrodinâmicos correspondem ao descrito na literatura.

Particularmente neste trabalho o principal motivo dessas simulações foram os resultados obtidos para a velocidade média da seção transversal, que mostraram certa instabilidade. Fato esse que geraria resultados de transporte de sedimentos pouco coerentes para o rio estudado, pois as velocidades do canal e os fenômenos de erosão e sedimentação estão intimamente ligados (SPIEGELBERG, 2010).

Sendo assim, os resultados são mostrados em duas etapas. A primeira etapa teve como parâmetros de observação a posição da superfície livre e a velocidade média para cada seção transversal do rio em seis diferentes cenários. Já a segunda etapa concentrou-se em analisar os dados de sedimento, identificando as áreas de possível erosão e sedimentação para os cenários.

Dessa forma, este tópico aborda alguns testes com modificações nos dados geométricos e nos dados de escoamento desenvolvidos a fim de identificar e corrigir as possíveis causas dessa instabilidade.

Para os dados geométricos foi alterado o coeficiente de Manning e os coeficientes de contração e expansão, os quais são usados para avaliar a perda de energia que ocorre devido a contração e expansão de um fluido. Além disso, alteraram-se as altitudes de cada seção, ou através da suavização do fundo buscando acabar com diferenças bruscas entre duas seções, ou transformando o fundo uniforme por trecho, através da sua declividade característica. Outra tentativa foi aumentar a distância entre as seções transversais, multiplicando por um fator de dez.

Em relação aos dados de escoamento, aumentaram-se e diminuíram-se as vazões, variou-se a elevação da superfície livre na ultima seção, observou-se o comportamento da presença e ausência da entrada de tributários e mudança da condições de contorno para a seção mais a jusante.

Alguns dos testes (coeficiente de Manning, coeficiente de contração e expansão, aumento da vazão, entre outras alterações) demonstraram pouca relevância sobre o problema observado. Enquanto outros melhoraram consideravelmente os resultados de velocidade média apresentados.

Um resumo dos dados geométricos inseridos no modelo encontra-se na TABELA 6. Foi utilizado o fundo uniforme por trecho, admitiu-se um coeficiente de Manning de 0,03 e coeficiente de contração e expansão de 0,1 e 0,3, respectivamente. O período de simulação foi de um ano, começando em 01 de janeiro de 2000 e terminando 31 de dezembro de 2000. Esses dados serviram para os quatro primeiros cenários mostrados a seguir. E o Anexo B mostra os valores obtidos para cada cenário.

TABELA 6 - RESUMO DOS DADOS GEOMÉTRICOS DO MODELO PARA OS QUATRO PRIMEIROS CENÁRIOS

Seção Transversal	Bo (m)	B(m)	H(m)	Distância em relação a nascente	ΔX	z(m)
24	1	3	1	0	371,46	941,02
23	1	3	1	371,5	516,05	939,09
22	1,08	3,04	1,04	887,5	481,83	936,4
21	1,18	3,09	1,09	1369,3	579,12	933,9
20	1,28	3,14	1,14	1948,5	461,43	930,89
19	1,39	3,2	1,2	2409,9	406,83	928,49
18	1,49	3,24	1,24	2816,8	438,09	926,37
17	1,57	3,29	1,29	3254,9	555,31	924,09
16	1,66	3,33	1,33	3810,2	427,82	921,21
15	1,77	3,39	1,39	4238,0	390,21	919,24
14	1,86	3,43	1,43	4628,2	473,92	917,44
13	1,94	3,47	1,47	5102,1	383,18	915,26
12	2,03	3,52	1,52	5485,3	303,47	913,5
11	2,11	3,56	1,56	5788,8	436,75	912,11
10	2,17	3,59	1,59	6225,5	344	910,1
9	2,26	3,63	1,63	6569,5	373,23	908,51
8	2,33	3,67	1,67	6942,7	649,59	906,8
7	2,41	3,7	1,7	7592,3	584,55	903,81
6	2,54	3,77	1,77	8176,9	433,98	901,12
5	2,66	3,83	1,83	8610,9	419,301	899,17
4	2,75	3,87	1,87	9030,2	405,489	897,28
3	2,83	3,92	1,92	9435,7	432,4	895,46
2	2,91	3,96	1,96	9868,1	418,16	893,51
1	3	4	2	10286,2	0	891,63

6.1 RESULTADOS DO MODELO HIDRODINÂMICO: POSIÇÃO DA SUPERFÍCIE LIVRE E VELOCIDADE MÉDIA

6.1.1 Cenário 1

O primeiro cenário apresenta o conjunto de valores reais obtidos referentes ao rio Verde e todos os outros cenários executados foram modificados em relação a estes dados iniciais.

Além dos dados geométricos, foi imposta como posição da superfície livre na seção mais a jusante a cota de 890,14 metros e valores de vazões médias para a condição de contorno a montante e para as vazões laterais, as quais simularam a entrada dos tributários. Os valores das vazões estão presentes na TABELA 7 e os resultados encontrados foram dispostos nas FIGURAS 15 e 16.

TABELA 7 - VAZÕES USADAS NO CENÁRIO 1

Estação do Rio	Distância em relação a nascente	Vazão Total (m ³ /s)
24	0	0,25
23	371,5	0,25
22	887,5	0,25
21	1369,3	0,25
20	1948,5	0,25
19	2409,9	0,25
18	2816,8	0,25
17	3254,9	0,25
16	3810,2	0,25
15	4238,0	0,25
14	4628,2	0,25
13	5102,1	0,47
12	5485,3	0,47
11	5788,8	0,47
10	6225,5	0,47
9	6569,5	0,47
8	6942,7	0,53
7	7592,3	0,89
6	8176,9	0,89
5	8610,9	0,96
4	9030,2	0,96
3	9435,7	0,96
2	9868,1	1
1	10286,2	1

