

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

JOÃO FRANCISCO VALENTINI

**ESTIMATIVA DA DESCARGA SÓLIDA DE SEDIMENTOS EM UM TRECHO DO
RIO CAÍ - RS**

**CAXIAS DO SUL
2019**

JOÃO FRANCISCO VALENTINI

**ESTIMATIVA DA DESCARGA SÓLIDA DE SEDIMENTOS EM UM TRECHO DO
RIO CAÍ - RS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia Civil da Universidade de Caxias do Sul como requisito à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Taison Anderson Bortolin

CAXIAS DO SUL

2019

JOÃO FRANCISCO VALENTINI

**ESTIMATIVA DA DESCARGA SÓLIDA DE SEDIMENTOS EM UM TRECHO DO
RIO CAÍ - RS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia Civil da Universidade de Caxias do Sul como requisito à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em 01/07/2019

Banca Examinadora

Prof. Dr. Taison Anderson Bortolin
Universidade de Caxias do Sul - UCS

Prof. Juliano Rodrigues Gimenez
Universidade de Caxias do Sul - UCS

Profa. Dra. Gisele Cemin
Universidade de Caxias do Sul – UCS

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, João e Joceli, e a minha família pelo apoio e confiança.

Ao meu orientador atencioso Taison Bortolin que me instigou a buscar sempre aperfeiçoar ainda mais o trabalho.

Agradeço também ao Instituto de Saneamento Ambiental da Universidade de Caxias do Sul que proporcionou o ambiente para a realização da pesquisa.

Ao 5º Batalhão de Bombeiro Militar de Caxias do Sul pelo apoio e suporte nas coletas em campo.

"The mountains are calling and I must go."

John Muir

RESUMO

O ciclo hidrossedimentológico abrange diversas etapas que vão desde a formação, até a erosão, transporte e eventualmente deposição de sedimentos tendo a água como principal agente de transporte. Existem diversos fatores que influenciam no ciclo, sendo as ações antrópicas as que causam o maior impacto, especialmente na erosão dos solos. No Brasil estão dispostas pelo território diversas estações de monitoramento de sedimentos, mas ainda assim são necessárias medições pontuais em ordem para se obter dados mais específicos. Para auxiliar na previsão do comportamento dos corpos hídricos existem ferramentas que modelam etapas do ciclo hidrossedimentológico, como é o caso do software HEC-RAS. O objetivo do trabalho foi estimar a descarga sólida total e identificar as zonas de deposição de sedimentos de um trecho do Rio Caí, para isso foram feitas coletas de amostras de materiais em campo tanto de sedimentos em suspensão e de leito. Com essas informações, foi feita uma simulação utilizando três diferentes funções de transporte de sedimentos, Yang, Ackers-White e Meyer-Peter e Muller, com o auxílio do software HEC-RAS. As análises granulométricas apontaram que o leito do rio se trata de um leito formado predominantemente por pedregulhos. Os resultados da modelagem com o software apontaram que a função de Ackers-White reproduziu melhor os padrões de deposição conforme indicado pelo levantamento topobatimétrico previamente disponível. A função de Yang apresentou uma maior erosão do leito do que as demais, especialmente no centro do canal. Meyer-Peter e Muller foi a função com os resultados que mais destoaram das demais indicando uma zona com deposição de mais de 3 m. A modelagem dos sedimentos suspensos demonstrou uma semelhança muito maior dos resultados entre os métodos do que a descarga de leito. Para trabalhos futuros, sugere-se que novos levantamentos em campo sejam feitos, como um novo levantamento topobatimétrico e novas coletas de sedimentos suspensos.

Palavras-chave: hidrossedimentologia, modelagem hidrológica, transporte de sedimentos

ABSTRACT

The hydrosedimentological cycle encompasses several stages ranging from formation, erosion, transport and eventually deposition of sediments with water as the main transport agent. There are several factors that influence the cycle, being the anthropic actions that cause the greatest impact, especially in soil erosion. In Brazil, several sediment monitoring stations are set up in the territory, but still precise measurements are needed in order to obtain more specific data. To help predict the behavior of water bodies, there are tools that model stages of the hydrosedimentological cycle, such as the HEC-RAS software. The objective of this work was to estimate the total solid discharge and to identify the sediment deposition zones of a section of the Caí River, for which samples of field materials were collected from both suspended and bed sediments. With this information, a simulation was performed using three different sediment transport functions, Yang, Ackers-White and Meyer-Peter and Muller, with the help of HEC-RAS software. The granulometric analysis indicated that the river bed is a bed formed predominantly by gravel. The software modeling results showed that the Ackers-White function best reproduced the deposition patterns as indicated by the previously available topo-bathymetric survey. The Yang function showed a greater erosion of the bed than the others, especially in the center of the channel. Meyer-Peter and Muller were the function with the results that disagree with the others indicating a zone with deposition of more than 3 m. The modeling of suspended sediments demonstrated a much greater similarity of results between methods than bed discharge. For future work, it is suggested that new field surveys be made, such as a new topo-bathymetric survey and new collections of suspended sediments.

Keywords: hydrosedimentology, hydrological modeling, sediment transport

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Resumo dos métodos de medição de sedimentos	25
Quadro 2 - Métodos de análise de sedimentos	31
Quadro 3 – Diferenças, vantagens e desvantagens entre os diferentes tipos de fluxo disponíveis no modelo HEC-RAS.....	41

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Etapas do ciclo hidrossedimentológico.	16
Figura 2 – Etapas do ciclo hidrológico por zona de ocorrência	17
Figura 3 – Processos erosivos, a) por splash, b) laminar, c) sulcos e d) escoamento concentrado.....	18
Figura 4 – Tipos de transporte de sedimentos	19
Figura 5 - Zonas de deposição de sedimentos.....	20
Figura 6 – Zonas de deposição de sedimentos vistas de cima	21
Figura 7 – Classificação dos sedimentos quanto ao diâmetro de acordo com diferentes entidades.....	22
Figura 8 – Diagrama textural, mostrando argila, silte e areia e as classes típicas de solo.....	23
Figura 9 – Exemplo de distribuição granulométrica de uma amostra de sedimentos com os diâmetros notáveis.....	24
Figura 10 – Distribuição da velocidade (a), concentração de sedimento (b) e descarga sólida (c), bem como seus perfis (d, e, f) respectivamente.	27
Figura 11 - Exemplo de amostragem pelo método de igual incremento de largura. .	28
Figura 12 - Exemplo de amostragem pelo método de igual incremento de descarga.	29
Figura 13 - Guincho hidrométrico, equipamento auxiliar da medição.....	30
Figura 14 – Hidrograma em fluxo quasi-não-permanente (a) e não-permanente (b)	41
Figura 15 – Limite de erodibilidade do canal.....	42
Figura 16 – Fluxograma do método de trabalho.....	44
Figura 17 – Localização da bacia hidrográfica do trecho em estudo.....	45
Figura 18 – Levantamento topobatimétrico	48
Figura 19 – Atividades de coleta de dados em campo.....	49
Figura 20 – Amostrador DH-48 de sedimentos suspensos	50
Figura 21 – Amostrador de material de leito Van Veen.....	51
Figura 22 – ADP Hydro Surveyor M9	51
Figura 23 – Divisão dos incrementos diários de vazão em incrementos menores	53
Figura 24 – Tipos de solo	55
Figura 25 – Uso e ocupação do solo.....	57
Figura 26 – Perda de solos	58

Figura 27 – Curva granulométrica dos pontos 1 (a), 2 (b) e 3 (c)	62
Figura 28 – Resumo das amostras de sedimentos de leito.....	63
Figura 29 – Distribuição de velocidades no canal	64
Figura 30 – Descarga sólida de leito da estaca 0.....	65
Figura 31 - Descarga sólida de leito da estaca 6.	66
Figura 32 - Descarga sólida de leito da estaca 16.	66
Figura 33 - Descarga sólida de leito da estaca 28.	67
Figura 34 - Descarga sólida de leito da estaca 32.	67
Figura 35 - Descarga sólida de leito da estaca 38+4,756.	68
Figura 36 – Seção transversal estaca 0.....	71
Figura 37 - Seção transversal estaca 6.....	71
Figura 38 - Seção transversal estaca 16.....	72
Figura 39 - Seção transversal estaca 28.....	72
Figura 40 - Seção transversal estaca 32.....	73
Figura 41 - Seção transversal estaca 34+4,576.....	73
Figura 42 – Leito do trecho interpolado.....	75
Figura 43 – Leito interpolado (a) e zonas de deposição e erosão pelo método Ackers-White (b).....	76
Figura 44 – Leito interpolado (a) e zonas de deposição e erosão pelo método Yang (b).....	77
Figura 45 – Leito interpolado (a) e zonas de deposição e erosão pelo método Meyer-Peter & Muller (b).	78
Figura 46 – Descarga de sólidos suspensos ao longo do tempo	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resumo dos métodos de cálculo para descarga de leito	34
Tabela 2 – Incrementos computacionais	53
Tabela 3 – Tipos de solo e suas extensões	56
Tabela 4 – Uso do Solo	56
Tabela 5 – Resumo perda de solos.....	58
Tabela 6 – Resultados material suspenso	59
Tabela 7 – Resumo da concentração sedimentos suspensos	60
Tabela 8 – Resumo do ensaio granulométrico do material de leito.....	61

SUMÁRIO

1	Introdução	13
1.1	Objetivo geral	14
1.2	Objetivos específicos.....	14
2	Revisão Bibliográfica	15
2.1	Ciclo hidrossedimentológico.....	15
2.2	Sedimentologia.....	17
2.2.1	Produção, transporte e deposição de sedimentos	17
2.2.2	Caracterização dos sedimentos	22
2.2.3	Monitoramento de sedimentos	24
2.2.3.1	Métodos de amostragem para material em suspensão.....	27
2.2.3.2	Métodos de amostragem para material do leito	29
2.2.3.3	Métodos de Análise	30
2.3	Modelagem hidrossedimentológica	31
2.3.1	Modelos da perda de solo	31
2.3.2	Modelos de determinação de descarga sólida	32
2.3.2.1	Meyer-Peter & Muller.....	34
2.3.2.2	Ackers & White (1973).....	35
2.3.2.3	Yang (areias) (1973).....	37
2.3.2.4	Yang (pedregulhos)	38
2.4	Modelo HEC-RAS.....	39
2.4.1	Geometria do corpo hídrico	40
2.4.2	Quasi-unsteady flow analysis	40
2.4.3	Análise sedimentométrica	41
3	Material e métodos	44
3.1	Área de Estudo.....	44
3.1.1	Localização	44
3.1.2	Tipo, Uso e Ocupação do Solo	45
3.2	Estimativa perda de solos	46

3.2.1	Fator R.....	46
3.2.2	Fator K.....	46
3.2.3	Fatores C e P.....	47
3.2.4	Fatores L e S.....	47
3.3	Coleta e análise de dados	47
3.3.1	Vazão	47
3.3.2	Levantamento topobatimétrico	47
3.3.3	Coleta de sedimentos suspensos e de leito	49
3.3.4	Análises de laboratório	51
3.4	Modelagem hidrossedimentológica	52
3.4.1	Geometria do rio.....	52
3.4.2	Séries históricas de vazão.....	52
3.4.3	Dados sedimentométricos.....	53
4	Resultados e Discussão	55
4.1	Tipos e usos de solo.....	55
4.1.1	Tipos de solo	55
4.1.2	Uso e ocupação do solo	56
4.2	Perda de solos.....	57
4.3	Ensaio de sedimentos suspensos e de leito	59
4.3.1	Concentração de sedimentos suspensos.....	59
4.3.2	Granulometria dos sedimentos do leito	60
4.4	Modelagem hidrossedimentológica	64
4.4.1	Perfil de velocidades.....	64
4.4.2	Descarga sólida de leito	65
4.4.3	Mudanças no leito	70
4.4.3.1	Seções transversais	70
4.4.3.2	Zonas de deposição e erosão	75
4.4.4	Sedimentos suspensos	79
5	Considerações finais	80
	Referências bibliográficas.....	82

1 INTRODUÇÃO

O estudo hidrossedimentológico é um processo complexo que vem ganhando bastante atenção nos últimos tempos. As etapas que o compõe, são consideradas estratégicas para o desenvolvimento de um país uma vez que abordam questões como produção e transporte de sedimentos causando grande impacto em rios e reservatórios, podendo gerar prejuízos sociais, econômicos e ambientais (ABRH, 2010).

O transporte e a deposição de sedimentos são alguns dos fenômenos que fazem parte de um ciclo de seis etapas, que associado aos esforços da água, é chamado de ciclo hidrossedimentológico (TUCCI, 2009). Este ciclo é aberto e linear, ou seja, não ocorre de forma contínua e o sedimento uma vez que sofre a deposição, não retornará ao seu ponto de origem.

O ciclo hidrossedimentológico ocorre de forma natural e gradativa e está condicionado a uma série de fatores, como tipo de solo, declividade do terreno e também a ação antrópica, a qual pode acelerar e agravar significativamente a etapa do ciclo chamada de erosão. Como consequências da alta produção e transporte de sedimentos pode ocorrer o assoreamento de reservatórios e rios, causando problemas no armazenamento, grandes transtornos na navegação e em alguns casos intensificando as inundações, gerando prejuízos aos municípios afetados.

Existem diferentes ferramentas que auxiliam na estimativa e na previsão da geração de sedimentos, bem como seu transporte e deposição de em um corpo hídrico. Uma das ferramentas disponíveis para a análise do processo hidrossedimentológico é o software desenvolvido pelo Corpo de Engenheiros do Exército Americano HEC-RAS (*Hydrologic Engineering Center's - River Analysis System*), o qual já foi utilizado com êxito em aplicações como mudanças no leito e deposição em barragens (DYSARZ et al., 2017; HABIB-UR-REHMAN et al., 2018).

Existem diversas funções de transporte de sedimentos citadas em literatura com resultados bastante satisfatórios o que leva a um grau de incerteza do operador na escolha da mais adequada. O próprio software HEC-RAS possui algumas das funções mais utilizadas, possibilitando que o operador realize diferentes simulações em ordem para comparar resultados e assim identificar qual melhor se adequa à sua área de estudo (CARVALHO, 2008).

A modelagem hidrossedimentológica visa compreender e prever as etapas do ciclo, o que permite identificar zonas de risco ambiental, como o assoreamento de rios e reservatórios, e também identificar zonas de extração de sedimentos de leito de forma sustentável para que possam ser utilizados em obras de construção civil.

Nesse contexto, o objetivo do trabalho é estimar a descarga sólida em um trecho do rio Caí, no município de São Sebastião do Caí, RS e identificar onde ocorrem as principais mudanças no leito. A importância deste estudo é subsidiar e auxiliar de forma técnica a tomada de decisões no que tange o assoreamento do rio e por consequência o impacto nas enchentes e a exploração de material do leito rio, de forma que a mesma seja feita de forma responsável e sustentável. A escolha deste trecho em particular se dá pela capacidade da bacia de produzir sedimentos no trecho, formando bancos de deposição de materiais grosseiros como cascalhos e areias.

1.1 OBJETIVO GERAL

Estimar a descarga sólida de leito e de sedimentos suspensos e identificar as zonas de deposição e erosão em um trecho do rio Caí.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos são:

- a) Caracterizar a bacia hidrográfica do trecho do rio em estudo em relação aos parâmetros fisiográficos, uso do solo e estimativa de perda de solo com o uso de geoprocessamento;
- b) Realizar análises sedimentométricas com dados coletados in loco;
- c) Modelar a descarga de sedimentos no trecho com o uso do software HEC-RAS;
- d) Testar diferentes funções de transporte e deposição de sedimentos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CICLO HIDROSSEDIMENTOLÓGICO

O ciclo hidrológico compreende o movimento da água através da atmosfera e da superfície terrestre, levando em consideração seus rios, lagos, reservatórios subterrâneos e oceanos. A nível global, este ciclo é fechado e o balanço final sempre é zero (COLLISCHONN; TASSI, 2011). O ciclo da água compreende seis etapas, sendo elas precipitação, interceptação, infiltração, escoamento superficial, evaporação e transpiração (TUCCI, 2009).

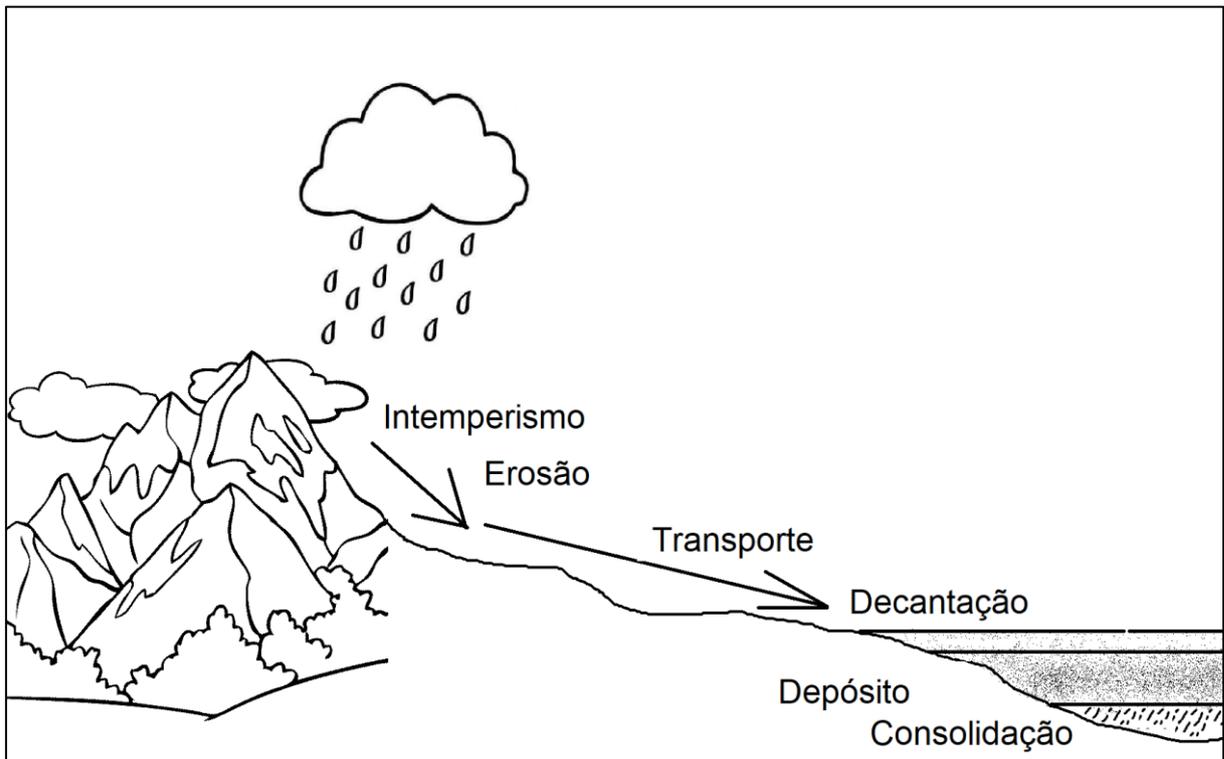
A água em seu ciclo, especialmente no escoamento superficial, tem por muitas vezes a capacidade de transportar partículas sólidas oriundas de rochas e solos criando um ciclo paralelo ao hidrológico o qual é denominado hidrossedimentológico. Este é considerado um ciclo aberto, uma vez que no fim do ciclo o sedimento não tem a capacidade de voltar ao meio do qual ele provém.

Segundo Tucci (2009) o ciclo hidrossedimentológico (Figura 1) é dividido em seis etapas:

- a) desagregação: esta etapa é referente a produção dos sedimentos, isto é, o desprendimento de partículas sólidas menores do meio o qual elas fazem parte. Esse processo pode ocorrer de forma mecânica, por variação de temperatura, congelamento da água nos poros, por reações químicas ou até mesmo pela ação de raízes da cobertura vegetal, todavia os maiores agentes nesse processo são a ação antrópica e o impacto das gotas de chuva diretamente no solo. Essas partículas ficam, então, suscetíveis ao transporte;
- b) erosão: é o deslocamento propriamente dito das partículas sólidas quando sob o efeito do escoamento. O deslocamento só ocorre quando as forças hidrodinâmicas são superiores a resistência apresentada pela partícula;
- c) transporte: o transporte do material erodido pode ocorrer de diversas maneiras. As partículas mais pesadas ficam ao fundo, tendo seu transporte por deslizamento ou eventualmente por saltos enquanto as partículas menores ficam suspensas na água;

- d) decantação: eventualmente quando a água encontrar um meio não turbulento, essas partículas em suspensão, por ação da gravidade, são capazes de vencer a resistência do meio fluido e se deslocar para o fundo;
- e) depósito: quando a partícula finalmente chega ao fundo e sofre uma parada total;
- f) consolidação: quando diversas partículas ficam acumuladas ao fundo e ocorre a compactação do depósito sob o efeito do peso próprio do mesmo.

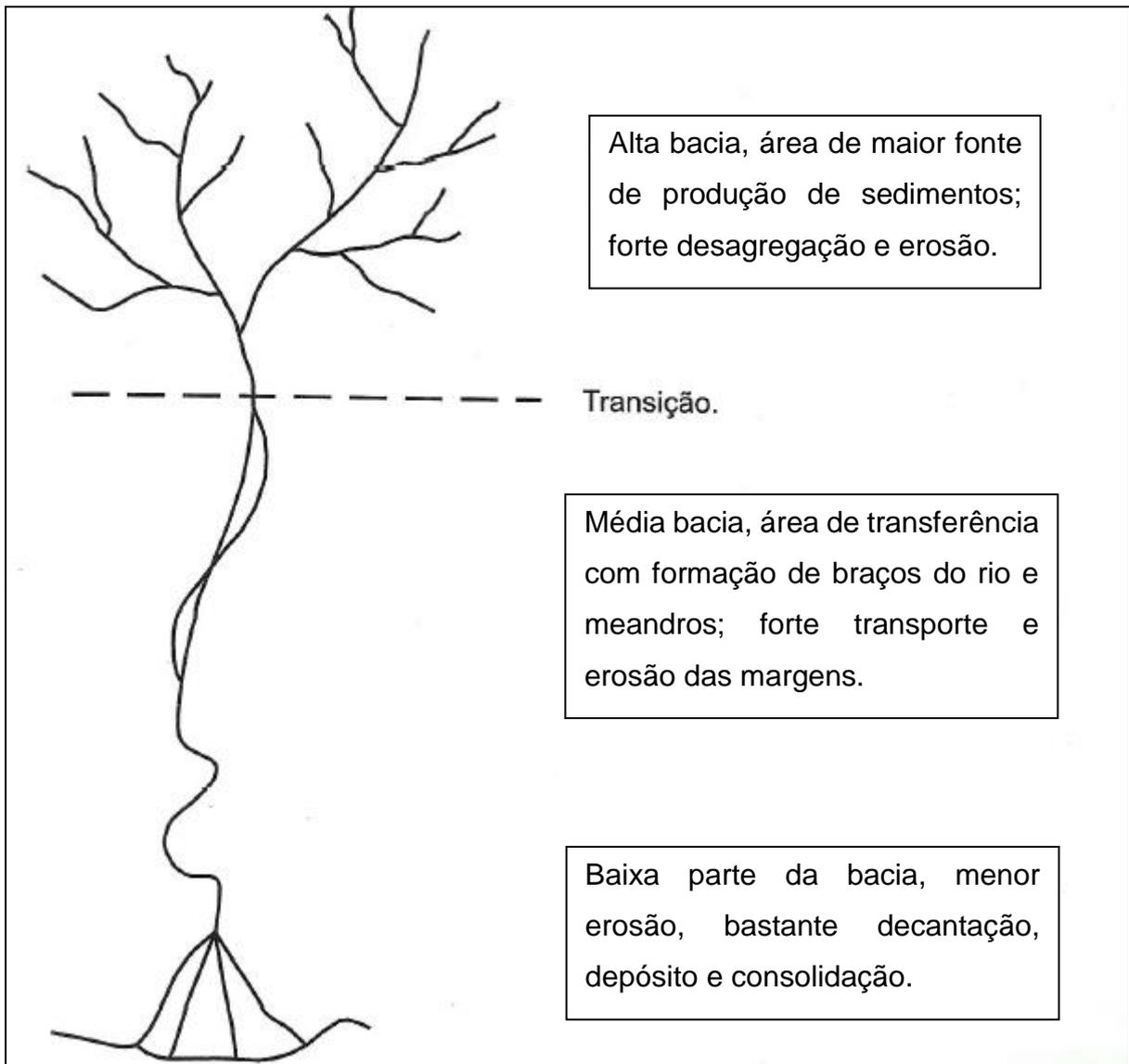
Figura 1 – Etapas do ciclo hidrossedimentológico



Fonte: Autor, 2019

Essas etapas do ciclo não se dão de forma igual e homogênea ao longo de toda a bacia, havendo principalmente três zonas: alta, média e baixa bacia. Na alta bacia predomina a produção e erosão de sedimentos, já na média bacia o transporte é a etapa predominante e, por fim, na baixa bacia, local com as velocidades mais baixas do fluxo, observa-se uma maior deposição (Figura 2).

Figura 2 – Etapas do ciclo hidrológico por zona de ocorrência



Fonte: Carvalho, 2008

2.2 SEDIMENTOLOGIA

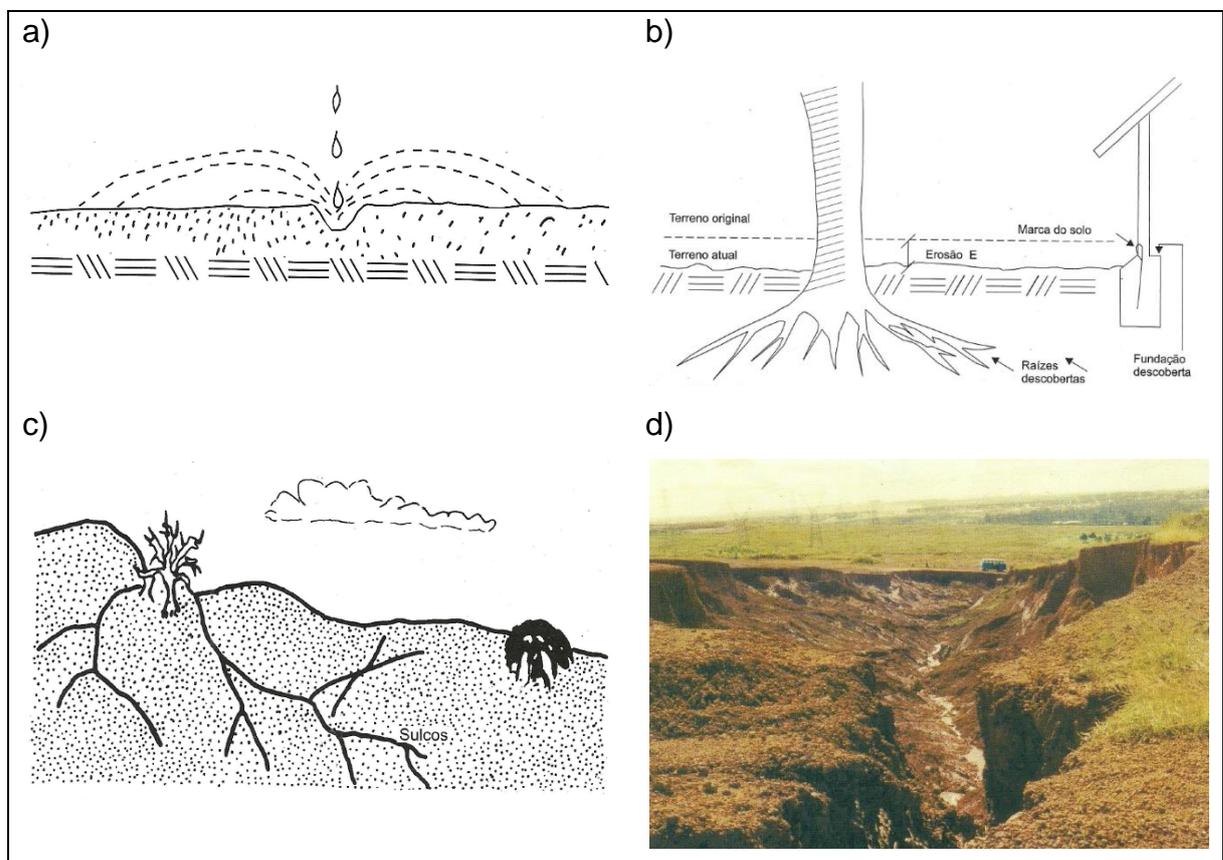
2.2.1 Produção, transporte e deposição de sedimentos

A erosão, relacionada basicamente à produção dos sedimentos, é um processo natural que molda o relevo até chegar às condições atuais. Hoje se sabe que as ações antrópicas são responsáveis por acelerar processos erosivos (WEILL; SPAROVEK, 2008), causando grandes impactos como a perda de fertilidade do solo (BAPTISTA et al., 2015), assoreamento de rios (SOUSA et al., 2013), diminuição na capacidade de reservatórios (QUEIROZ et al., 2015) e contaminação da água (CHAGAS et al., 2014).

Carvalho (2008) classifica os processos erosivos (Figura 3) relacionados à água da seguinte forma:

- a) erosão por *splash*: ocorre devido ao impacto das gotas de chuva no solo exposto, gerando a desagregação do mesmo;
- b) erosão laminar: é aquela que ocorre na camada mais superficial do solo proveniente de um escoamento superficial de forma uniforme ao longo de toda a extensão dessa camada;
- c) erosão em sulcos: é quando a água já é capaz de criar caminhos preferenciais de escoamento no solo, gerando sulcos na camada superficial do mesmo e pode ocorrer mesmo quando há presença de cobertura vegetal; e por fim,
- d) erosão por escoamento concentrado: que é quando ocorre a formação de voçorocas. A água já desgastou tanto o solo que passam a ocorrer deslizamentos e desabamentos.