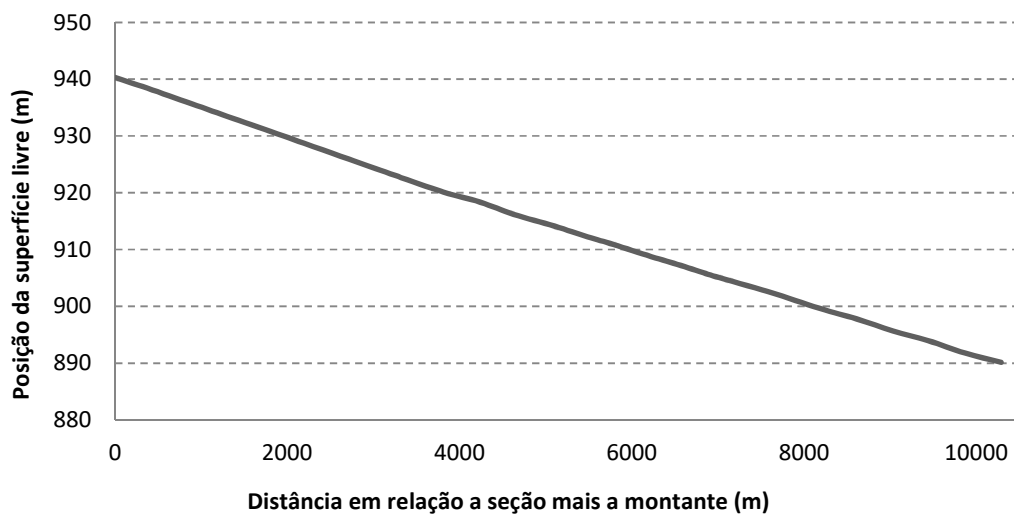


FIGURA 15 – VALORES DA POSIÇÃO DA SUPERFÍCIE LIVRE OBTIDOS PELO HEC-RAS NO CENÁRIO 1

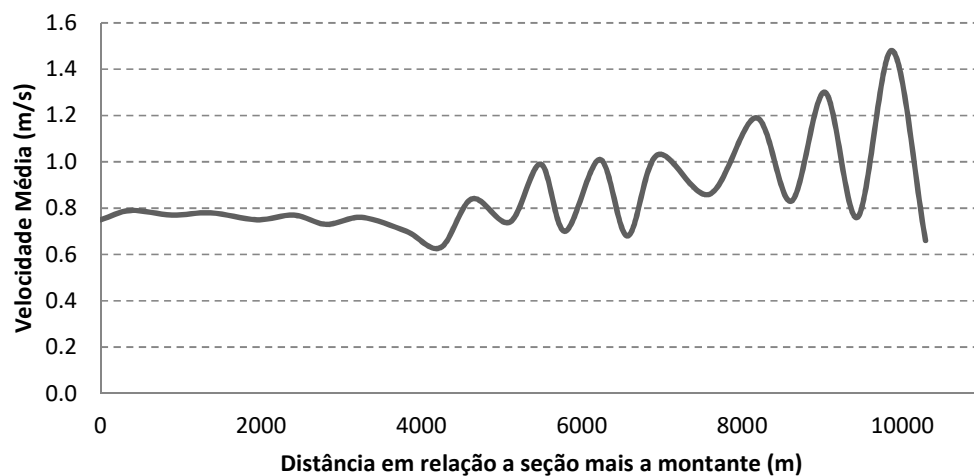


FIGURA 16 - VALORES DE VELOCIDADE MÉDIA OBTIDOS PELO HEC-RAS NO CENÁRIO 1

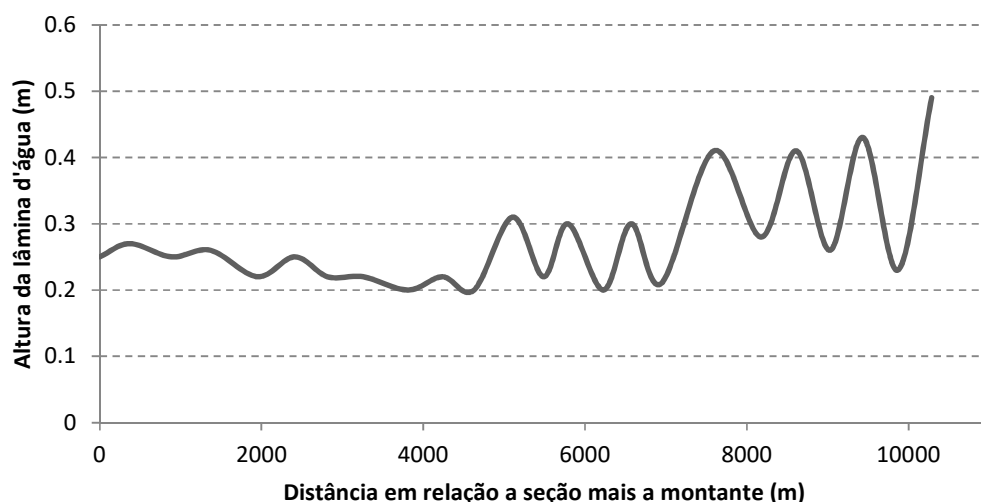


FIGURA 17 - VALORES DA LÂMINA D'ÁGUA OBTIDOS PELO HEC-RAS NO CENÁRIO 1

Os resultados obtidos para a posição da superfície livre no cenário 1 demonstram um desempenho já esperado, ou seja, uma diminuição gradativa da elevação de montante a jusante, característica do Rio verde, terminando na ultima seção com uma elevação de 890,14 metros, condição de contorno imposta para esta seção.

Já os valores da velocidade média no cenário 1, é possível observar que até a seção 15 (4.237,98 metros) as velocidades mostram pouca oscilação. Na próxima seção, a velocidade média do canal passa de 0,63 m/s para 0,84 m/s e a partir desse ponto os valores apresentam certa instabilidade, atingindo picos muito elevados. Estes picos foram 1,19 m/s na seção 6, 1,3 m/s na seção 4 e 1,48 m/s na penúltima seção (seção 2), voltando a diminuir na seção 1, fato esse que pode ser explicado pela imposição do nível d'água nesse ponto.

Segundo AZEVEDO NETO (1979) a velocidade média de escoamento num canal deve situar-se dentro de certos limites, sendo estabelecida levando em conta a natureza do material que constitui o canal. Para canais com material arenoso encontramos como velocidade máxima para o escoamento os valores presentes na TABELA 8. Concluindo que os valores de velocidade média apresentados por este cenário estão além dos valores esperados.

TABELA 8 - VELOCIDADES MÁXIMAS PARA CANAIS DE FUNDO DE AREIA

Material	Velocidade máxima (m/s)
Areia Fina	0,30
Areia Media	0,46
Areia Grossa	0,61

FONTE: AZEVEDO NETO, 1979

Não se pode deixar de notar que a variação nos resultados de velocidade começa próxima a seção em que inicia-se a mudança de vazão devido a contribuição dos tributários.

Observando a FIGURA 17, podemos concluir que os valores de altura da lâmina d'água para este cenário apresentam o mesmo comportamento dos valores de velocidade média, ou seja, um comportamento oscilatório.

6.1.2 Cenário 2

No cenário 2, as modificações ocorreram na prescrição da posição da superfície livre de 890,38 metros na ultima seção (Seção 1) e na primeira seção (Seção 24), a imposição da vazão de $1,02 \text{ m}^3/\text{s}$ mantida uniforme até o final do rio, ou seja, sem a influência de tributários. Os resultados desse cenário podem ser observados nas FIGURAS 17 e 18.

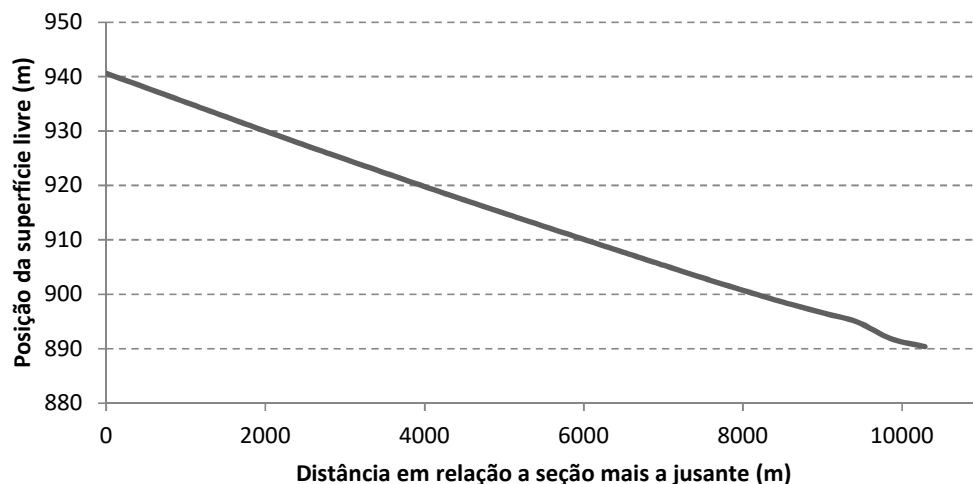


FIGURA 18 - VALORES DA POSIÇÃO DA SUPERFÍCIE LIVRE OBTIDOS PELO HEC-RAS NO CENÁRIO 2

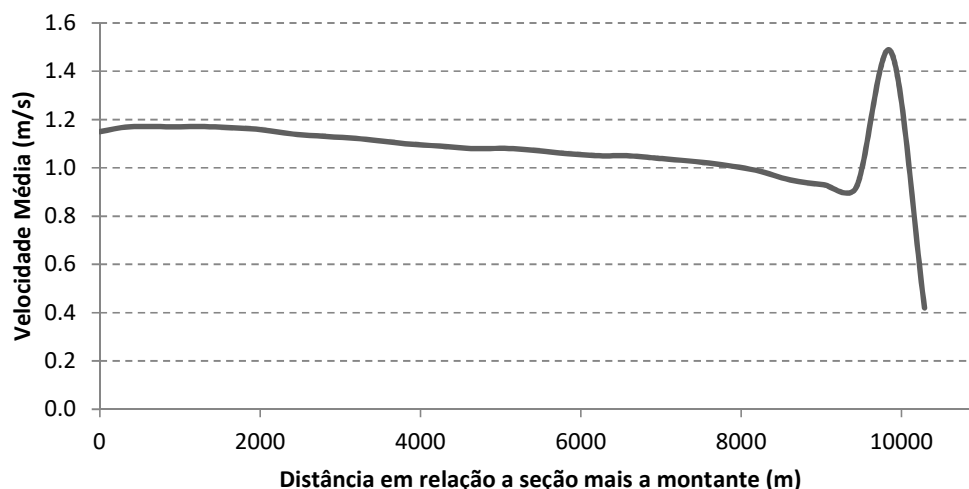


FIGURA 19 – VALORES DE VELOCIDADE MÉDIA OBTIDOS PELO HEC-RAS NO CENÁRIO 2

Os valores da posição da superfície livre são coerentes, diminuindo de montante a jusante e apresentando na última seção uma elevação de 890,38 metros, estipulada como condição de contorno nesse ponto.

Em relação às velocidades médias apresentadas neste cenário, mostraram pouca oscilação, isto pode ser associado a ausência dos tributários. No entanto é visível a presença de um pico de 1,48 m/s na seção 2. Além disso, em algumas seções, os valores de velocidade foram maiores que no cenário 1 e isso é explicado pelo aumento da vazão para uma mesma seção transversal, e consequentemente, aumento da velocidade média para esta seção.

Os valores de velocidade média apresentados continuam muito acima dos valores esperados para esse trecho de rio (TABELA 8).