Figura 3 – Processos erosivos, a) por splash, b) laminar, c) sulcos e d) escoamento concentrado



Fonte: Carvalho, 2008

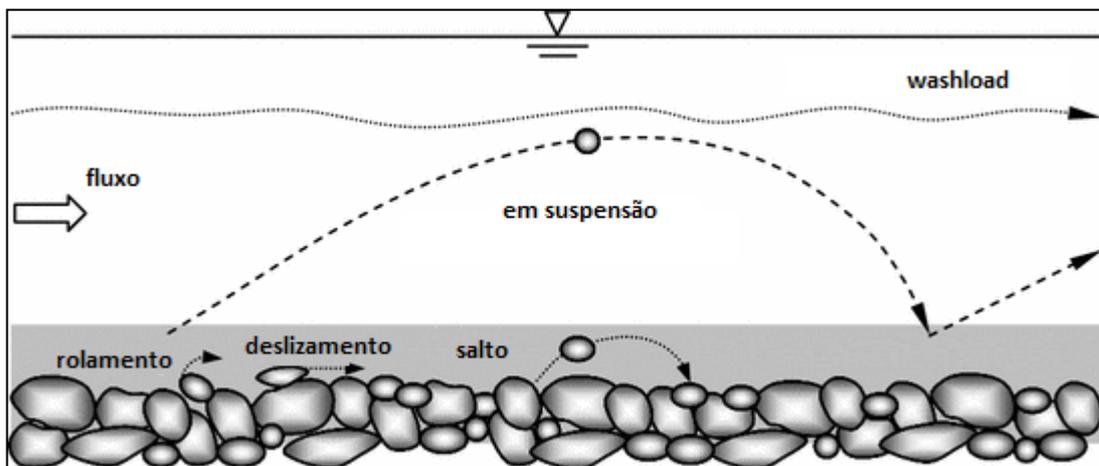
No ciclo hidrossedimentológico, a água é o principal agente de erosão e de transporte dos sedimentos. Os ventos também têm um papel neste processo, todavia, se comparado com o da água, é praticamente desprezível (ZHANG et al., 2011). Quando ocorre a precipitação e a camada de solo já não consegue mais absorver a água, gera-se um escoamento superficial que carrega as eventuais partículas sólidas depositadas na superfície oriundas dos processos de formação dos sedimentos. A água superficial encontra caminhos preferenciais de menor resistência e flui até encontrar um corpo hídrico (TUCCI, 2009). O corpo hídrico em si também é um agente erosivo, carreando sedimentos do fundo e das margens (VIETZ et al., 2018).

O transporte de um sedimento ocorre efetivamente quando as forças de transporte se sobrepõem às forças resistentes (CHANG, 1988). Simons e Senturk (1977) classificam o transporte dos sedimentos em:

- a) de fundo: quando o sedimento se move através de saltos, rolando ou deslizando na camada de fluxo imediatamente acima do leito do corpo hídrico;
- b) em suspensão: onde, devido à turbulência, o sedimento fica suspenso na água por um período mais prolongado e
- c) *washload* que é quando o sedimento é formado por partículas menores do que o material que forma o leito do canal e é originário das margens ou de áreas da bacia.

A Figura 4 apresenta os principais tipos de transporte de sedimento.

Figura 4 – Tipos de transporte de sedimentos



Fonte: Adaptado de Dey, 2014

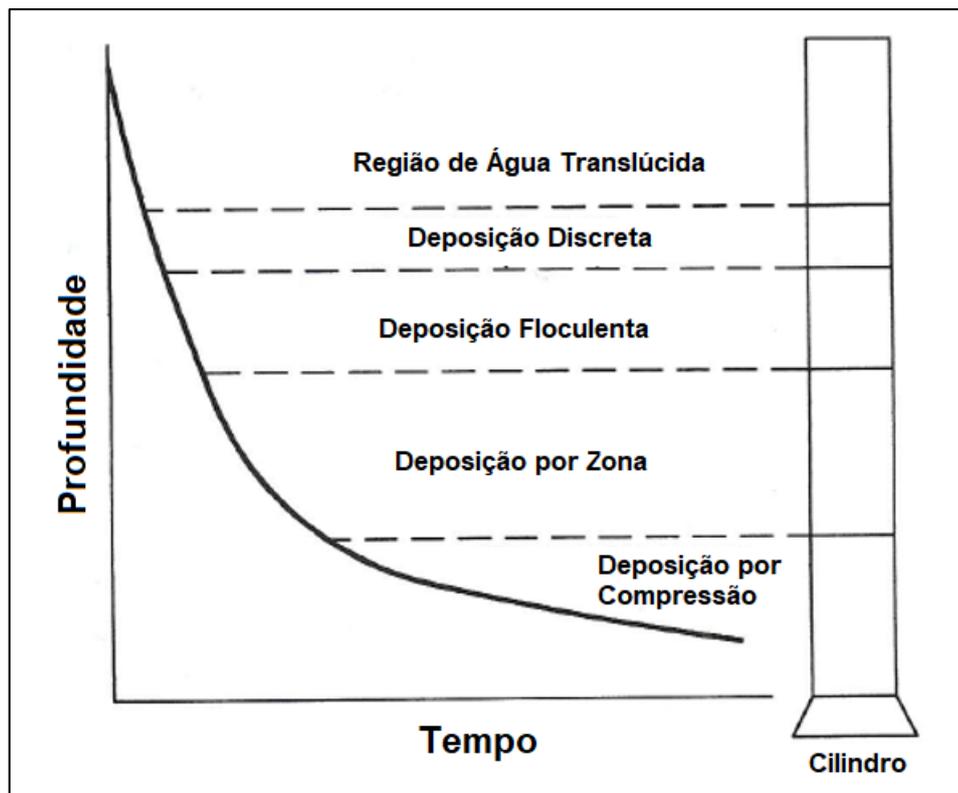
Depois que o sedimento é transportado ele finalmente chega ao corpo hídrico e lá eventualmente ocorre o processo de deposição, a qual pode ser de quatro formas:

deposição discreta, deposição flocculenta, deposição por zona e deposição por compressão (Haan et al. ,1994).

A deposição discreta ocorre quando o movimento de uma partícula não interfere no da outra, geralmente em baixas concentrações. Já na deposição flocculenta os sedimentos coalescem e formam flocos de maior volume e massa, e por consequência maior velocidade de assentamento. A deposição por zona é aquela que ocorre quando as partículas estão tão próximas que uma interfere na outra, criando uma deposição uniforme e uma zona de interface entre a fase líquida e a fase sólida. Por fim a deposição por compressão é quando as partículas estão tão concentradas que formam uma estrutura sólida e precisam do peso de novas partículas para serem assentadas.

Tapp et al. (1981) afirma que essas quatro formas de deposição podem ocorrer simultaneamente. As zonas (Figura 5), todavia, não aparecem de forma instantânea e dependem do tempo para serem formadas.

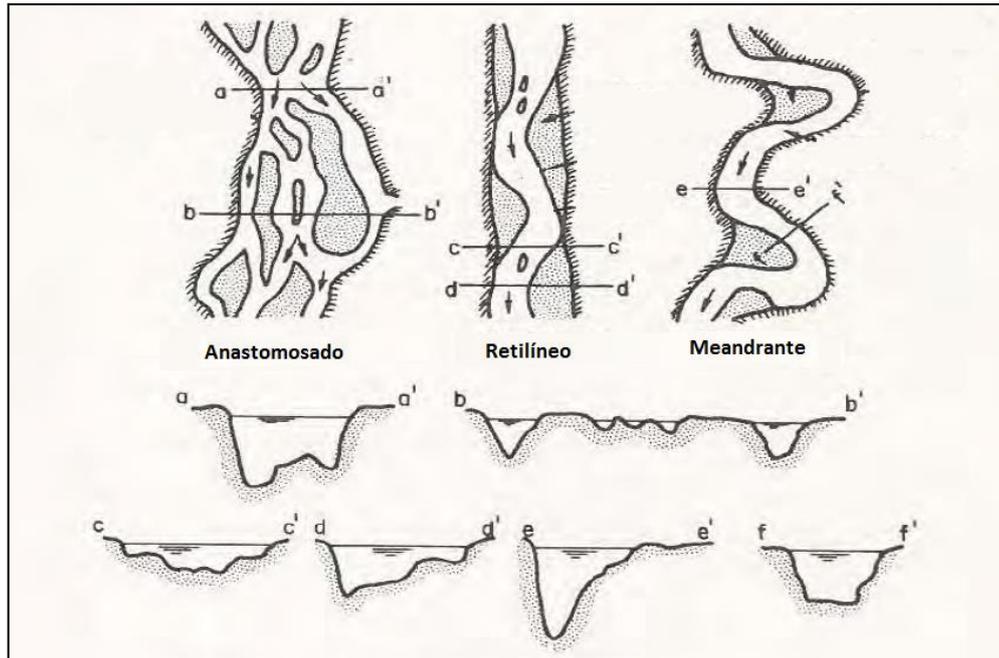
Figura 5 - Zonas de deposição de sedimentos



Fonte: Adaptado de Tapp et al., 1981

A deposição também ocorre de modo distinto nos diferentes tipos de rios, sendo eles retilíneos, anastomosados e meandrantos (Figura 6) (SIMONS; SENTURK, 1977).

Figura 6 – Zonas de deposição de sedimentos vistas de cima



Fonte: Adaptado de Simons e Senturk, 1977

Nos rios retilíneos, raros de ocorrer naturalmente, a deposição ocorre a partir uma sequência de pontos de deposição (curvas) seguidos de zonas de maior profundidade (trechos retilíneos) que vão alternando entre si ao longo do canal (SIMONS; SENTURK, 1977).

Nos rios anastomosados, típicos das partes próximas ao delta, a força da água já é relativamente fraca, não conseguindo mais transportar os sedimentos causando a deposição dos mesmos tipicamente na forma de ilhas. Outro fator que resulta nesse comportamento é o fato de as margens serem facilmente erodidas, então quando o rio diminui sua vazão e volta ao leito normal, forma as ilhas de sedimentos. Esse tipo de rio é caracterizado, também, por uma maior descarga de leito quando comparada com a dos sólidos em suspensão (SIMONS; SENTURK, 1977).

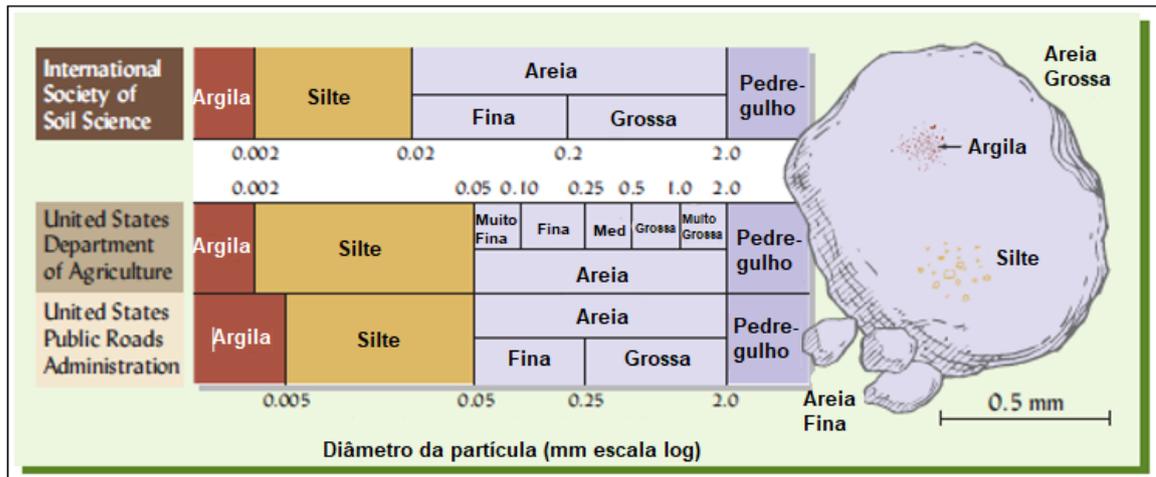
Por fim, nos rios meandrantas a deposição se dá nas partes onde a velocidade do fluxo é menor, geralmente na parte interna das curvas. Na parte oposta da curva, onde a velocidade é maior, ocorre, então, a erosão da margem (SIMONS; SENTURK, 1977).

2.2.2 Caracterização dos sedimentos

Uma das possíveis classificações para sedimentos é referente ao seu tamanho. Na

Figura 9 é possível ver a classificação dos sedimentos quanto ao seu tamanho de acordo com Weil e Brady (2016).

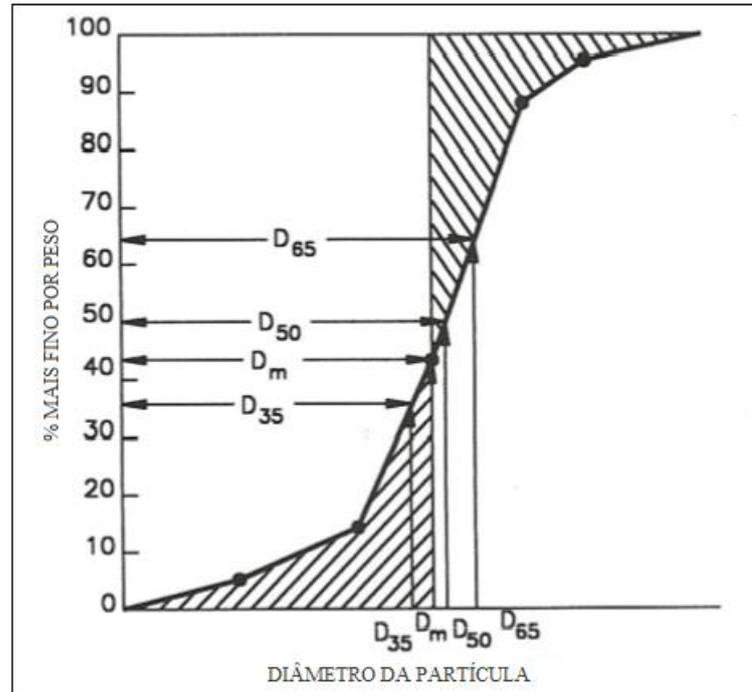
Figura 7 – Classificação dos sedimentos quanto ao diâmetro de acordo com diferentes entidades



Fonte: Adaptado de Weil e Brady, 2016

Levando em conta que a principal fonte de sedimentos carreados para um corpo hídrico é o solo (TUCCI, 2009), é importante também conhecer a textura do solo. Uma vez que, dificilmente existirá um solo com um único tamanho de partícula, a *Soil Survey Staff* (USDA, 2017) desenvolveu um diagrama (Figura 8) no qual é possível realizar essa classificação a partir das concentrações de silte, argila e areia da amostra.