6.1.3 Cenário 3

Para o Cenário 3, as mudanças incidiram sobre os valores de vazões laterais, que tiveram suas vazões diminuídas. As vazões usadas nesse Cenário são mostradas na TABELA 9 e os resultados dessa simulação para cada seção transversal encontram-se nas FIGURAS 19 e 20.

TABELA 9 – VAZÕES USADAS NO CENÁRIO 3

Estação do Rio	Distância em relação a nascente	Vazão Total (m ³ /s)
24	0	0,3
23	371,5	0,3
22	887,5	0,3
21	1369,3	0,3
20	1948,5	0,3
19	2409,9	0,3
18	2816,8	0,3
17	3254,9	0,3
16	3810,2	0,3
15	4238,0	0,3
14	4628,2	0,3
13	5102,1	0,36
12	5485,3	0,36
11	5788,8	0,36
10	6225,5	0,36
9	6569,5	0,36
8	6942,7	0,42
7	7592,3	0,48
6	8176,9	0,48
5	8610,9	0,54
4	9030,2	0,54
3	9435,7	0,54
2	9868,1	0,6
1	10286,2	0,6

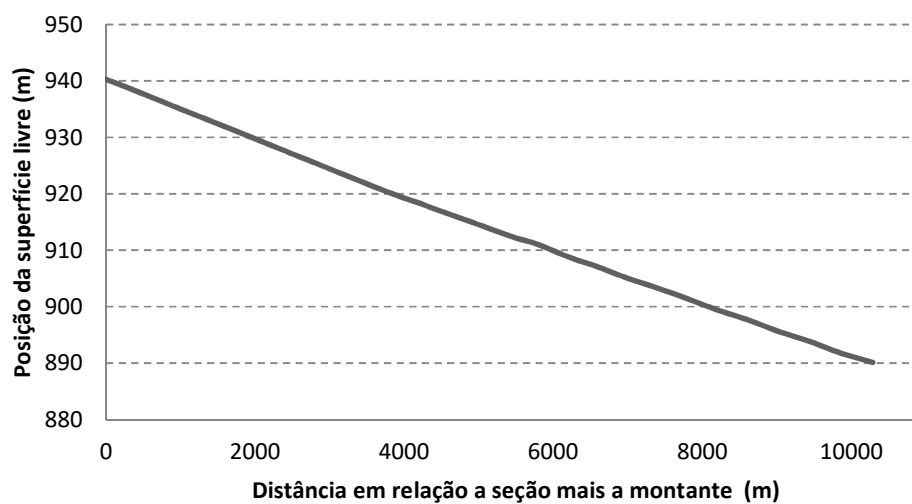


FIGURA 20 - VALORES DA POSIÇÃO DA SUPERFÍCIE LIVRE OBTIDOS PELO HEC-RAS NO CENÁRIO 3

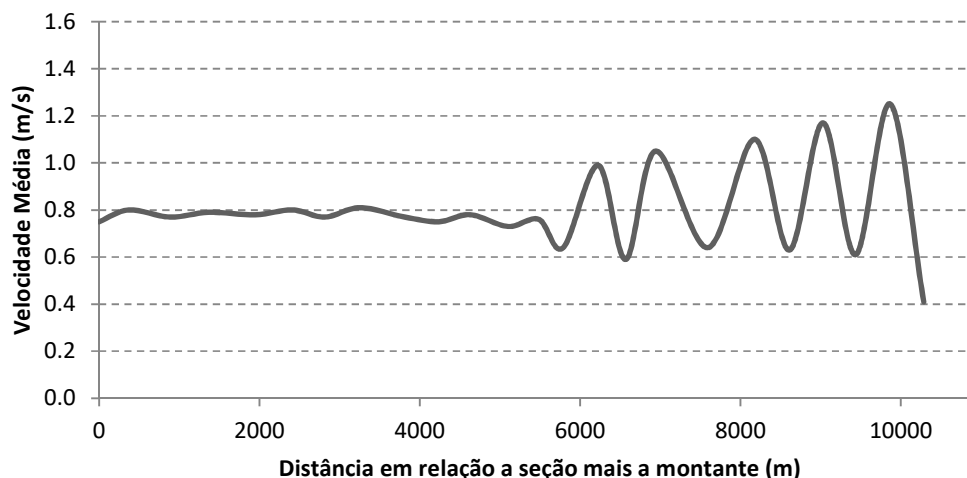


FIGURA 21 – VALORES DE VELOCIDADE MÉDIA OBTIDOS PELO HEC-RAS NO CENÁRIO 3

Em relação a posição da superfície livre no cenário 3, o seu comportamento apresentado foi o esperado, como nos demais cenários.

Os valores das velocidades médias apresentaram aproximadamente o mesmo desempenho que no cenário 1, ou seja, os resultados de velocidade mantiveram-se com pouca oscilação até a metade do trecho do rio. Nesse caso, as variações mais bruscas iniciaram-se a partir da seção 12 (6.225,5 metros).

Além disso, houve a diminuição dos valores de velocidade nas seções mais a montante, fato que pode estar ligado à diminuição da vazão de entrada na seção 24. Porém, mesmo havendo diminuição de alguns valores, as velocidades ainda são elevadas para o trecho simulado.

6.1.4 Cenário 4

Para o cenário 4, as modificações foram na condição de contorno na seção 24, transformando a vazão inicial em $0,6 \text{ m}^3/\text{s}$ e excluindo a contribuição de tributários. Os resultados da simulação deste cenário se encontram nas FIGURAS 21 e 22.

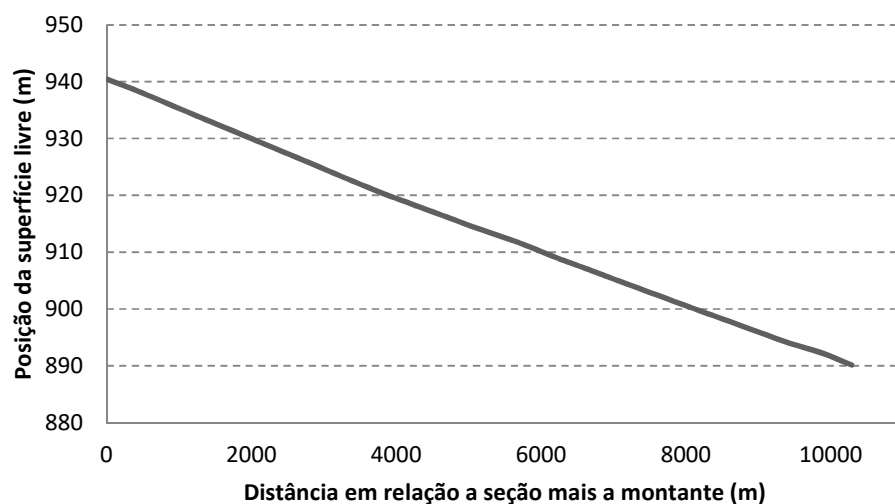


FIGURA 22 - VALORES DA POSIÇÃO DA SUPERFÍCIE LIVRE OBTIDOS PELO HEC-RAS NO CENÁRIO 4

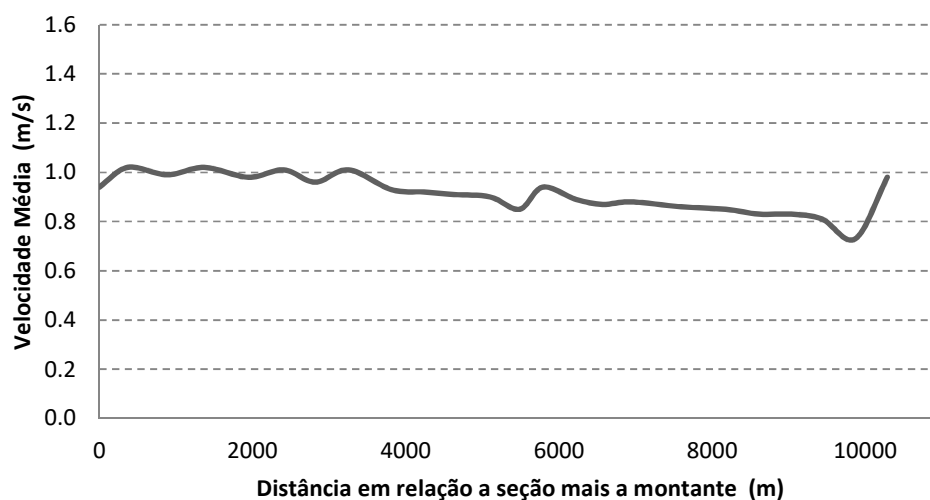


FIGURA 23 - VALORES DE VELOCIDADE MÉDIA OBTIDOS PELO HEC-RAS NO CENÁRIO 4

A variação da posição da superfície livre apresentou um desempenho esperado, com uma diminuição gradativa da elevação de montante a jusante, iniciando em 940,46 metros e terminando na última seção com 890,14 metros, condição de contorno imposta para esta seção.