Figura 9 – Exemplo de distribuição granulométrica de uma amostra de sedimentos com os diâmetros notáveis



Fonte: Adaptado de Simons e Senturk, 1977

2.2.3 Monitoramento de sedimentos

De acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), a sedimentometria está relacionada à medida da quantidade de sedimentos transportados pelos cursos de água seja de forma direta ou indireta. Essa classificação varia de acordo com o método empregado. No Brasil, a prática mais comum tem se mostrado a coleta, análise em laboratório e posteriormente cálculos da descarga sólida (CARVALHO et al., 2000).

A medição da descarga sólida pode ser realizada a partir de dois diferentes métodos, podendo ela ser de forma direta ou indireta (CARVALHO, 2008). A medição direta é aquela que é realizada no local, ou seja, a medição é realizada diretamente no corpo hídrico. A indireta por sua vez é aquela em que eventualmente é feita uma coleta em campo para depois ser analisada em laboratório ou através de técnicas de sensoriamento remoto. A descarga sólida total ainda é dividida em duas parcelas, a carga de sedimentos do leito e a carga de sedimentos em suspensão.

A descarga de sedimentos do leito, ou ainda carga de arraste, é caracterizada por ocorrer geralmente com partículas maiores e mais pesadas, uma vez que essas

são mais difíceis de serem transportadas pelo fluxo e tendem a se depositarem no leito. Segundo Carvalho (2008), a descarga do leito é mais difícil de ser monitorada, embora existam métodos tais como método acústico que permitem realizar esta avaliação.

A descarga de sedimentos em suspensão é aquela que abrange todos os sedimentos suspensos no fluxo, ou seja, os sedimentos que a energia do fluxo é capaz de transportar sem que haja a deposição dos mesmos. Monitorar este tipo de sedimento é muito mais fácil e, por consequência, muito mais utilizado. As estações sedimentométricas espalhadas pelo país monitoram basicamente este tipo de descarga e são 415 no total (CARVALHO et al., 2000).

O quadro 1 resume alguns dos métodos empregados para tais medições:

Quadro 1 – Resumo dos métodos de medição de sedimentos

(Continua)

Descarga sólida	Medição	Descrição	Equipamentos ou metodologia de medida
Descarga sólida em suspensão	Direta	Usa equipamentos que medem diretamente no curso d'água a concentração ou outra grandeza como a turbidez ou ultrassom	Medidor nuclear (portátil ou fixo), Ultrassônico ótico, Ultrassônico Doppler de dispersão, Turbidímetro, ADCP (Doppler)
		Por acumulação do sedimento num medidor (proveta graduada)	Garrafa Delft (medição pontual e concentração alta)
	Indireta	Coleta de sedimento por amostragem da mistura água-sedimento, análise de concentração e granulometria e cálculos posteriores da descarga sólida	Diversos tipos de equipamentos: – de bombeamento, equipamentos que usam garrafas ou sacas, sendo pontuais instantâneos, pontuais por integração e integradores na vertical (no Brasil usa-se principalmente a série norte-americana – U-59, DH-48, DH-59, D-49, P-61 e amostrador de saca)
Uso de fotos de satélite e comparação com medidas simultâneas de campo para calibragem, em grandes rios		São estabelecidas equações que correlacionam as grandezas de observação das fotos com as concentrações medidas	
Descarga sólida de arrasto	Direta	Amostradores ou medidores portáteis de três tipos principais (a amostra é coletada em diversos pontos da seção transversal, determinada o seu peso seco, a granulometria e calculada a descarga de arrasto); o medidor fica apoiado no leito entre 2 min a 2 horas de tal forma a receber no receptor 30 a 50% de sua capacidade	1) Cesta ou caixa – medidores Muhlofer, Ehrenberger, da Autoridade Suíça e outros 2) Bandeja ou tanque – medidores Losiebsky, Polyakov, SRIH e outros 3) Diferença de pressão – medidores Helly-Smith, Arnhem, Sphinx, do USCE, Károlyi, do PRI, Yangtze, Yangtze-78 VUV e outros

		Estruturas tipo fenda ou poço – as fendas do leito do rio são abertas por instantes e coletado o sedimento	Medidor Mulhofer (EUA)
	Indireta	Coleta de material do leito, análise granulométrica, medida da declividade, da temperatura, parâmetros hidráulicos e cálculo da descarga de arrasto e de material do leito por fórmulas (de Ackers e White, Colby, Einstein, Engelund e Hansen, Kalinske, Laursen, Meyer-Peter e Muller, Rottner, Schoklitsch, Toffaleti, Yang e outras)	Tipos de equipamento: 1) de penetração horizontal, tipos caçamba de dragagem e de concha 2) de penetração vertical, tipos de tubo vertical, caçamba de raspagem, caçamba de escavação e escavação de pedregulho 3) tipo <i>piston-core</i> que retém a amostra por vácuo parcial
		Deslocamento de dunas – por medida do volume da duna que se desloca com uso de ecobatímetro de alta resolução	1) levantamentos batimétricos seguidamente ao longo da seção transversal 2) levantamentos batimétricos seguidamente ao longo de seções longitudinais
		1) Traçadores radioativos 2) Traçadores de diluição, sendo ambos os métodos com a colocação do traçador no sedimento e seu acompanhamento com equipamento apropriado (o traçador deve ser escolhido de tal forma a não poluir o meio ambiente)	Métodos: 1) por colocação direta do traçador no sedimento do leito do rio 2) por coleta do sedimento, colocação do traçador no sedimento e seu retorno ao leito
		Propriedades litológicas – uso das características mineralógicas dos sedimentos	Coleta do sedimento do leito de afluentes e do curso principal, determinação das características mineralógicas dos sedimentos e comparação por uso de equações adequadas a partir das quantidades dos componentes existentes nas amostras
		Método acústico – utilizado para pedras que se chocam no medidor	(pouco eficiente)
		Método fotográfico, de amostragem – utilizado para pedras (coloca-se uma escala que também é fotografada)	Fotos de pedras submersas, Fotos de pedras de leitos secos
Descarga Sólida Total		Direta	Uso de estruturas tipo blocos, no leito, para provocar turbulência e todo o sedimento ficar em suspensão
	Levantamento topo-batimétrico de reservatório, determinação do volume dos depósitos e da eficiência de retenção de sedimentos no lago		1) Para pequenos reservatórios permite o cálculo do sedimento do leito 2) Para grandes reservatórios permite o cálculo do sedimento total
	Indireta	Coleta de material em suspensão e do leito, análise de concentração, análise granulométrica, medida da	Diversos tipos de equipamentos – de bombeamento, equipamentos que usam garrafas ou sacas, sendo pontuais instantâneos,

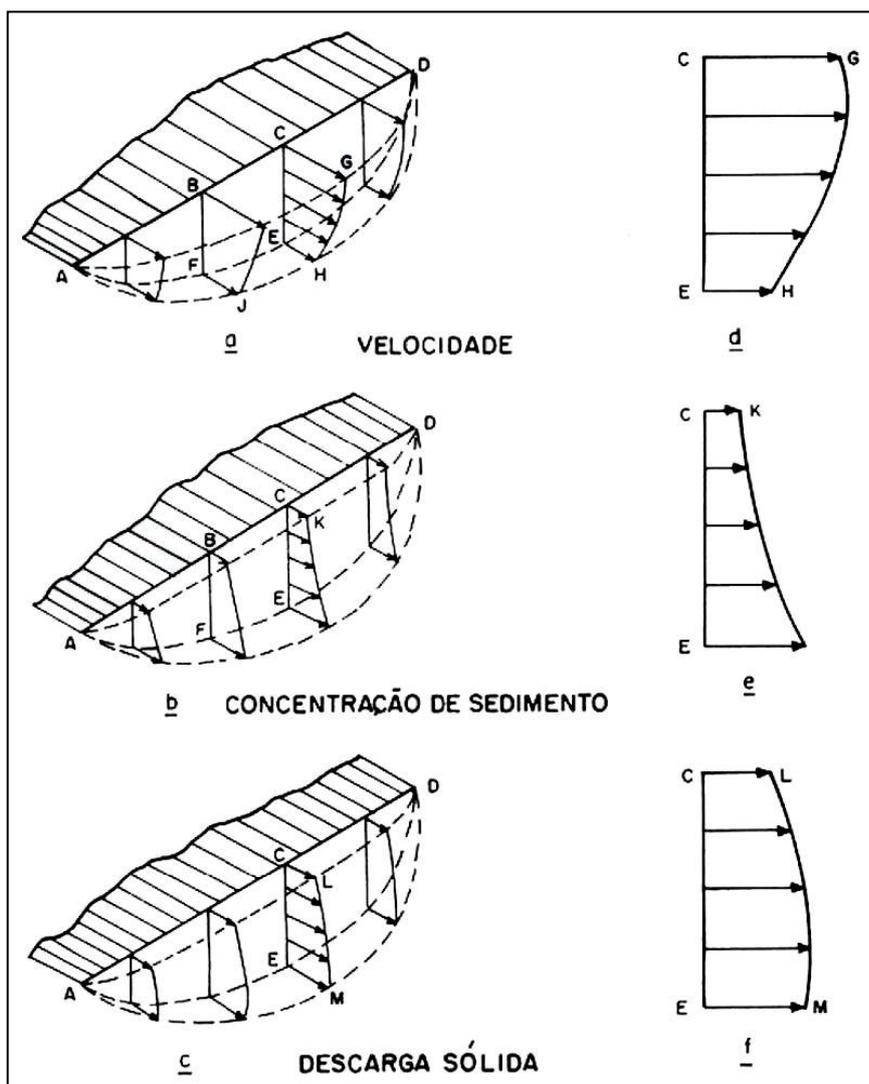
		temperatura, parâmetros hidráulicos e cálculo da descarga total – método modificado de Einstein e método simplificado de Colby	pontuais por integração e integradores na vertical (no Brasil usa-se principalmente a série norte-americana – U-59, DH-48, DH-59, D-49, P-61 e amostrador de saca)
--	--	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Fonte: Carvalho et al., 2000

2.2.3.1 Métodos de amostragem para material em suspensão

A ANEEL indica que a amostragem do material em suspensão deve ser feita em diversas verticais de uma forma que possa ser definida uma descarga média final (CARVALHO et al., 2010). Isso é aconselhável uma vez que em uma seção de um rio tanto a velocidade quanto a concentração de sedimentos são variáveis de acordo com a profundidade (Figura 10).

Figura 10 – Distribuição da velocidade (a), concentração de sedimento (b) e descarga sólida (c), bem como seus perfis (d, e, f) respectivamente

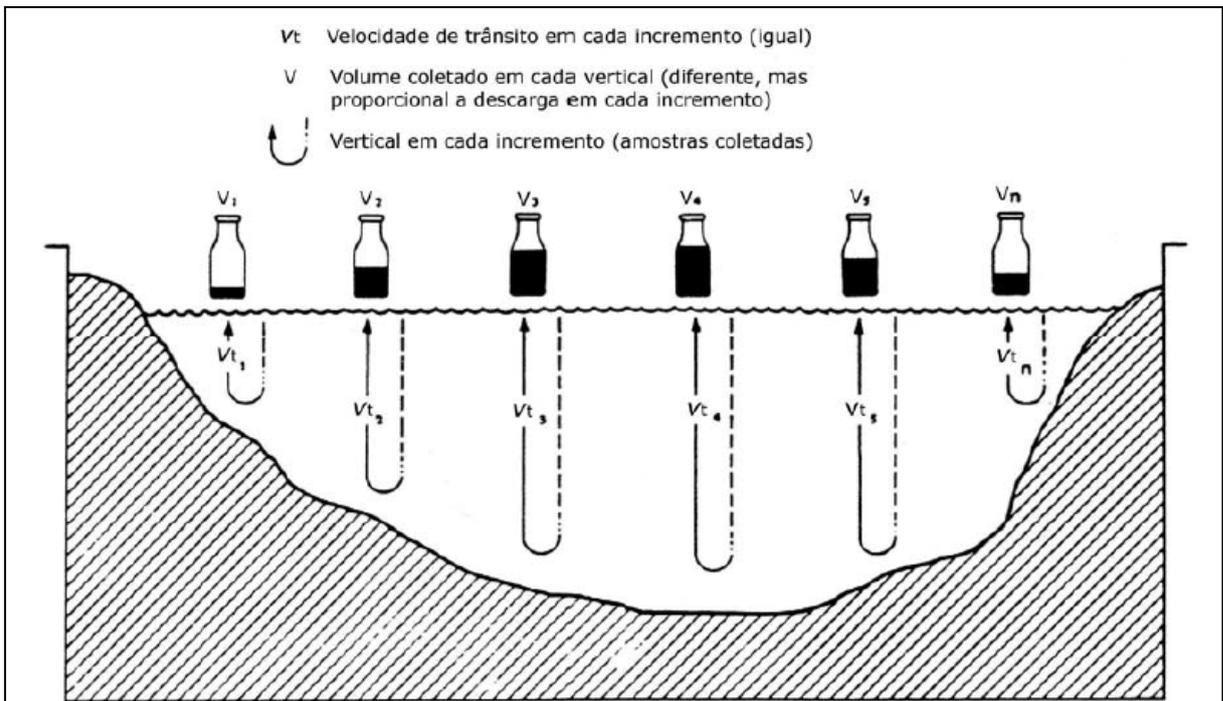


Fonte: Carvalho et al., 2000

Os métodos mais comuns de amostragem são:

- amostragem por integração na vertical: é o método em que a água do rio se acumula no recipiente e o amostrador se move de forma contínua na vertical. É importante para esse método que a velocidade em que a mistura entra no recipiente seja a mais próxima possível da velocidade instantânea da corrente;
- amostragem por igual incremento de largura (ILL): neste método a área da seção do corpo hídrico é dividida em verticais separadas por distâncias iguais (Figura 11). Para a coleta da mistura, o procedimento é parecido com o de integração vertical, sendo a única diferença que a velocidade de trânsito em todas as verticais deve ser a mesma. O resultado disso são garrafas mais cheias nas zonas de maior profundidade do rio e mais vazias próximas às margens;

Figura 11 - Exemplo de amostragem pelo método de igual incremento de largura

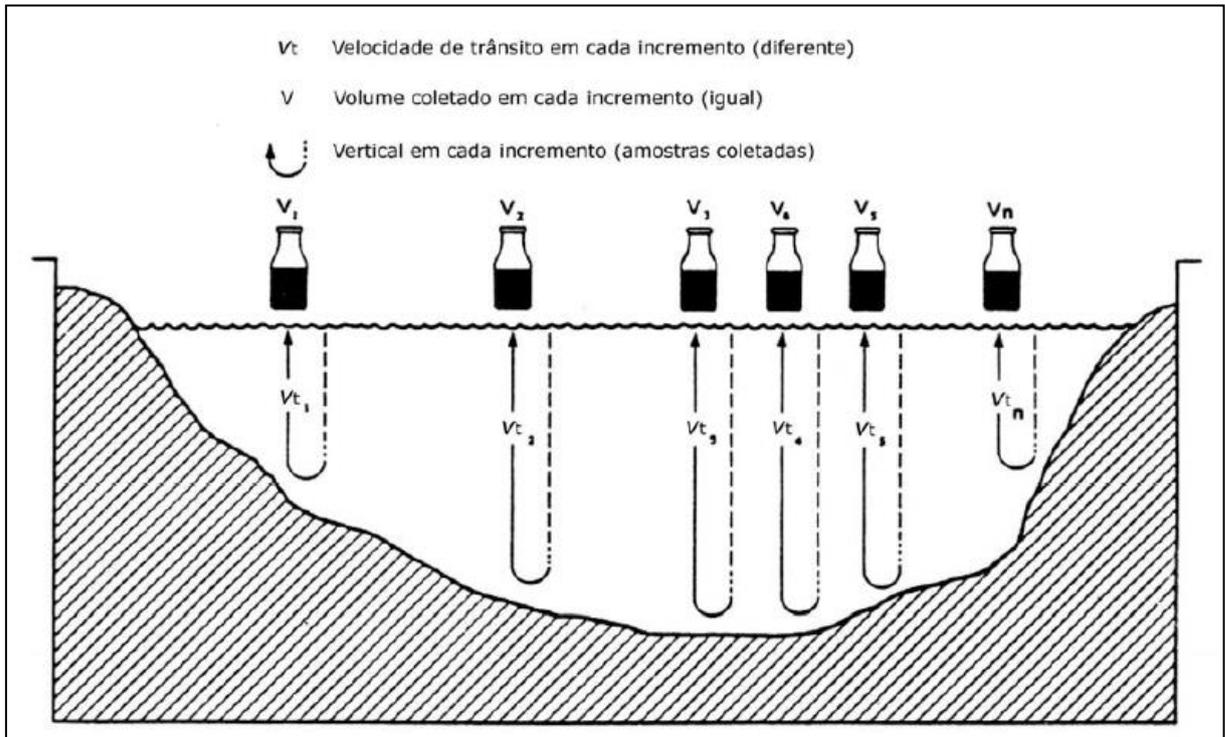


Fonte: Edwards e Glysson, 1988

- amostragem por igual incremento de descarga (IID): é o método no qual se divide a seção transversal do rio em segmentos que no fim resultem e um igual incremento de descarga (Figura 12). Isso significa que para cada vertical aplica-se uma velocidade diferente. Para encontrar os valores de descarga primeiro é necessário saber a descarga líquida e a partir destes

valores geram-se gráficos dos quais se obtém as informações necessárias.

Figura 12 - Exemplo de amostragem pelo método de igual incremento de descarga



Fonte: Edwards e Glysson, 1988

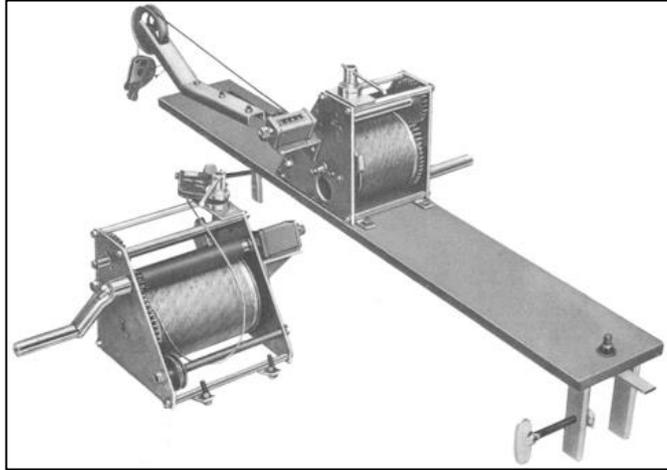
2.2.3.2 Métodos de amostragem para material do leito

A amostragem do material de leito, segundo Carvalho (2008), geralmente é feita nas mesmas verticais em que é feita a amostragem dos sedimentos em suspensão. Sugere-se a utilização de uma caçamba e que a amostra não tenha mais do que 2kg. O procedimento consiste em jogar o amostrador a jusante da seção e esperar que ele repouse no leito. Em seguida ele é puxado em direção ao operador de forma lenta e sutil para que não perturbe o material do leito com a finalidade de coletar um possível material de arrasto. Para retirar o material da caçamba, deve-se esperar até as partículas decantarem para retirar o excesso de água e posteriormente armazena-se a amostra.

Existem ainda outros métodos e equipamentos como os de penetração em que o amostrador penetra no leito do rio e coleta uma amostra. O procedimento seguinte é similar com o método da caçamba, sempre tomando o cuidado para não agitar demais a amostra e perder parte dela no içamento. Para realizar tal

procedimento, pode-se utilizar o auxílio de um guincho, semelhante ao apresentado na Figura 13.

Figura 13 - Guincho hidrométrico, equipamento auxiliar da medição



Fonte: Carvalho et al., 2000

2.2.3.3 Métodos de Análise

Uma vez coletadas as amostras, é de grande importância que a análise das mesmas seja feita de forma correta e criteriosa. A coleta e a análise devem trabalhar em uníssono para que sejam obtidos resultados válidos e coerentes mantendo-se as boas condições de armazenamento e de identificação de amostras. O Guia da ANEEL (CARVALHO et al, 2000) prescreve que as análises devem ser feitas o mais breve possível, mantendo a amostra de leito úmida para não formar torrões, secando ao sol somente próximo à análise.

Para os cálculos de descarga de arrasto e de suspensão, são realizados ensaios de granulometria e concentração, sendo este último mais empregado para descarga de suspensão. O Quadro 2 resume os tipos de ensaios e os métodos utilizados para realizá-los.

Quadro 2 - Métodos de análise de sedimentos

Sedimentos em Suspensão	Análise de concentração total	Filtração Evaporação Tubo de retirada pelo fundo
	Análise Granulométrica	Tubo de retirada pelo fundo Pipetagem Densímetro
Sedimentos do Leito	Análise Granulométrica	Peneiramento Densímetro Pipetagem Tubo de acumulação visual Tubo de retirada pelo fundo

Fonte: Adaptado de Carvalho, 2008

2.3 MODELAGEM HIDROSSEDIMENTOLÓGICA

A modelagem hidrossedimentológica leva em conta a produção, o transporte e a deposição dos sedimentos. Sua relação com a engenharia é estreita e pode ser vista em obras de geração de energia, de canais de irrigação, mineração, entre outros (CARVALHO, 2008).

No Brasil o estudo sedimentológico ganhou força nos anos 50 com estudos de assoreamento de reservatórios, uma vez que o país apresenta um total de 7.210 reservatórios artificiais com mais de 20ha, totalizando 10.505km² com finalidade de abastecimento urbano, agricultura e irrigação (ANA, 2017).

Tendo em vista previsão do comportamento hidrossedimentológico de um corpo hídrico e de sua bacia, diversos autores apresentaram modelos matemáticos baseados em dados empíricos e em leis da física, sendo alguns destes modelos são apresentados a seguir.

2.3.1 Modelos da perda de solo

Existem diversos modelos que representam a perda de solo sendo que um dos mais aceitos é o método da Equação Universal de Perdas de Solo, também conhecido por USLE (*Universal Soil Loss Equation*). O método foi inicialmente desenvolvido por Wischmeier e Smith (1978), mas depois sofreu alterações por autores vinculados ao Departamento de Agricultura dos EUA (USDA) (RENARD et al., 1997) e passou a ser chamada de Equação Universal de Perdas de Solo Revisada (RUSLE) como mostra a equação 1.

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \quad (1)$$

Onde:

A – perda de solo por unidade de área tempo, geralmente em t/ha, podendo a unidade variar de acordo com a escolha dos demais fatores;

R – fator de erosividade, o qual representa o potencial erosivo da precipitação em t m/ha.mm/h;

K – fator de erodibilidade do solo que representa quanto um solo é capaz de sofrer erosão frente a uma chuva em t/ ha/ (tm/ha.mm/h);

L – fator do comprimento do declive em m;

S – fator da intensidade do declive ou a declividade;

C – fator de uso e cobertura do solo;

P – fator da prática conservacionista.

Diversos estudos já foram feitos utilizando a RUSLE com resultados satisfatórios em diversas regiões do mundo (PARRAS-ALCÁNTARA et al., 2016; CONFORTI et al., 2016), mas Kinneil (2010) atenta que alguns cuidados devem ser tomados na utilização da equação, como a precisão na determinação dos fatores e a habilidade do modelo para considerar os efeitos dos fenômenos físicos causando os resultados.

2.3.2 Modelos de determinação de descarga sólida

Segundo Carvalho (2008), o mais comum é determinar a descarga sólida total no escritório uma vez que todas as amostras tenham sido devidamente analisadas e processadas. As informações disponíveis para o técnico do escritório são geralmente a descarga líquida, concentração e granulometria do material em suspensão e de fundo. O autor ressalta que é usual utilizar métodos diferentes para calcular a descarga em suspensão e a de arrasto, uma vez que leis que regem ambas são distintas.

Existem diversos modelos matemáticos e empíricos para determinar a descarga sólida e a sua escolha deve ser feita com base em qual é o método mais adequado para a área de estudo. Além disso, o método deve ser escolhido com base nos dados que estarão disponíveis. Carvalho (2008) sugere que, quando possível, mais de um método pode ser utilizado, verificando os resultados entre si e com dados

de amostras. O bom desempenho de uma função em um rio, não significa que o mesmo ocorrerá em uma outra ocasião (CHOI; LEE, 2014).

Tendo isso em vista, alguns autores apontam o porquê definir a descarga sólida é uma tarefa tão complexa. Wilcock *et al.* (2009) aponta a dificuldade de estimar a tensão cisalhante que leva ao transporte dos sedimentos em virtude do fluxo não-uniforme, que apesar de ter um impacto muito grande no transporte, muitas vezes é negligenciado. Além disso, outra tarefa complexa é definir a tensão nos grãos. Sabe-se a tensão total, mas definir qual parcela dessa tensão atua efetivamente nos sedimentos não é simples. Por fim, o autor aponta os eventos locais como grandes influenciadores na descarga que dependendo da abordagem muitas vezes não são levados em conta.

Bradley *et al.*, (1998) aponta, em especial, a dificuldade que é de determinar a descarga sólida para rios com leito de cascalho. Devido à sua geometria, predominantemente rasa, existe uma tendência de subestimar o transporte de sedimentos em vazões baixas. Além disso, o autor aponta que rios com tais características possuem grandes variações de regimes de fluxo ao longo do canal, dificultando ainda mais tal determinação.

Para definir a descarga sólida em suspensão através da amostragem por IIL ou IID, Carvalho (2008) aponta a seguinte equação (equação 2):

$$Q_{ss} = 0,0864 \cdot Q \cdot C \quad (2)$$

onde:

Q_{ss} – descarga sólida em suspensão em t/d;

Q – descarga líquida em m³/s e

C – concentração em mg/L.

A equação da descarga sólida em suspensão é bastante simples, a qual leva em conta o fluxo do rio e a quantidade de sedimentos que ele transporta por litro. Os sedimentos de arraste, todavia, não são tão simples de serem estimados e por isso existem diversos métodos. Os métodos apresentados neste trabalho foram retirados de Stevens e Yang (1989) e são resumidos na Tabela 1.

Tabela 1 – Resumo dos métodos de cálculo para descarga de leito

Método	Ano	Tipo de Amostragem ¹	Tamanho do sedimento
Meyer-Peter & Muller;	1948	Única	Areia e pedregulho
Laursen;	1958	Mistura	Areia
Engelund & Hansen;	1967	Única	Areia
Ackers & White;	1973	Única	Areia e pedregulho
Yang (areias);	1973	Opcional	Areia
Yang (pedregulhos)	1984	Opcional	Pedregulho

1 – o tipo de amostragem significa se o método calcula apenas um diâmetro de partícula por vez ou se utiliza toda a distribuição granulométrica

Fonte: Stevens e Yang (1989)

2.3.2.1 Meyer-Peter & Muller

A equação do método Meyer-Peter & Muller (1948) (equação 3) é apresentada a seguir e é válida somente para sedimentos com diâmetros de 0,4 a 30mm:

$$\gamma \cdot \frac{Q_s}{Q} \left(\frac{K_s}{K_r} \right)^{3/2} \cdot p \cdot S = 0,047 \cdot \gamma'_s \cdot Dm + \left(\frac{\gamma}{g} \right) \cdot q_{sa}^{2/3} \quad (3)$$

Na qual:

$$K_s = \frac{1}{n_s}$$

$$K_r = \frac{26}{(D_{90})^{1/6}}$$

$$\gamma'_s = \gamma_s - 1$$

onde:

γ – peso específico da água, 1,0 t/m³;

Q_s – descarga líquida que influencia no leito em L/s;

Q – descarga líquida total em L/s;

K_s – coeficiente de rugosidade do leito de Strickler, igual ao inverso do coeficiente de Manning;

K_r – coeficiente de rugosidade da partícula;

D_{90} – diâmetro da partícula para o qual 90% do sedimento do leito são mais finos em m;

p – profundidade média em m;

S – gradiente de energia em m/m

γ'_s – peso específico do sedimento submerso em t/m³;

γ_s – peso específico do sedimento

D_m – diâmetro médio da composição do material do leito em m;

g – aceleração da gravidade em m/s^2

q_{sa} – descarga sólida do leito em t/s por metro de largura;

n – número de frações granulométricas no material do leito;

n_s – coeficiente de Manning;

V – velocidade média em m/s.

2.3.2.2 Ackers & White (1973)

O método de Ackers & White é dividido em três grupos adimensionais, sendo eles D_{gr} , F_{gr} e G_{gr} , granulometria, mobilidade e descarga sólida respectivamente e pode ser aplicado tanto para areias como para pedregulhos.

O diâmetro adimensional é dado pela equação 4:

$$D_{gr} = D_{50} \left[\frac{g \cdot (S_g - 1)}{v^2} \right]^{1/3} \quad (4)$$

onde:

D_{50} – diâmetro da partícula para o qual 50% do sedimento do leito são mais finos em ft;

g – aceleração da gravidade em ft/s^2 ;

S_g – gravidade específica do sedimento;

v – viscosidade cinemática em ft^2/s .

O modelo considera que apenas uma parte da tensão de cisalhamento no leito do canal atua sobre os sedimentos grossos, sendo eles tratados principalmente como carga de leito. A equação da mobilidade adimensional é dada pela equação 5:

$$F_{gr} = \frac{U'_*}{\sqrt{g \cdot D_{50} \cdot (S_g - 1)}} \left[\frac{V}{\sqrt{32} \cdot \log \left(\frac{\alpha \cdot p}{d_{50}} \right)} \right]^{1-n} \quad (5)$$

Onde:

p – profundidade média em ft;

U'_* - velocidade de cisalhamento em ft/s ;

V – velocidade média em ft/s ;

α – coeficiente que leva em conta a turbulência e a rugosidade, geralmente adota-se um valor igual a 10;

n – expoente de transição que depende da granulometria do sedimento.