Observando a FIGURA 22, é possível identificar valores de velocidades com poucas oscilações. O valor mais alto encontrado foi 1,02 m/s (Seção 23 e Seção 21) e o mais baixo 0,73 m/s (Seção 2). Porém, apesar deste cenário demonstrar resultados com pouca oscilação, as velocidades ainda podem ser

consideradas elevadas para o trecho do rio estudado, se comparadas aos valores apresentados por AZEVEDO NETO (1979).

6.1.5 Cenário 5

Para os dois próximos cenários, as distâncias entre as seções transversais foram multiplicadas por dez, porém mantendo o número de seções transversais. Como posição da superfície livre na seção mais a jusante foi empregada 890,31 metros. O resumo dos dados geométricos usados nestes cenários encontra-se na TABELA 10. Os valores de vazões médias para a condição de contorno a montante e para as vazões laterais foram as mesmas utilizadas no cenário 1. O fundo foi mantido uniforme por trecho, com coeficiente de rugosidade de Manning de 0,03 e coeficiente de contração e expansão de 0,1 e 0,3, respectivamente. O período de simulação foi de um ano, começando em 01 de janeiro de 2000 e terminando em 31 de dezembro de 2000. Os resultados encontrados para cada seção transversal estão presentes nas FIGURAS 23 e 24.

TABELA 10 - RESUMO DOS DADOS GEOMÉTRICO DO MODELO PARA OS DOIS ÚLTIMOS CENÁRIOS

Continua						
Seção Transversal	Bo (m)	B(m)	H(m)	Distância em relação a nascente	ΔX	z(m)
24	1	3	1	0	3714,6	941,02
23	1	3	1	3715	5160,5	939,09
22	1,08	3,04	1,04	8875	4818,3	936,4
21	1,18	3,09	1,09	13693	5791,2	933,9
20	1,28	3,14	1,14	19485	4614,3	930,89
19	1,39	3,2	1,2	24099	4068,3	928,49
18	1,49	3,24	1,24	28168	4380,9	926,37
17	1,57	3,29	1,29	32549	5553,1	924,09
16	1,66	3,33	1,33	38102	4278,2	921,21
15	1,77	3,39	1,39	42380	3902,1	919,24
14	1,86	3,43	1,43	46282	4739,2	917,44
13	1,94	3,47	1,47	51021	3831,8	915,26
12	2,03	3,52	1,52	54853	3034,7	913,5
11	2,11	3,56	1,56	57888	4367,5	912,11
10	2,17	3,59	1,59	62255	3440	910,1
9	2,26	3,63	1,63	65695	3732,3	908,51
8	2,33	3,67	1,67	69427	6495,9	906,8

Seção Transversal	Bo (m)	B(m)	H(m)	Distância em relação a nascente	ΔX	z(m)
7	2,41	3,7	1,7	75923	5845,5	903,81
6	2,54	3,77	1,77	81769	4339,8	901,12
5	2,66	3,83	1,83	86109	4193,01	899,17
4	2,75	3,87	1,87	90302	4054,89	897,28
3	2,83	3,92	1,92	94357	4324	895,46
2	2,91	3,96	1,96	98681	4181,6	893,51
1	3	4	2	102862	0	891,63

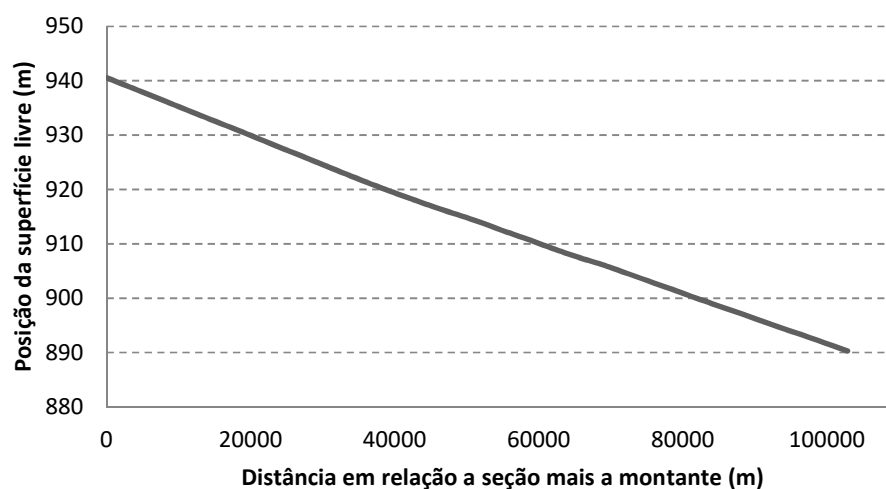


FIGURA 24 - VALORES DA POSIÇÃO DA SUPERFÍCIE LIVRE OBTIDOS PELO HEC-RAS NO CENÁRIO 5

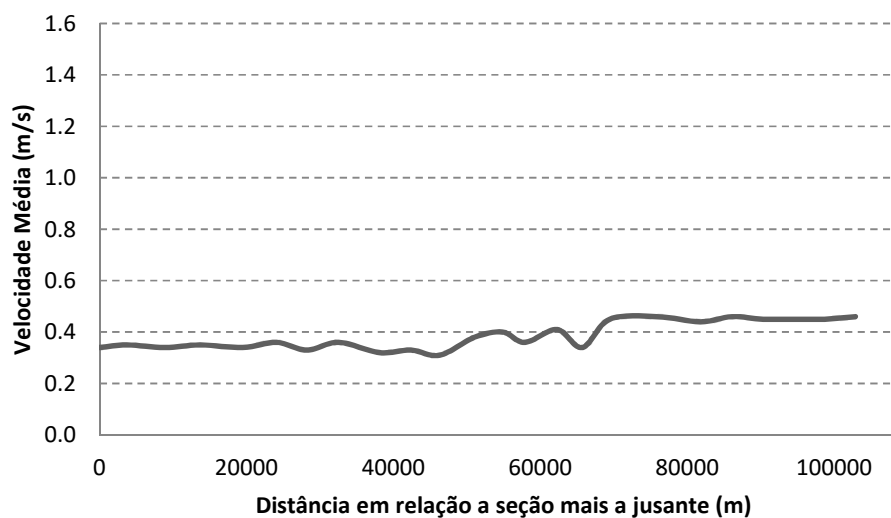


FIGURA 25 – VALORES DE VELOCIDADE MÉDIA OBTIDOS PELO HEC-RAS NO CENÁRIO 5

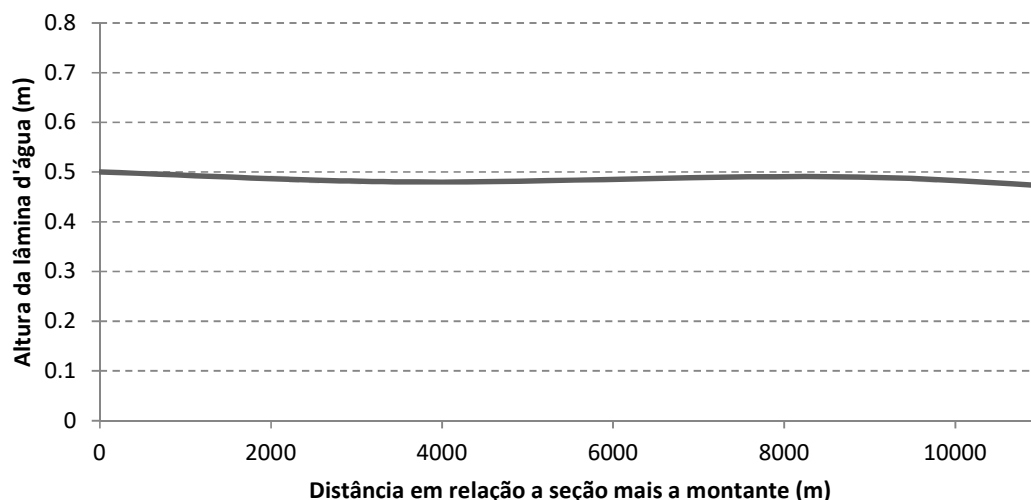


FIGURA 26 - VALORES DA ALTURA DA LÂMINA D'ÁGUA OBTIDOS PELO HEC-RAS NO CENÁRIO 5

Neste cenário, a posição da superfície livre manteve o seu comportamento (diminuição gradativa da elevação de montante a jusante), não sendo afetado pela ampliação da distância entre as seções transversais.

Em relação aos valores da velocidade média das seções transversais, observou-se uma mudança relevante dos resultados quando comparada com os cenários anteriores. Primeiramente, a faixa de valores (0,31 m/s a 0,46 m/s) em que as velocidades estão localizadas é mais próxima dos valores apresentados na TABELA 8. Outro fator que faz desse cenário mais interessante é que não houve grandes variações de velocidades entre uma seção e outra, mantendo um comportamento mais uniforme ao longo do rio.

No entanto, uma característica semelhante já apresentada nos outros cenários foi a instabilidade provocada pela entrada de vazões afluentes, que neste caso gerou variações mais suaves que nos demais casos, mas mesmo assim mudou o comportamento das velocidades a partir da seção 14 (46.281,5 metros).

Observando a FIGURA 26, podemos concluir que os valores de altura da lâmina d'água para este cenário também apresentam o mesmo comportamento dos valores de velocidade média, sendo esse um comportamento mais uniforme em comparação com os resultados obtidos no cenário 1.

6.1.6 Cenário 6

Para o cenário 6, as condições de contorno dos dados de escoamento foram prescrição de vazão de $1,02 \text{ m}^3/\text{s}$ na seção mais a montante (Seção 24), mantendo-se constante até o final do rio e posição da superfície livre de 890,31 metros na ultima seção (Seção 1). Após a simulação, obtiveram-se os valores presentes nas FIGURAS 25 e 26.

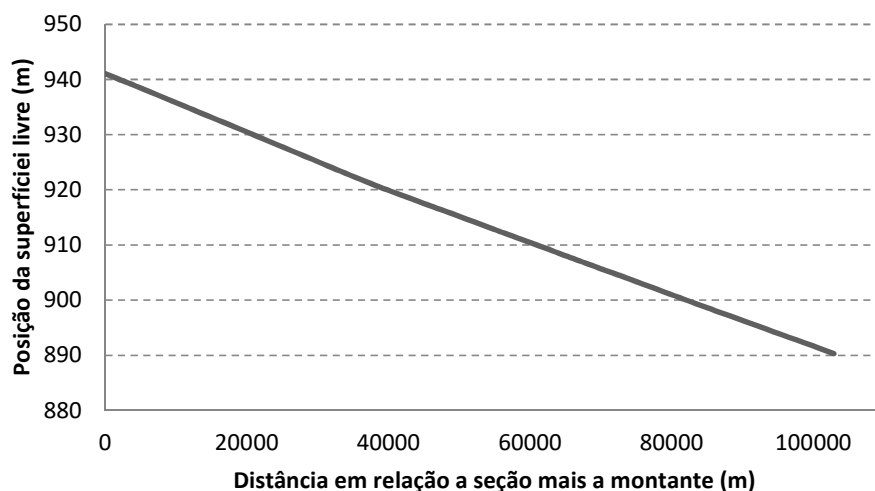


FIGURA 27 - VALORES DA POSIÇÃO DA SUPERFÍCIE LIVRE OBTIDOS PELO HEC-RAS NO CENÁRIO 6

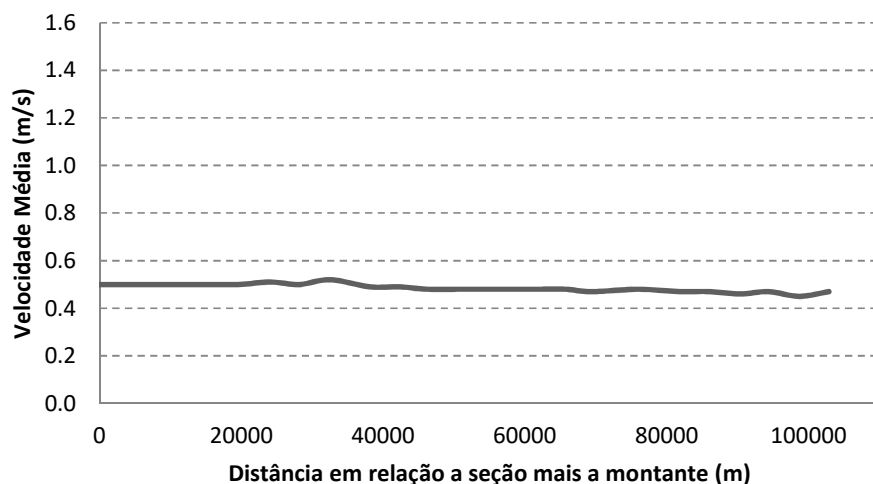


FIGURA 28 – VALORES DE VELOCIDADE MÉDIA OBTIDOS PELO HEC-RAS NO CENÁRIO 6

A posição da superfície livre não sofreu mudanças significativas, apresentando o desempenho semelhante aos demais cenários.

No caso das velocidades médias calculadas neste cenário, elas acompanharam o comportamento dos valores apresentados no cenário 5, ou seja, a diferença entre os picos máximos e mínimos de velocidade foram

contidos (0,07 m/s), uma vez que o maior valor de velocidade encontrado nesse cenário foi 0,52 m/s e o menor valor foi 0,45 m/s.

Além disso, como não houve a presença dos tributários, pode-se observar um desempenho diferente do calculado no cenário 5. Os valores de velocidade, de uma maneira geral, foram diminuindo no trecho do rio, atingindo valores mais baixos próximos à seção mais a jusante, ao contrário do que havia sido encontrado nas simulações anteriores.

Observado os resultados mostrados para os seis cenários, é possível afirmar que os valores da posição da superfície livre obtidos foram semelhantes. No entanto, os valores de velocidade média apresentaram oscilações em praticamente toda a extensão do rio, exceto os resultados obtidos nos dois últimos testes, nos quais a amplitude da variação foi satisfatória.

6.2 RESULTADO DO MODELO DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS: MASSA ACUMULADA NO LEITO

Uma vez que os resultados de posição da superfície livre e velocidade média de cada cenário foram obtidos pelo modelo, foi possível determinar a massa acumulada em cada seção transversal.

Os resultados do modelo de transporte de sedimentos são dados em massa acumulada no leito (toneladas) para o final de um ano de simulação, onde os valores positivos refletem a deposição de sedimento e os valores negativos são indicativos da erosão do leito na seção.

Os resultados são mostrados para cada classe de sedimento que compõem as curvas granulométricas e o sedimento total, que é a soma de todas as classes, informando assim a massa total transportada entre as seções transversais.

Para a avaliação do transporte dos sedimentos é considerada a massa total transportada e acumulada nas seções transversais no final de um ano de simulação, sendo esse o resultado mais relevante para a identificação dos locais onde ocorreram modificações no leito.

Foi realizada uma comparação qualitativa entre os resultados das seções transversais obtidos no cenário 1 de simulação no HEC-RAS e os

resultados alcançados pelo modelo de escoamento unidimensional para rede de canais apresentado no trabalho de CUNHA *et al.* (2015), uma vez que os valores usados neste cenário correspondem aos mesmos valores utilizados em CUNHA *et al.* (2015)

O cálculo do transporte de sedimento utilizada por CUNHA *et al.* (2015), foi feito resolvendo analiticamente da fórmula de Van Rijn, responsável pelo cálculo do transporte por arrasto ou pelo leito. Além disso, utilizando o d_{50} (os mesmos valores de d_{50} utilizados neste projeto) determinado para cada trecho do rio, foi possível definir os limites de sedimentação, erosão e zona de transição a partir dos valores de velocidade em cada trecho, por meio do diagrama de Hjulstrom, o que relaciona os limites superiores e inferiores de corrente necessários para movimentar e sedimentar uma partícula, respectivamente, e ainda o diâmetro médio do sedimento. Estes limites são apresentados na TABELA 11.

TABELA 11 - LIMITES DE VELOCIDADES ESTABELECIDOS A PARTIR DO DIAGRAMA DE HJULSTRÖM PARA CADA TRECHO DO RIO VERDE

Trecho	Erosão	Zona de transição	Sedimentação
1	$V > 1,2$ m/s	$1,2 < V < 0,45$ m/s	$V < 0,45$ m/s
2	$V > 0,66$ m/s	$0,66 < V < 0,28$ m/s	$V < 0,28$ m/s
3	$V > 0,64$ m/s	$0,64 < V < 0,20$ m/s	$V < 0,20$ m/s

FONTE: CUNHA *et al.*, 2015

6.2.1 Cenário 1

Os resultados de massa total de sedimentos ao longo do rio Verde são mostrados na FIGURA 27. É possível identificar, que nas seções mais a montante prevaleceu à sedimentação, enquanto que nas seções mais a jusante o processo predominante foi erosão.

Comparando os resultados dos processos (sedimentação e erosão) obtidos para esse cenário pelo HEC-RAS e os resultados apresentados por CUNHA *et al.* (2015) (TABELA 12) pode-se dizer, no geral, que os valores possuem certa semelhança, uma vez que para ambas as simulações, no início do rio prevalece à sedimentação e alguns locais de erosão coincidem nas duas simulações. No entanto, os resultados possuem algumas divergências e isso pode ser explicado pelo fato de que as velocidades apresentadas nos dois modelos não são as mesmas.