A equação referente à descarga sólida adimensional é dada pela equação 6:

$$G_{gr} = \frac{X \cdot p}{D_{50} \cdot S_g} \left(\frac{U_*}{V} \right)^n \quad (6)$$

onde X é a concentração da descarga sólida em fluxo de sedimento por unidade de peso de fluxo fluido. Substituindo X por C tem-se, em ppm a equação 7:

$$C = 10^6 \cdot \left(\frac{G_{gr} \cdot D_{50} \cdot S_g \cdot \left(\frac{V}{U_*} \right)^n}{p} \right) \quad (7)$$

Realizados diversos estudos, Ackers & White propuseram uma nova equação para a função de transporte adimensional dada pela equação 8:

$$G_{gr} = C_A \left(\frac{F_{gr}}{A} - 1 \right)^m \quad (8)$$

onde:

A - número de Froude em movimento nominal inicial;

m – expoente da função de transporte de sedimento;

C_A – coeficiente da função de transporte de sedimento.

Para D_{gr} entre 1,0 e 60,0 tem-se:

$$n = 1 - 0,56 \cdot \log(D_{gr})$$

$$A = \frac{0,23}{\sqrt{D_{gr}}} + 0,14$$

$$m = \frac{9,66}{D_{gr}} + 1,34$$

$$\log C_A = 2,86 \cdot \log D_{gr} - (\log D_{gr})^2 - 3,53$$

Para D_{gr} maior que 60,0 adotam-se:

$$n = 0$$

$$A = 0,17$$

$$m = 1,5$$

$$C_A = 0,025$$

Por fim, para descobrir a descarga sólida do material do leito em t/dia, utiliza-se a equação 9:

$$Q_{sml} = 0,0864 \cdot Q \cdot C \quad (9)$$

Sendo que Q deve ser em m³/s e C em ppm.

2.3.2.3 Yang (areias) (1973)

A equação de Yang para areias é dada pela equação 10:

$$\log C = 5,453 - 0,286 \log \frac{w_s \cdot D_{50}}{\nu} - 0,457 \cdot \log \left(\frac{U_*}{w_s} \right) \quad (10)$$

$$+ \left(1,799 - 0,409 \log \frac{w_s \cdot D_{50}}{\nu} - 0,314 \log \left(\frac{U_*}{w_s} \right) \right) \cdot \log \left(\frac{V \cdot S}{w_s} - \frac{V_{cr} \cdot S}{w_s} \right)$$

na qual:

$$\frac{V_{cr}}{w_s} = \frac{2,5}{\log \frac{U_* \cdot D_{50}}{\nu} - 0,6} + 0,66$$

para:

$$1,2 < \frac{U_* \cdot D_{50}}{\nu} < 70$$

quando a expressão anterior obtiver valores maiores que 70, adota-se:

$$\frac{V_{cr}}{w_s} = 2,05$$

onde:

C - concentração média da descarga de material do leito em peso por unidade de volume;

w_{si} – velocidade de queda da partícula de granulometria D_{50} em ft/s;

D_{50} – diâmetro da partícula para o qual 50% do sedimento do leito são mais finos em ft;

ν – viscosidade cinemática em ft²/s.

U_* - velocidade de cisalhamento em ft/s;

V – velocidade média em ft/s;

S – gradiente de energia em ft/ft;

V_{cr} – velocidade média de escoamento em movimento inicial em ft/s.

O processo deve ser feito para cada classe granulométrica levando em conta o diâmetro médio de cada classe bem como a velocidade de queda correspondente. A concentração total é dada pela equação 11:

$$C = \sum_{i=1}^n i_f \cdot C_i \quad (11)$$

onde:

n – número de frações granulométricas;

i_f – fração, por peso, de material de leito em uma granulometria;

C_i – concentração na fração granulométrica i .

Por fim, a descarga sólida é dada pela mesma expressão do método de Ackers & White (equação 12):

$$Q_{sml} = 0,0864 \cdot Q \cdot C \quad (12)$$

2.3.2.4 Yang (pedregulhos)

Yang utilizou a mesma equação para determinar a potência unitária adimensional do seu método para areias, alterando-se os coeficientes para adequá-la a pedregulhos de acordo com a equação 13:

$$\log C = 6,681 - 0,633 \log \frac{w_s \cdot D_{50}}{v} - 4,816 \cdot \log \left(\frac{U_*}{w_s} \right) + \left(2,784 - 0,305 \log \frac{w_s \cdot D_{50}}{v} - 0,282 \log \left(\frac{U_*}{w_s} \right) \right) \cdot \log \left(\frac{V \cdot S}{w_s} - \frac{V_{cr} \cdot S}{w_s} \right) \quad (13)$$

Todavia esta equação restringe seu uso a sedimentos com diâmetros de 2,46 a 7,01 mm. Por fim, da mesma forma que se determina a descarga sólida total no método para areias, faz-se para pedregulhos, dividindo-se em classes também.

2.4 MODELO HEC-RAS

Existem diversos modelos que realizam análises de sedimentos, desde os mais simples como SEDIM 2.0 (CAMPEÃO; DA HORA, 2018) até modelos mais complexos que fazem as análises das etapas do ciclo hidrossedimentológico a nível de bacia como é o caso do SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) (GASSMAN, 2007; WU et al., 2018) e do HEC-RAS (USACE, 2016).

O modelo HEC-RAS (*Hydrologic Engineering Center's – River Analysis System*) é um modelo também desenvolvido pelo corpo de engenheiros do exército americano cujas principais funções são:

- a) análise de fluxo permanente unidimensional;
- b) análise de fluxo não-permanente uni e bidimensional;
- c) análise de transporte de sedimentos e
- d) modelagem de qualidade da água (USACE, 2016).

As análises de fluxo permanente são basicamente utilizadas para dois propósitos: a previsão de cheias (TENZIN; BHASKAR, 2017; HICKS; PEACOCK, 2005), onde o programa é capaz de, a partir da inserção de dados geométricos da seção do rio e dados de vazão, determinar a cota a qual ele atingirá e para calibrar o coeficiente de rugosidade de Manning para realizar a análise de transporte de sedimentos (DYSARZ et al., 2017).

As análises de fluxo não-permanente também são utilizadas basicamente para a análise de transporte de sedimentos (NISTORAN et al., 2017). Segundo Hummel et al. (2012) o transporte de sedimentos em regime de fluxo não-permanente ainda não é muito bem compreendido e além disso a maioria das fórmulas de transporte pressupõe um fluxo permanente.

Análises de sedimentos podem ser feitas a partir de dois tipos de fluxo, o não-permanente e o *quasi*-não-permanente. Existem aplicações do modelo com resultados satisfatórios para ambos os casos tais como os resultados apresentados por Dysarz et al., (2017); Retsinis et al., (2018). Os resultados obtidos através do modelo são os mais variados, como avaliação das mudanças no leito do rio (DYSARZ et al., 2017; LOGAH et al., 2017) e avaliação da deposição de sedimentos em reservatórios (HABIB-UR-REHMAN et al., 2018; MOHAMMAD et al., 2016).

Por fim a modelagem da qualidade da água pode ser aplicada, por exemplo, numa análise em que ocorra influência de marés (FAN et al., 2012) e também em

questões de temperatura da água, ou seja, o modelo é capaz de calcular transporte baseado na temperatura da água (DRAKE et al., 2010).

2.4.1 Geometria do corpo hídrico

Uma das etapas da análise de transporte de sedimentos é inserir a geometria do corpo hídrico. Essa etapa consiste em:

- a) definir o trecho do rio;
- b) definir os trechos dos rios contribuintes e
- c) definir as informações das seções transversais (U.S. ARMY CORP OF ENGINEERS, 2016).

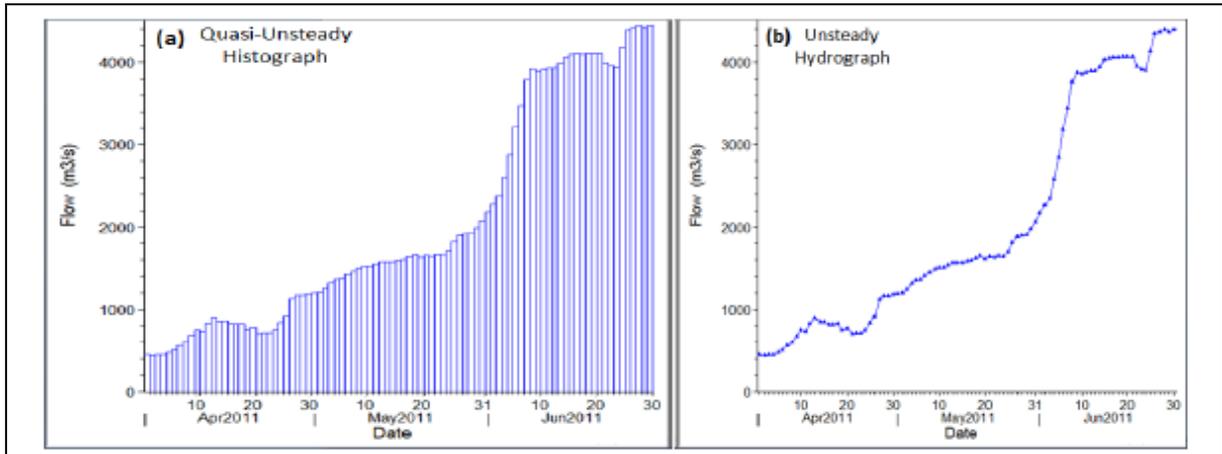
De acordo com o manual do programa (USACE, 2016), essa tarefa pode ser feita manualmente inserindo os trechos e as seções, ou pode ser feita de forma mais automatizada com o auxílio de outros softwares de sensoriamento remoto como o ArcGIS através o plugin HEC-GeoRAS (ULLAH et al., 2016).

2.4.2 Quasi-unsteady flow analysis

Como mencionado anteriormente, existem duas formas de tratar a descarga líquida em uma análise de transporte de sedimentos no HEC-RAS, de forma não-permanente (*unsteady*) ou quasi-não-permanente (*quasi-unsteady*). A principal diferença entre os métodos está nas condições de contorno a montante do trecho do rio em estudo.

A análise de fluxo quasi-não-permanente trata a série de fluxos como uma série de fluxos permanentes (Figura 14a). Os parâmetros de transporte de sedimentos são, então, calculados com as ferramentas de fluxo permanente do HEC-RAS e depois aplicados para uma janela de tempo especificada. Já a análise de fluxo não-permanente aborda o fluxo com um caráter contínuo (Figura 14b). O quadro 2 apresenta um resumo das aplicações, vantagens e desvantagens de um modelo e de outro (USACE, 2016).

Figura 14 – Hidrograma em fluxo quasi-não-permanente (a) e não-permanente (b)



Fonte: U.S. Army Corp of Engineers, 2016

Quadro 3 – Diferenças, vantagens e desvantagens entre os diferentes tipos de fluxo disponíveis no modelo HEC-RAS

Quasi-não-permanente	Não-permanente
Resolve as equações de fluxo para uma série de fluxos-permanentes.	Resolve a equação de Saint-Venant implicitamente.
Não conserva o fluxo ou leva em conta para armazenamento.	Conserva o fluxo e leva em conta armazenamento.
Mais estável.	Menos estável. A mudança no leito pode exacerbar as instabilidades do modelo não-permanente, comuns à solução da equação de Saint-Venant.
Passos individuais levam mais tempo, mas o recurso de passo de tempo variável se traduz em execuções mais rápidas.	O mecanismo de fluxo não-permanente é mais rápido que o fluxo permanente, portanto, cada cálculo não-permanente é mais rápido. No entanto, como o fluxo não-permanente requer um único passo para toda a simulação, e simulações não-permanentes exigem que pequenas etapas de tempo sejam executadas, os modelos de sedimentos não-permanentes tendem a ser mais longos.
Limitado às opções de fluxo permanente.	Condições de contorno de fluxo complexas disponíveis, incluindo fluxo de águas subterrâneas, réguas, estruturas laterais, controles de portão de limite interno, bombas e outros.

Fonte: U.S. Army Corp of Engineers, 2016.

2.4.3 Análise sedimentométrica

Para realizar uma análise de sedimentos corretamente, as análises hidráulicas devem ter sido realizadas corretamente uma vez que os resultados de sedimentos são muito sensíveis aos resultados hidráulicos. Com o HEC-RAS, o

modelo não será robusto e confiável se o modelo hidráulico não tenha sido corretamente calibrado e validado (THOMAS; CHANG, 2008).

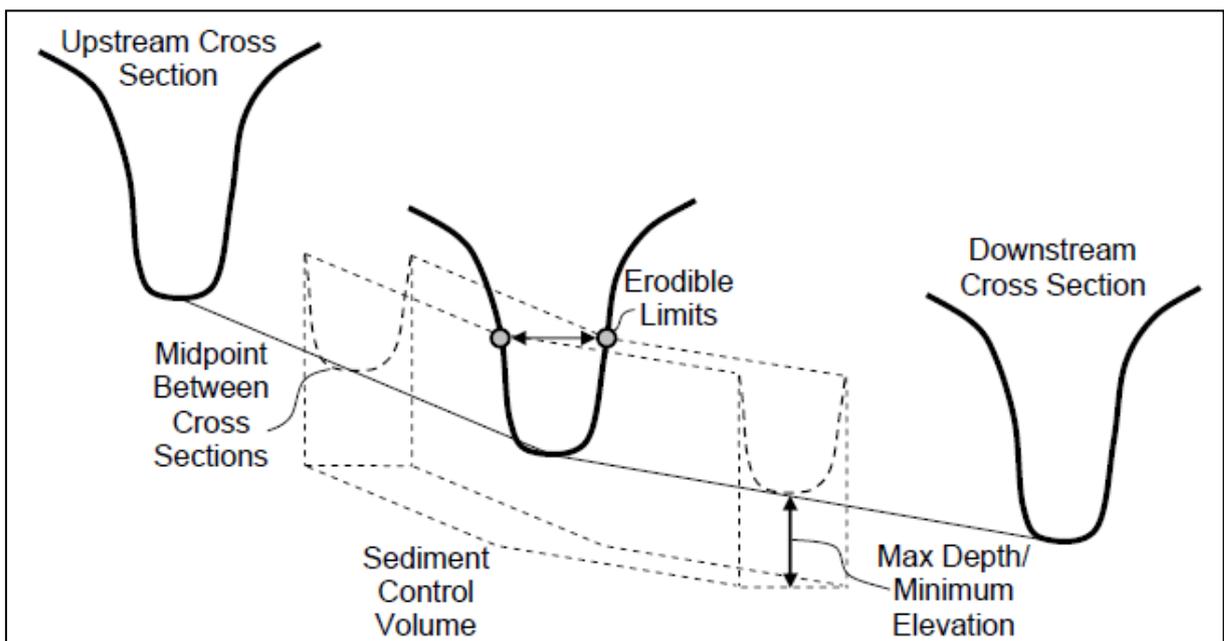
O modelo trabalha com equações de transporte, algumas das quais são tratadas neste trabalho:

- a) Ackers and White;
- b) England and Hansen;
- c) Copeland's form of Laursen;
- d) Meyer-Peter and Müller (MPM);
- e) Toffaleti;
- f) MPM-Toffaleti;
- g) Yang (sand and gravel eqns.);
- h) Wilcock and Crowe (USACE, 2016).