Segundo os limites de velocidades para erosão apresentados pela TABELA 11, conclui-se que no trecho 2 (velocidades maiores que 0,66 m/s) e 3 (velocidades maiores que 0,64 m/s) a erosão é dominante e por meio da FIGURA 28 é fácil perceber que nos pontos onde as velocidades foram maiores (seção 4 e seção 2) ocorreu o processo de erosão, e em velocidades mais baixas (seção 15) a deposição dos sedimentos foi favorecida, correlacionando totalmente os erros de velocidade média com os erros no transporte de sedimentos.

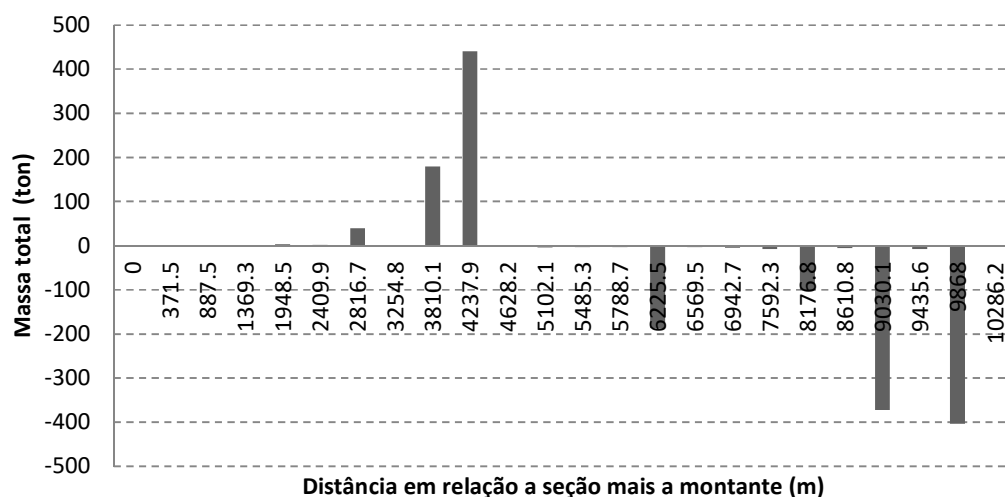


FIGURA 29 - RESULTADOS DE MASSA TOTAL ACUMULADA NO LEITO NO CENÁRIO 1.

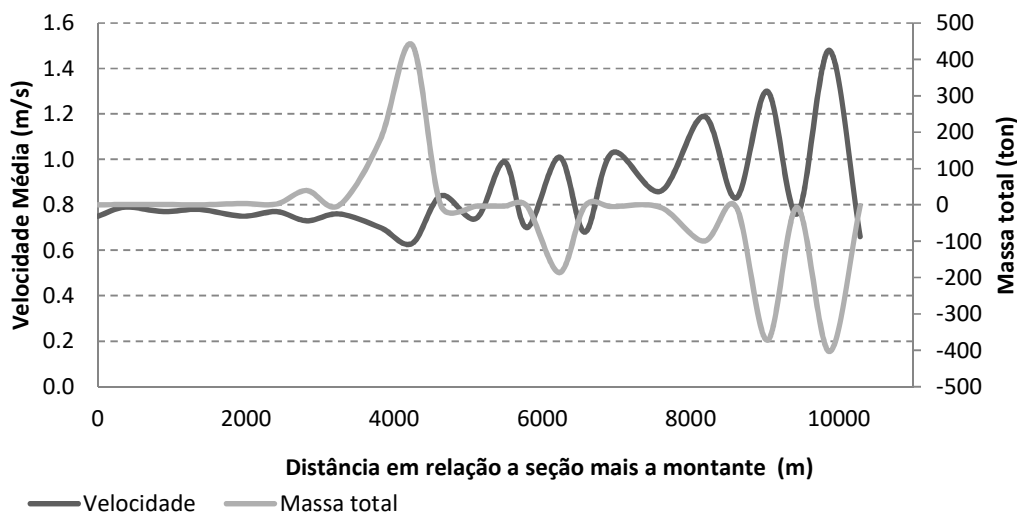


FIGURA 30 - VELOCIDADE MÉDIA DE CADA SEÇÃO TRANSVERSAL E A MASSA ACUMULADA NO LEITO PARA O CENÁRIO 1

TABELA 12- COMPARAÇÃO DOS PROCESSOS RESULTANTES DA SIMULAÇÃO NO HEC-RAS DO CENÁRIO 1 E DOS PROCESSOS APRESENTADOS POR CUNHA *et al.*, 2015

Seção Transversal	Massa Total (ton.)	Processo	Processo (CUNHA <i>et al.</i> , 2015)
24	0		
23	0,961	Sedimentação	Sedimentação
22	1,085	Sedimentação	Sedimentação
21	0,124	Sedimentação	Sedimentação
20	3,544	Sedimentação	Sedimentação
19	2,228	Sedimentação	Sedimentação
18	3935	Sedimentação	Sedimentação
17	-1,196	Erosão	Sedimentação
16	179,445	Sedimentação	Sedimentação
15	440,481	Sedimentação	Transição
14	-2,451	Erosão	Transição
13	-3,7	Erosão	Transição
12	-3,353	Erosão	Transição
11	-3,215	Erosão	Erosão
10	-186,495	Erosão	Erosão
9	-3,559	Erosão	Erosão
8	-4,843	Erosão	Erosão
7	-7,01	Erosão	Erosão
6	-99,676	Erosão	Transição
5	-5,549	Erosão	Transição
4	-372,454	Erosão	Erosão
3	-7,609	Erosão	Erosão
2	-403,457	Erosão	Transição
1	-2,662	Erosão	Sedimentação

O transporte de sedimentos dos cenários 2,3 e 4 também foi analisado. No entanto não apresentaram mudanças significativas quanto à ocorrência de erosão e sedimentação, pois apesar das seções transversais nas quais ocorreram esses processos não serem as mesmas, a erosão se mostrou bastante influenciável devido aos altos valores de velocidade média presentes em todos os cenários.

6.2.6 Cenário 6

Analisando o cenário 6 houve prevalência do processo de sedimentação praticamente ao longo de todo o Rio verde, como pode-se observar na FIGURA 29, já que a maioria dos dados e os valores de maior importância apresentados na TABELA 13 são positivos, caracterizando a deposição.

Observando a FIGURA 30 que mostra a relação entre as velocidades médias apresentadas em cada seção transversal e a massa de sedimento depositada ou erodida, pode-se perceber que o comportamento desta relação foi o esperado, uma vez que os processos de erosão não foram facilitados devido aos valores de velocidade não serem elevados. A seção 2 que possui a maior velocidade média (0,52 m/s) sendo, portanto o local de erosão mais acentuada.

Através da análise dos limites de velocidades para erosão, transição e sedimentação presentes na TABELA 11, foi possível observar que para este cenário, os valores de velocidade média em todos os trechos do rio se encontram na faixa de valores correspondentes à zona de transição, confirmando mais uma vez ausência de erosão neste cenário.

FIGURA 31 - RESULTADOS DA MASSA TOTAL ACUMULADA NO LEITO NO CENÁRIO 6

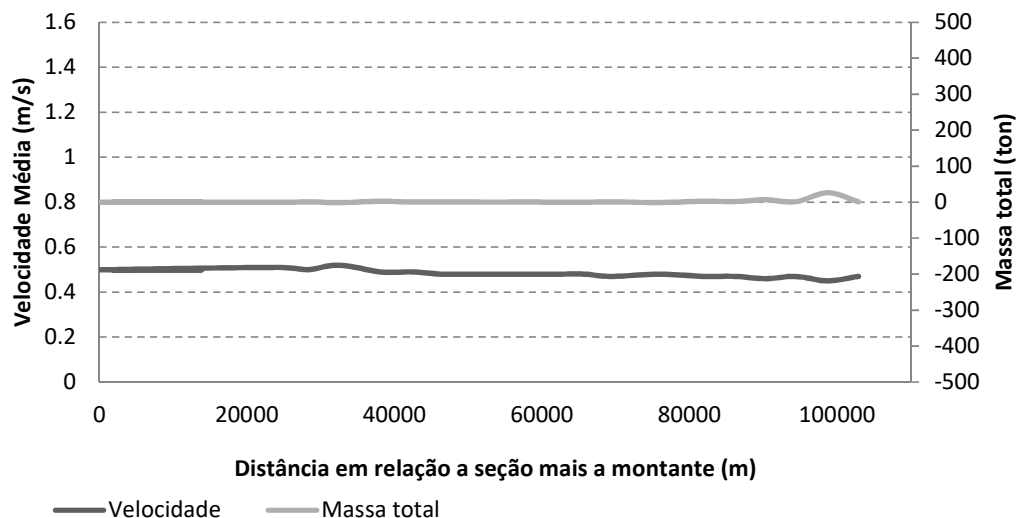


FIGURA 32 - VELOCIDADE MÉDIA DE CADA SEÇÃO TRANSVERSAL E A MASSA ACUMULADA NO LEITO PARA O CENÁRIO 6

TABELA 13 – MASSA TOTAL ACUMULADA E PROCESSOS RESULTANTES DA SIMULAÇÃO NO HEC-RAS DO CENÁRIO 6

Seção Transversal	Massa Total (ton.)	Processo
24	0	
23	-0,474	Erosão
22	-0,35	Erosão
21	-0,262	Erosão
20	-0,097	Erosão
19	-0,604	Erosão
18	0,827	Sedimentação
17	-1,246	Erosão
16	2,531	Sedimentação
15	0,414	Sedimentação
14	0,79	Sedimentação
13	0,351	Sedimentação
12	0,231	Sedimentação
11	0,785	Sedimentação
10	-0,487	Erosão
9	-0,265	Erosão
8	1,042	Sedimentação
7	-1,099	Erosão
6	2,655	Sedimentação
5	1,618	Sedimentação
4	6,743	Sedimentação
3	1,131	Sedimentação
2	26,218	Sedimentação
1	1,02	Sedimentação

7 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

O principal objetivo deste trabalho foi a determinação dos trechos no rio Verde favoráveis aos processos de erosão e sedimentação, por meio do modelo HEC-RAS. Assim, o modelo de transporte de sedimentos implementado determinou qualitativamente as seções sujeitas a sedimentação e erosão, através do cálculo da massa total acumulada em cada seção do rio Verde, assim como na avaliação da degradação ou aggradação do leito de um rio.

Através da análise dos resultados obtidos pelo HEC-RAS para diferentes cenários é possível observar que os locais que apresentaram valores elevados de velocidade longitudinal foram também os locais com maior movimentação do sedimento. Estabeleceu-se, então, uma relação entre os locais com valores elevados de velocidade e os principais pontos de erosão, refletindo exatamente os resultados de transporte de sedimentos obtidos no cenário 1.

Esta relação predominou em muitos cenários, onde as oscilações, principalmente para valores da velocidade longitudinal média da seção transversal do rio, se mostraram empecilhos para a quantificação real do transporte de sedimentos no rio estudado.

De acordo com USACE (2016), um dos responsáveis pela instabilidade do modelo é o espaçamento entre as seções transversais, sendo que os cenários que apresentaram velocidades médias mais uniformes foram aqueles em que as distâncias entre as seções transversais foram aumentadas, ou seja, se as seções transversais (de cálculo) estiverem muito próximas, os gradientes em relação à distância podem ser muito acentuados, calculados como declives mais acentuados do que deveriam ser, e isso pode, fazer com que a borda de ataque da onda de inundação seja mais inclinada, até o ponto no qual o modelo pode se tornar instável. (SHARKEY, 2014).

Recomenda-se, portanto para uma melhor precisão nos resultados do modelo, recomenda-se a obtenção de dados mais precisos de cotas de leito, através de levantamentos topobatimétricos, uma vez que a hidrodinâmica é fortemente dependente da batimetria e geometria do corpo d'água.

Outro ponto possível de aprofundamento é a distribuição de sedimentos ao longo do rio; no projeto considerou-se uma interpolação dessa distribuição

entre as seções nas quais foram realizadas as coletas de amostra de sedimentos. Seria interessante que, em mais seções, fosse realizado coletas de dados sedimentológicos, tornando a distribuição de sedimentos uma variável espacial.

Finalmente, recomenda-se que valores de velocidades sejam medidos em seções ao longo do rio Verde, para calibração e posterior validação do modelo hidrodinâmico. Com este modelo calibrado e validado, certamente a determinação das variáveis relacionadas ao transporte de sedimentos representariam de forma real o processo modelado.

Portanto, em uma visão geral, a definição das seções transversais onde os processos erosivos e de sedimentação ocorrem, a partir do tipo de sedimento de fundo e da velocidade média, pode ser considerada um instrumento relevante para a administração e controle de uso dos corpos d'água. Porém, é necessário lembrar que outros fatores (presença de meandros ou outros obstáculos) não considerados neste projeto, podem alterar significativamente a capacidade de erosão e deposição em um trecho de rio, sendo necessário mais estudos a respeito deste assunto.

8 REFERÊNCIAS

ANDREOLI, C. V.; CARNEIRO, C. ; GOBBI, E. ; CUNHA, C. L. N. **Eutrofização em Reservatórios: Gestão Preventiva**. 1ed. Curitiba: Editora UFPR, 2011.

AZEVEDO NETO, J.M, **Manual de hidráulica**, Vol. I e II, 7 a edição. Editora Edgard Blicher, SP, 1982. 2. Paschoal Silvestre, hidráulica, LTC Editora, RJ, 1979.

BRANCO, N. **Avaliação da produção de sedimentos de eventos chuvosos em uma pequena bacia hidrográfica rural de encosta**. Dissertação (Programa de Pós Graduação em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Santa Maria (UFSM-RS),1998.

CAMPOS, R. **Curso básico HEC-RAS**. Belo Horizonte, 2011.

CARVALHO, N. O.; **Hidrossedimentologia Prática**. 2ª Ed. Interciência. Rio de Janeiro, 2008.

CARVALHO, N. O.; FILIZOLA JÚNIOR, N. P. **Guias de Práticas Sedimentométricas**. Brasília – DF: ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, Superintendência de Estudos e Informações Hidrológicas, 2000.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia Fluvial**. O canal fluvial, Edgar Blücher, São Paulo – SP, 1981.

CUNGE, J. A.; HOLLY, Forrest M.; VERWEY, Adri. **Practical aspects of computational river hydraulics**. London: Pitman Advanced Publishing Program, 1980.

CUNHA, C. L. N; ALMEIDA, R. C.; SCHAFHAUSER, A. D.; MICHALAK, J.; PRADO, M. V. Critérios de Escolha para Localização de Captação Subsuperficial em Rios *in*: **Tecnologias Potenciais para o Saneamento**, 2ª edição. Curitiba, 2015.

FERNANDEZ P, MOURATO S, MOREIRA M. Comparação dos modelos HEC-RAS e LISFLOOD-FP na delimitação de zonas inundáveis. **Revista Recursos hídricos**, novembro, 2013.

GARCÍA, D. R. G. **Analisis y Evaluación del Transporte de Sedimentos em Cuencas Mediterraneas**. Aplicación a la Rambla del Albujón (Cartagena). Proyecto Fin de Carrera - Universidad Politécnica de Cartagena, 2012.

GOBBI, M. F. **Introdução à modelagem da Poluição Ambiental**. Apostila de Dispersão Ambiental de Poluentes. Universidade Federal do Paraná – PR.

GUIMARÃES, R. C. **Comparação entre duas metodologias de cálculo e propagação de vazões em coletores de redes de drenagem urbana: O método racional e equações de Saint – Venant**. Dissertação (Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, 2009.

REIS JUNIOR, D. S. **Desenvolvimento de um modelo 1D para Rede de Canais via Método do Elemento Móvel com Substituição Sucessiva**. Tese de mestrado em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, 1998.

LOUREIRO, D. D. T. **Métodos atuais e novas tecnologias para o monitoramento do transporte de sedimentos em rios: necessidade de dados e incertezas envolvidas**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de São Carlos, 2008.

MARCONDES, C. R. **Estudo de descarga sólida em suspensão nos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Sapucaí**. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Energia). Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI – MG), 2011.

MEDEIROS, P. A., CORDERO, A., **Transporte de Sedimentos em Suspensão em 3 Postos Sedimentométricos da Bacia do Rio Itajaí-Açú**, VIII Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos, 2008.

MENDES, P. A.; SANTOS, F. S.; DO CARMO, J. S. A. Escoamentos unidimensionais com superfície livre: Análise comparativa de métodos numéricos com ênfase no tratamento dos termos fonte. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, 2001. .

PAIVA, R. C. D. ; BRAVO, J. M. ; COLLISCHONN, W. . Modelo hidrodinâmico 1D para redes de canais baseado no esquema numérico de MacCormack. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, 2011.

PAIVA, J. B.D. (org); PAIVA, E. M. C. D. (org). Hidrologia Aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas. In: PAIVA, J. B.D. **Métodos de cálculo do transporte de sedimento em rios**. Porto Alegre: ABRH, 2001.

PARANHOS, R. M. **Avaliação de Metodologia para a estimativa de produção de sedimentos em uma pequena bacia rural de encosta**. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria (UFSM – RS), 2003.

PAZ, A. R.; COLLISCHONN, W. ; TUCCI, C. E. M. Simulação hidrológica de rios com grandes planícies de inundação. In: XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Campo Grande: **Anais...** do XVIII SBRH, 2009.

PORTUGUÊS, C. L. P. C. **Programação dos Modelos de Transporte Sedimentar Comparação de Soluções**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro, Aveiro/Portugal, 88f, 2008.