A escolha do método deve ser feita de modo a ver qual equação se adéqua mais à área na qual será feita o estudo e quais os dados que serão disponíveis.

Na modelagem hidrológica, é importante definir, também, o limite no qual o leito pode ser erodido (Figura 15). que como indicando a elevação do leito de rocha ou indicando a profundidade máxima na qual o leito pode ser erodido. Além disso, define-se o limite no qual as margens não podem ser erodidas, cuja escolha deve levar em consideração o conhecimento do local e a experiência do operador (USACE, 2016).

Figura 15 – Limite de erodibilidade do canal



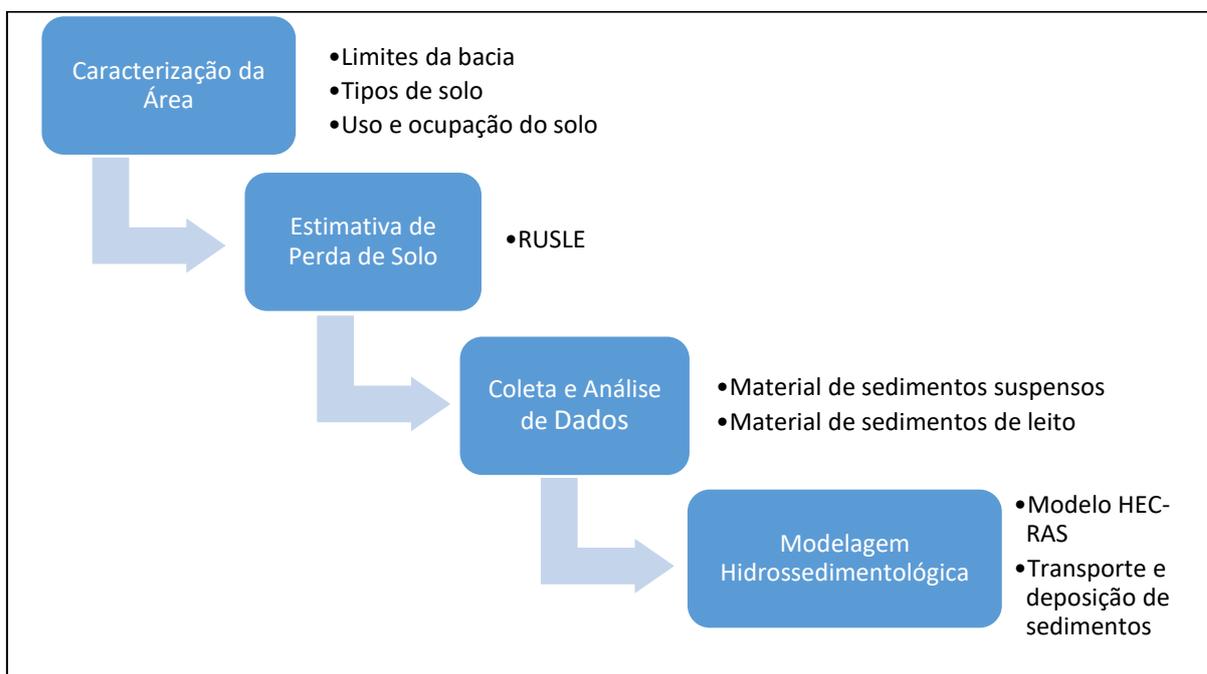
Fonte: U.S. Army Corp of Engineers, 2016

Nesta seção foram abordadas as questões pertinentes a respeito de uma análise hidrossedimentológica de um corpo hídrico. Viu-se principalmente o ciclo hidrossedimentológico que aborda os processos sofridos pelas partículas sólidas ou sedimentos relacionados com o ciclo da água. Além disso, abordou-se também questões práticas de sedimentometria, como a caracterização, monitoramento, amostragem e análise de sedimentos. Foram vistos ainda modelos de análise sedimentológica, bem como algumas das funções de transporte e de perda de solo.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Nesta seção serão abordadas questões referentes aos materiais utilizados e ao método de pesquisa. Inicialmente se caracterizará a área de estudo, indicando sua localização, identificando os limites da bacia hidrográfica e caracterizando o tipo e uso e ocupação do solo. Em seguida serão abordados os métodos e parâmetros de entrada para a realização do cálculo da perda de solo e das modelagens hidrológica e sedimentológica de acordo com o fluxograma apresentado a seguir (Figura 16).

Figura 16 – Fluxograma do método de trabalho



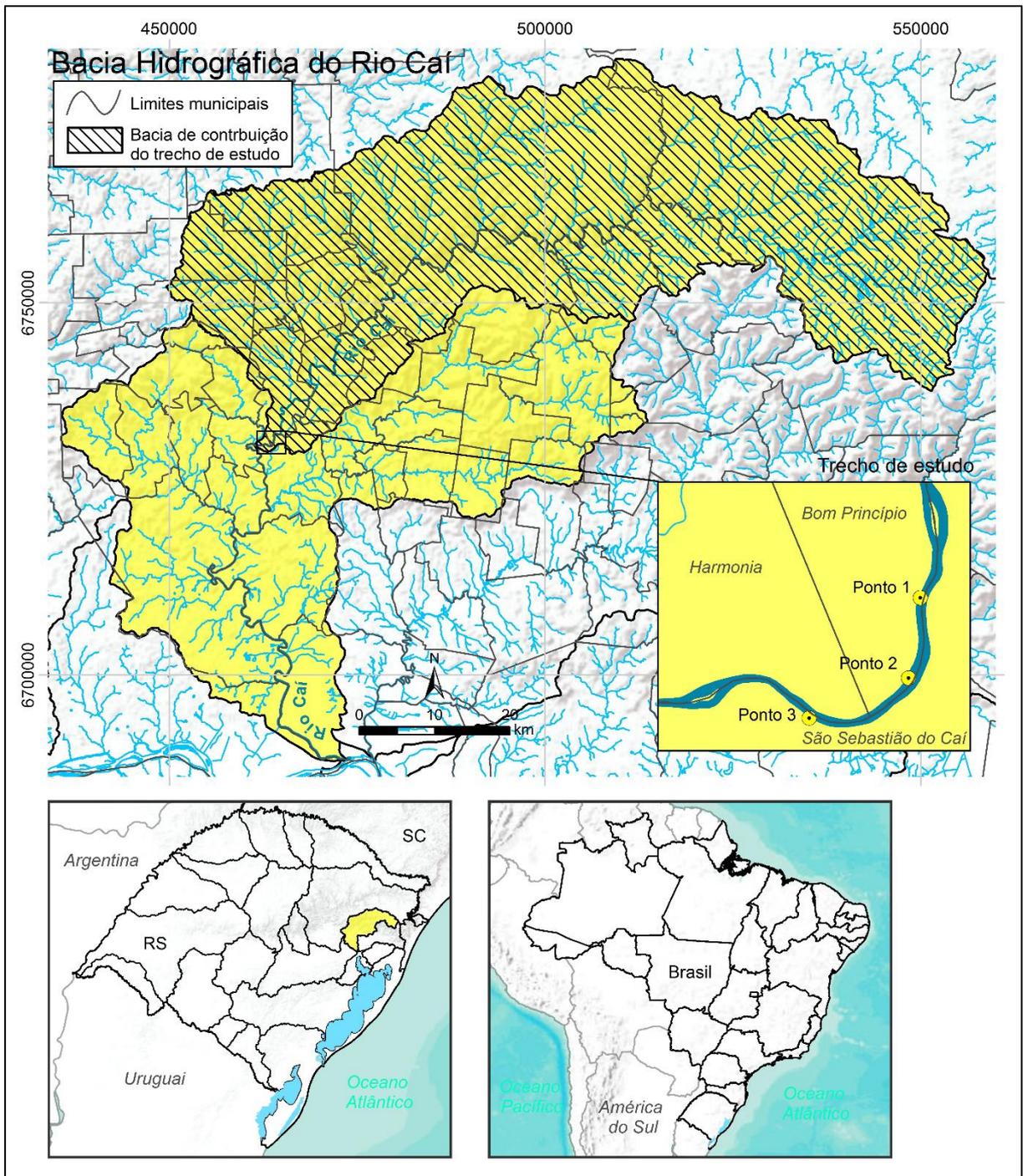
Fonte: do Autor, 2018

3.1 ÁREA DE ESTUDO

3.1.1 Localização

O trecho do rio no estudo em questão se encontra no município de São Sebastião do Caí, RS (Figura 17) o qual se estende ao longo de 765 m e possui uma área de drenagem de aproximadamente 2862 km², inserida na bacia do Rio Caí, que apresenta uma área de drenagem total de 4990 km² (ANA, 2018).

Figura 17 – Localização da bacia hidrográfica do trecho em estudo



Fonte: Autor, 2018.

3.1.2 Tipo, Uso e Ocupação do Solo

Os tipos de solos da bacia foram caracterizados conforme a separação proposta por Streck (2005). Quanto ao uso e ocupação do solo, a abrangência de cada classe foi definida a partir de imagens de satélite Landsat de 2018 e processamento das mesmas com o auxílio dos softwares Idrisi e ArcGIS. Amostras

dos pixels de cada uma das classes significativas de uso e ocupação do solo foram coletadas, e a partir das mesmas foi classificado o restante da imagem de forma automatizada.

3.2 ESTIMATIVA PERDA DE SOLOS

A estimativa de perda de solos foi realizada com o emprego do método RUSLE. Os fatores R, K, L e S da equação estão relacionados com as características naturais da bacia, enquanto os fatores C e P estão mais diretamente relacionados com o uso e ocupação do solo (TOMAZONI; GUIMARÃES, 2005). A obtenção de cada um destes fatores é abordada nos itens a seguir.

3.2.1 Fator R

O fator R, o qual é referente à erosividade da chuva, é obtido através da equação a seguir:

$$El_{\text{mensal}} = 89,823.(P_m^2/P_a)^{0,759}$$

onde:

El_{mensal}: média mensal do índice de erosão em MJ.mm/(h.ha) para o mês considerado;

P_m: precipitação média mensal em milímetros (mm) do mês considerado;

P_a: precipitação média anual, em milímetros (mm).

Os termos P_m e P_a da equação foram obtidos através das séries históricas registradas nos postos pluviométricos.

3.2.2 Fator K

O fator K está relacionado com a erodibilidade do solo. Como a bacia engloba uma área muito grande, com diferentes tipos de solo, foi considerado um valor de K para cada tipo de solo. Tal valor foi obtido de bibliografia existente em estudos que tenham sido feitos na região ou com o mesmo tipo de solo da bacia de estudo (CHAGAS, 2011).

3.2.3 Fatores C e P

Os fatores C e P estão diretamente relacionados entre si. O primeiro é relativo ao uso e manejo do solo, enquanto o último leva em conta a prática conservacionista adotada na região em relação à erosão do solo. Ambos os fatores serão obtidos através do mapa de uso e cobertura do solo e por atividades realizadas a campo.

3.2.4 Fatores L e S

Os fatores L e S, comprimento do declive e intensidade do declive, respectivamente, foram obtidos a partir do MDE com o auxílio de software de geoprocessamento Idrisi e ArcGis.

3.3 COLETA E ANÁLISE DE DADOS

Para a aplicação do modelo hidrossedimentológico e da RUSLE são necessários alguns dados previamente medidos em campo. Esses dados se dividem em dados coletados por estações fluviométricas e por dados coletados em campo.

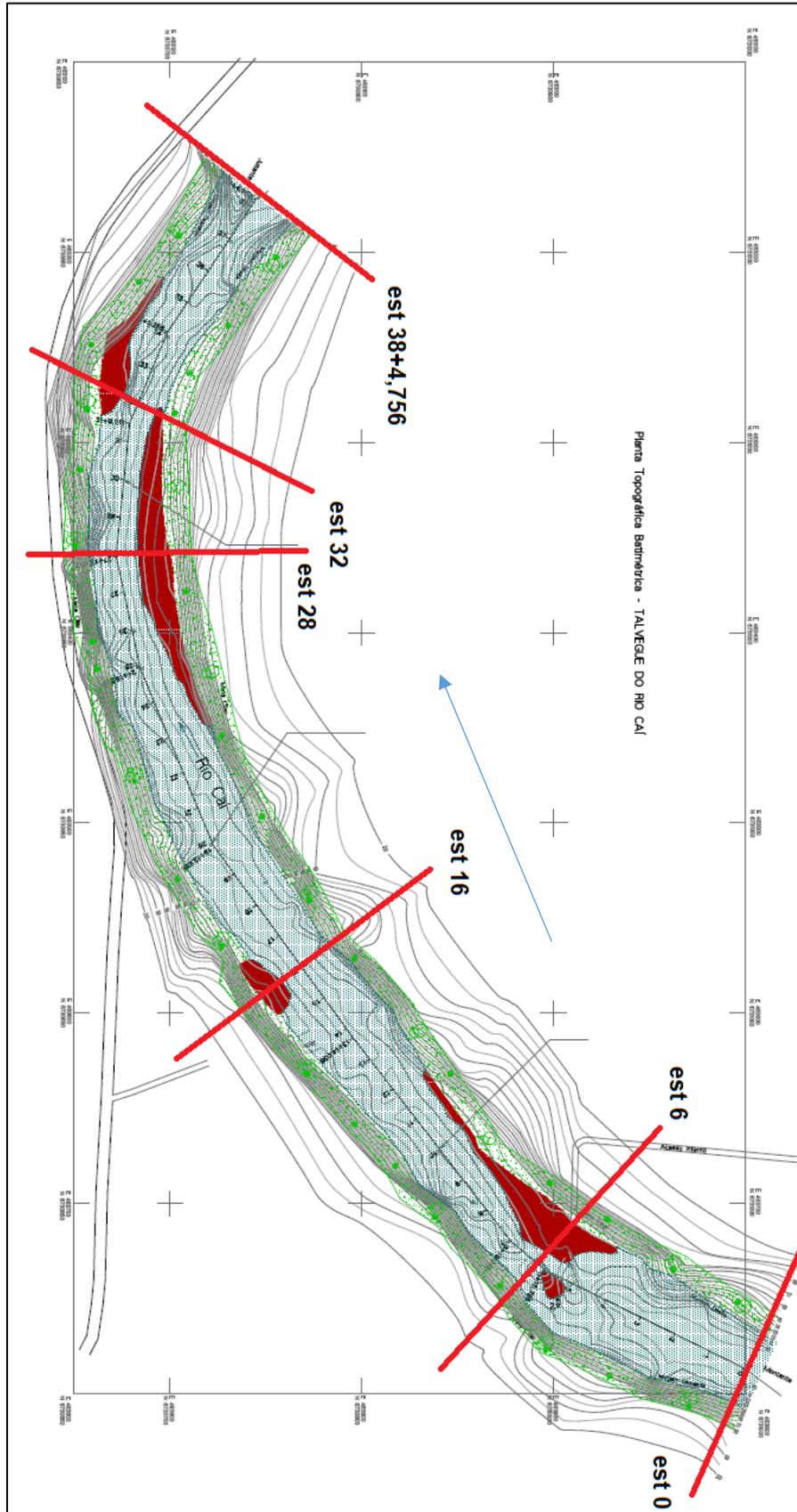
3.3.1 Vazão

O exutório da bacia do presente estudo não possui um posto fluviométrico que possa ser utilizado para comparar os dados, todavia cerca de 10 km a jusante existe um posto de código 8717000, localizado na coordenada -29.5900° , -51.3833° operado pela ANA o qual foi utilizado para regionalização das vazões, seguindo metodologia apresentada por Tucci (2008) realizando uma média ponderada referente às áreas de cada bacia. Sua série histórica foi obtida no portal da Hidroweb para um período de 01/01/2018 até 31/12/2018.