ROSMAN, P. C. C. **Referencial Técnico do SisBaHiA**. Rio de Janeiro: Coppe – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2011. 241 p.

ROVIRA, A; BATALLA, R. J. **Temporal distribution of suspended sediment transport in a Mediterranean basin: The Lower Tordera (NE SPAIN)**. Geomorphology, Lleida, V. 79, p-58-71, 2006.

SCAPIN, J.; PAIVA, J. B. D. **Caracterização do Transporte de sedimentos em um pequeno rio urbano em Santa Maria – RS**. 7º Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa – Silusba, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, Évora, Portugal, 2005.

SOUSA, M. M. **Comparação Entre Ferramentas de Modelagem Unidimensional e Quasi-Bidimensional, Permanente e Não-Permanente, em Planejamento e Projetos de Engenharia**. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil. Universidade Federal do Paraná, COPPE, 2010.

SPIEGELBERG, G. **Um modelo morfodinâmico: desenvolvimento e aplicação no reservatório da usina hidroelétrica de estreito no Rio Tocantins**. Dissertação de mestrado em Engenharia Oceânica. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, 2010.

TUCCI, C.E.M. (org) **Hidrologia: Ciência e aplicação**. Editora da Universidade Federal Rio Grande do Sul, ABRH – 4ª Ed. Porto Alegre – RS, 2007.

USACE. **HEC-RAS River Analysis System**: Hydraulic reference manual, version 4.1. Davis/CA: U. S. Army Corps of Engineers, 2010a.

USACE. **HEC-RAS River Analysis System**: User's manual, version 4.1. Davis/CA: U. S. Army Corps of Engineers, 2010b.

USACE. **HEC-RAS River Analysis System**: User's manual, version 5.0. Davis/CA: U. S. Army Corps of Engineers, 2016.

ANEXO 1 - RESULTADOS HIDRODINÂMICOS PARA OS SEIS CENÁRIOS

TABELA 14 - RESULTADOS HIDRODINÂMICOS DA SIMULAÇÃO DO HEC-RAS NO CENÁRIO 1

Estação do Rio	Vazão Total (m ³ /s)	Elevação da superfície livre (m)	V (m/s)
24	0,25	940,28	0,75
23	0,25	938,41	0,79
22	0,25	935,67	0,77
21	0,25	933,08	0,78
20	0,25	930,01	0,75
19	0,25	927,54	0,77
18	0,25	925,38	0,73
17	0,25	923,02	0,76
16	0,25	920,12	0,7
15	0,25	918,35	0,63
14	0,25	916,19	0,84
13	0,47	914,12	0,74
12	0,47	912,24	0,99
11	0,47	910,88	0,7
10	0,47	908,76	1,01
9	0,47	907,19	0,68
8	0,53	905,37	1,03
7	0,89	902,53	0,86
6	0,89	899,65	1,19
5	0,96	897,78	0,83
4	0,96	895,67	1,3
3	0,96	893,98	0,76
2	1	891,77	1,48
1	1	890,14	0,66

TABELA 15 - RESULTADOS HIDRODINÂMICOS DA SIMULAÇÃO DO HEC-RAS NO CENÁRIO 2

Continua			
Estação do Rio	Vazão Total (m ³ /s)	Elevação da Superfície (m)	V(m/s)
24	1,02	940,58	1,15
23	1,02	938,65	1,17
22	1,02	935,9	1,17
21	1,02	933,34	1,17
20	1,02	930,26	1,16
19	1,02	927,85	1,14

Conclusão			
Estação do Rio	Vazão Total (m ³ /s)	Elevação da Superfície (m)	V(m/s)
18	1,02	925,77	1,13
17	1,02	923,55	1,12
16	1,02	920,75	1,1
15	1,02	918,62	1,09
14	1,02	916,7	1,08
13	1,02	914,41	1,08
12	1,02	912,57	1,07
11	1,02	911,11	1,06
10	1,02	909,03	1,05
9	1,02	907,39	1,05
8	1,02	905,61	1,04
7	1,02	902,57	1,02
6	1,02	899,94	0,99
5	1,02	898,12	0,95
4	1,02	896,47	0,93
3	1,02	894,9	0,92
2	1,02	891,78	1,48
1	1,02	890,38	0,42

TABELA 16 - RESULTADOS HIDRODINÂMICOS DA SIMULAÇÃO DO HEC-RAS NO CENÁRIO 3

Continua			
Estação do Rio	Vazão Total (m ³ /s)	Elevação da Superfície (m)	V(m/s)
24	0,3	940,26	0,75
23	0,3	938,37	0,8
22	0,3	935,61	0,77
21	0,3	933,07	0,79
20	0,3	930,01	0,78
19	0,3	927,55	0,8
18	0,3	925,4	0,77
17	0,3	923,05	0,81
16	0,3	920,15	0,77
15	0,3	918,16	0,75
14	0,3	916,28	0,78
13	0,36	914,04	0,73
12	0,36	912,23	0,76
11	0,36	911,06	0,64
10	0,36	908,7	0,99
9	0,36	907,19	0,59

Estação do Rio	Vazão Total (m/s)	Elevação da Superfície (m)	conclusão
			V(m/s)
8	0,42	905,31	1,05
7	0,48	902,42	0,64
6	0,48	899,54	1,1
5	0,54	897,66	0,63
4	0,54	895,59	1,17
3	0,54	893,87	0,61
2	0,6	891,73	1,25
1	0,6	890,14	0,41

TABELA 17 - RESULTADOS HIDRODINÂMICOS DA SIMULAÇÃO DO HEC-RAS NO CENÁRIO 4

Seção Transversal	Vazão Total (m ³ /s)	Elevação da superfície livre (m)	V (m/s)
24	0,6	940,46	0,94
23	0,6	938,66	1,02
22	0,6	935,91	0,99
21	0,6	933,33	1,02
20	0,6	930,27	0,98
19	0,6	927,81	1,01
18	0,6	925,65	0,96
17	0,6	923,27	1,01
16	0,6	920,37	0,93
15	0,6	918,35	0,92
14	0,6	916,5	0,91
13	0,6	914,27	0,9
12	0,6	912,61	0,85
11	0,6	911,19	0,94
10	0,6	908,95	0,89
9	0,6	907,34	0,87
8	0,6	905,56	0,88
7	0,6	902,48	0,86
6	0,6	899,75	0,85
5	0,6	897,75	0,83
4	0,6	895,81	0,83
3	0,6	893,94	0,81
2	0,6	892,28	0,73
1	0,6	890,14	0,98

TABELA 18 - RESULTADOS HIDRODINÂMICOS DA SIMULAÇÃO DO HEC-RAS NO CENÁRIO 5

Estação do Rio	Vazão Total (m ³ /s)	Elevação da Superfície (m)	Velocidade media (m/s)
24	0,25	940,52	0,34
23	0,25	938,57	0,35
22	0,25	935,84	0,34
21	0,25	933,26	0,35
20	0,25	930,21	0,34
19	0,25	927,71	0,36
18	0,25	925,56	0,33
17	0,25	923,19	0,36
16	0,25	920,3	0,32
15	0,25	918,23	0,33
14	0,25	916,41	0,31
13	0,48	914,36	0,38
12	0,48	912,5	0,4
11	0,48	911,11	0,36
10	0,48	909	0,41
9	0,48	907,44	0,34
8	0,89	905,89	0,45
7	0,89	902,83	0,46
6	0,89	900,07	0,44
5	0,96	898,07	0,46
4	0,96	896,13	0,45
3	0,96	894,24	0,45
2	1	892,27	0,45
1	1	890,31	0,46

TABELA 19 - RESULTADOS HIDRODINÂMICOS DA SIMULAÇÃO DO HEC-RAS NO CENÁRIO 6

Continua			
Estação do Rio	Vazão Total (m ³ /s)	Elevação da Superfície (m)	Velocidade media (m/s)
24	1,02	941,04	0,5
23	1,02	939,1	0,5
22	1,02	936,36	0,5
21	1,02	933,8	0,5
20	1,02	930,73	0,5
19	1,02	928,24	0,51
18	1,02	926,08	0,5
17	1,02	923,71	0,52
16	1,02	920,81	0,49
15	1,02	918,76	0,49
14	1,02	916,91	0,48

Conclusão			
Estação do Rio	Vazão Total (m ³ /s)	Elevação da Superfície (m)	Velocidade media (m/s)
13	1,02	914,67	0,48
12	1,02	912,84	0,48
11	1,02	911,41	0,48
10	1,02	909,35	0,48
9	1,02	907,7	0,48
8	1,02	905,95	0,47
7	1,02	902,9	0,48
6	1,02	900,13	0,47
5	1,02	898,09	0,47
4	1,02	896,16	0,46
3	1,02	894,26	0,47
2	1,02	892,29	0,45
1	1,02	890,31	0,47