3.3.2 Levantamento topobatimétrico

Para a aplicação do modelo, utilizou-se um levantamento topobatimétrico em escala 1:1000 com curvas de nível espaçadas em 50 cm realizado por uma empresa terceirizada o qual levou em conta um trecho de 765 m (Figura 18). Neste levantamento foram criadas seções transversais do canal espaçadas em 20 m entre si por uma extensão de, em média, 40 m a partir do eixo para cada lado onde o fluxo parte da estaca 0 em direção à estaca 38+4,756.

Figura 18 – Levantamento topobatimétrico



Fonte: ProGEO Topografia LTDA, 2018

3.3.3 Coleta de sedimentos suspensos e de leito

A obtenção de amostras para análise posterior em laboratório foi realizada em três coletas de campo (Figura 19).

Figura 19 – Atividades de coleta de dados em campo



Fonte: ISAM, 2018

Os sedimentos suspensos foram coletados através do método ILL (Igual Incremento de Largura), o qual consiste em realizar amostragens em pontos igualmente espaçados ao longo da seção com velocidade constante. Como resultado obteve-se amostragens com volumes diferentes, isto é, nas zonas mais profundas a garrafa ficou cheia enquanto nas zonas mais rasas menos cheia. Foram feitas coletas em três seções (Figura 17), com cinco verticais em cada seção com o emprego do amostrador DH-48 (Figura 20).

Figura 20 – Amostrador DH-48 de sedimentos suspensos



Fonte: Rickly, 2019

Nessas mesmas seções foram coletadas amostras do material do leito segundo metodologia proposta por Carvalho (2008) com o uso de um amostrador caçamba do tipo Van Veen (Figura 21). O procedimento consistiu em lançar o amostrador a jusante da posição do operador e aguardar até que o mesmo atingisse o leito do rio. Em seguida, puxou-se o amostrador de modo que ele englobasse uma quantidade de material do fundo trazendo-se posteriormente à superfície. Por fim, esperou-se até que o excesso de água fosse escoado para fora do amostrador e então o material coletado foi armazenado em um segundo recipiente plástico de maior volume para posterior análise.

Figura 21 – Amostrador de material de leito Van Veen



Fonte: Malaysia Environmental Jornal (2009)

Para a medição da descarga líquida foi utilizado um perfilador acústico doppler (ADP) da marca SONTEK modelo Hydro Surveyor M9 (Figura 22). O procedimento para realizar tal medição consistiu em esticar uma corda de uma margem até a outra e passar o equipamento a uma velocidade menor do que a velocidade do fluxo ao longo da corda, repetindo o procedimento o procedimento de quatro a seis vezes.

Figura 22 – ADP Hydro Surveyor M9



Fonte: Sontek, 2019

3.3.4 Análises de laboratório

As análises de laboratório consistiram na determinação da concentração de partículas sólidas em suspensão e na granulometria do material de leito. Para a

concentração, a amostra passou por membranas de abertura de 0,45 μm , isto é, apenas partículas maiores desse diâmetro ficaram retidas na membrana. Por fim, dividiu-se a massa da parte sólida pelo volume inicial e obteve-se a concentração em mg/L.

Para a granulometria do material de leito, a amostra passou por peneiras com aberturas normatizadas de acordo com NBR NM-ISO 3310 (ABNT, 1997).

3.4 MODELAGEM HIDROSSEDIMENTOLÓGICA

Nesta seção serão abordados os tópicos pertinentes referentes à análise sedimentológica realizada a partir do software HEC-RAS para determinar a descarga sólida total, isto é, o transporte do material de leito e de material suspenso.

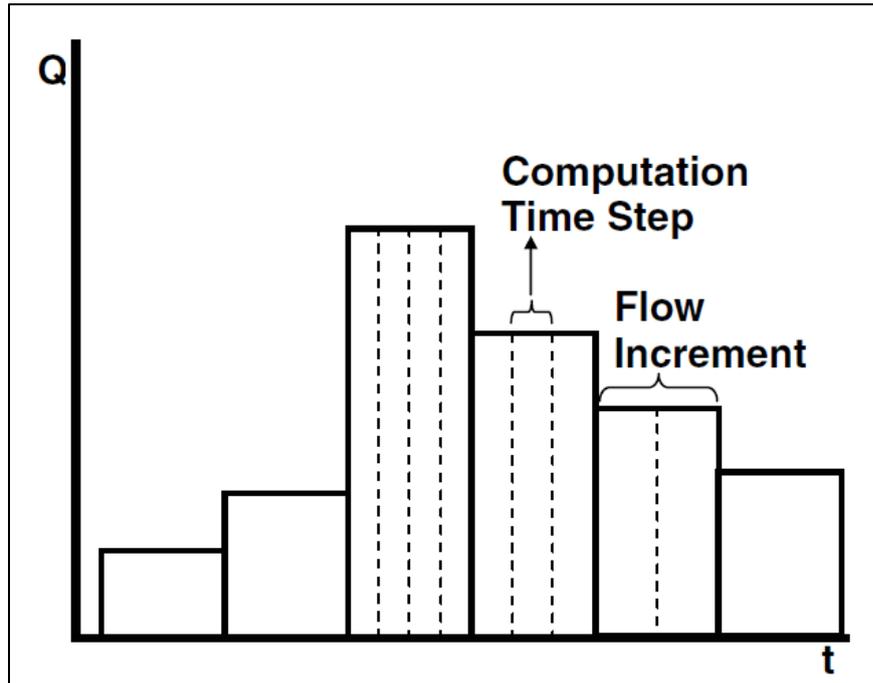
3.4.1 Geometria do rio

Para criar os planos de simulação no software HEC-RAS, foi necessário informar as características geométricas do trecho de estudo, como a extensão do trecho e as características de suas seções, definidas a partir de um levantamento topobatimétrico informando também o coeficiente de rugosidade da equação de Manning baseados na tabela proposta por Chow (2009), 0,065 nas margens e 0,055 no centro do canal.

3.4.2 Séries históricas de vazão

O modelo HEC-RAS trabalha com dois tipos de análise hidráulica associada à sedimentométrica como já dito anteriormente, em fluxo não-permanente e *quasi*-não-permanente. Para o presente estudo foi adotada a abordagem *quasi*-não-permanente, em cuja abordagem a condição de contorno na seção a montante do trecho é uma série de vazões, definidas a partir da série histórica do posto a jusante do trecho de estudo. Como vazões de grande intensidade podem alterar significativamente as características sedimentológicas de um rio (BRUNNER; GIBSON, 2005), foi adotado um procedimento que consiste em dividir os incrementos diários para incrementos menores (Figura 23).

Figura 23 – Divisão dos incrementos diários de vazão em incrementos menores



Fonte: Brunner; Gibson, 2005

A divisão dos incrementos no presente trabalho foi definida de acordo com a Tabela 2.

Tabela 2 – Incrementos computacionais

Q _{máx} [m ³ /s]	Q _{mín} [m ³ /s]	Incremento [h]
0	50	24
50	100	12
100	200	6
200	400	3
400	2500	1

Fonte: Autor, 2018

Uma segunda condição de contorno é necessária para esse tipo de análise que é a condição na seção mais à jusante do trecho, a qual foi adotada a condição de profundidade normal, que consiste em informar o gradiente energético da equação de Manning fixado em 0,00129 obtido a partir do perfil transversal do canal.

3.4.3 Dados sedimentométricos

Na aba do software HEC-RAS em que se definem os dados sedimentométricos, uma série de fatores devem ser escolhidos. Inicialmente se informa qual será a função de transporte utilizada para o leito. No presente estudo, foi escolhida mais de uma função, comparando-se os resultados entre si para escolher a melhor solução, sendo elas:

- a) Ackers-White (1973);

- b) Meyer-Peter & Muller (1948);
- c) Yang (1973).

Todas elas são indicadas para um leito de areia e/ou pedregulho, o qual está de acordo com as características da área de estudo. Além disso, o HEC-RAS calcula a descarga sólida total, incluindo a descarga sólida suspensa para cada uma das funções.

Além da função de transporte, foi definida também a profundidade máxima em que ocorre a degradação do leito, ou seja, a profundidade na qual atinge um ponto que o canal não pode mais ser erodido, geralmente o leito de rocha. Para o presente estudo foi fixado em 1m abaixo do leito inicial em todas as seções.

Em seguida, foram inseridos os dados referentes à granulometria do leito obtidos a partir de coletas em campo e posterior análise em laboratório conforme Carvalho (2008) para leitos seixosos.

Por fim, foi definida uma condição de contorno para a seção à montante do trecho. Dentre as opções, optou-se pela condição da curva-chave de sedimentos suspensos na qual se atribui para cada vazão uma concentração de sedimentos em suspensão e a distribuição granulométrica dessa concentração. Como a definição com dados observados é uma tarefa muito dispendiosa de tempo e recursos, sugere-se que a curva-chave de sedimentos seja um parâmetro a ser calibrado (USACE, 2016).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

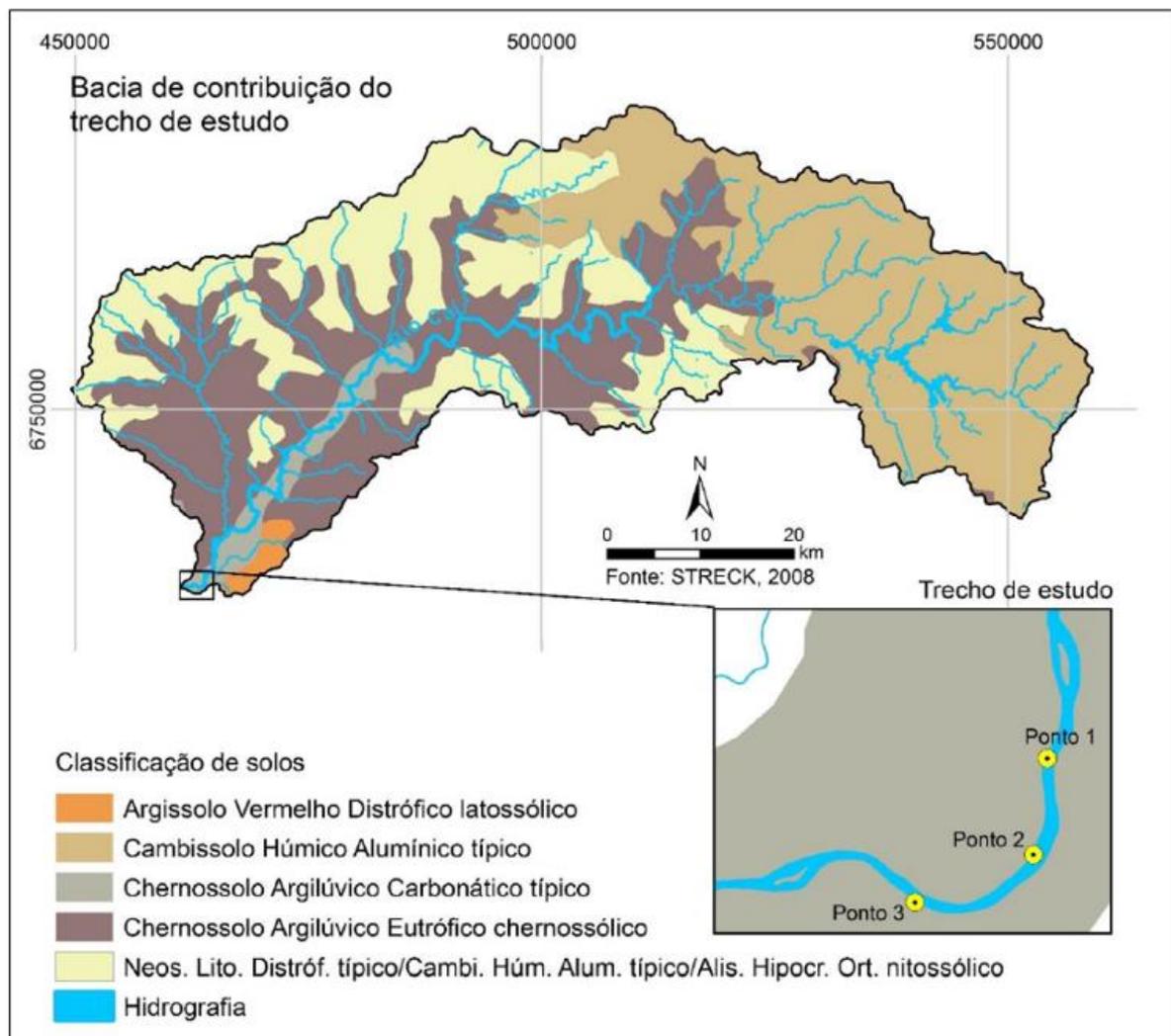
Nesta sessão serão abordados os resultados referentes ao uso e os tipos de solo, bem como à perda de solo, os resultados de concentração e granulometria das coletas realizadas em campo, de descarga sólida e os resultados provenientes da modelagem hidrossedimentológica com o software HEC-RAS.

4.1 TIPOS E USOS DE SOLO

4.1.1 Tipos de solo

A caracterização dos tipos de solo da bacia de contribuição do trecho é apresentada na Figura 24 e a suas porcentagens na Tabela 3.

Figura 24 – Tipos de solo



Fonte: Autor, 2019

Tabela 3 – Tipos de solo e suas extensões

Tipos de solo	Área	
	km ²	%
Argissolo Vermelho Distrófico latossólico	25,62	0,90
Cambissolo Húmico Alumínico típico	1016,64	35,52
Chernossolo Argilúvico Carbonático típico	91,99	3,21
Chernossolo Argilúvico Férrico típico/Neossolo Litólico Eutrófico chernossólico	979,24	34,22
Neos Lito. Distróf. típico/Cambi. Hum. Alum. Típico/Alis. Hipocr. Ort. nitossólico	748,45	26,15
	2861,94	100,00

Observa-se uma predominância de cambissolos e chernossolos, sendo o primeiro concentrado na parte alta da bacia caracterizada por campos e o segundo na parte baixa da mesma caracterizada por relevos com maior declividade. Esses tipos de solo apresentam uma taxa de infiltração muito baixa, gerando um grande escoamento superficial e por consequência uma grande produção de sedimentos através da erosão (SARTORI et al., 2005).

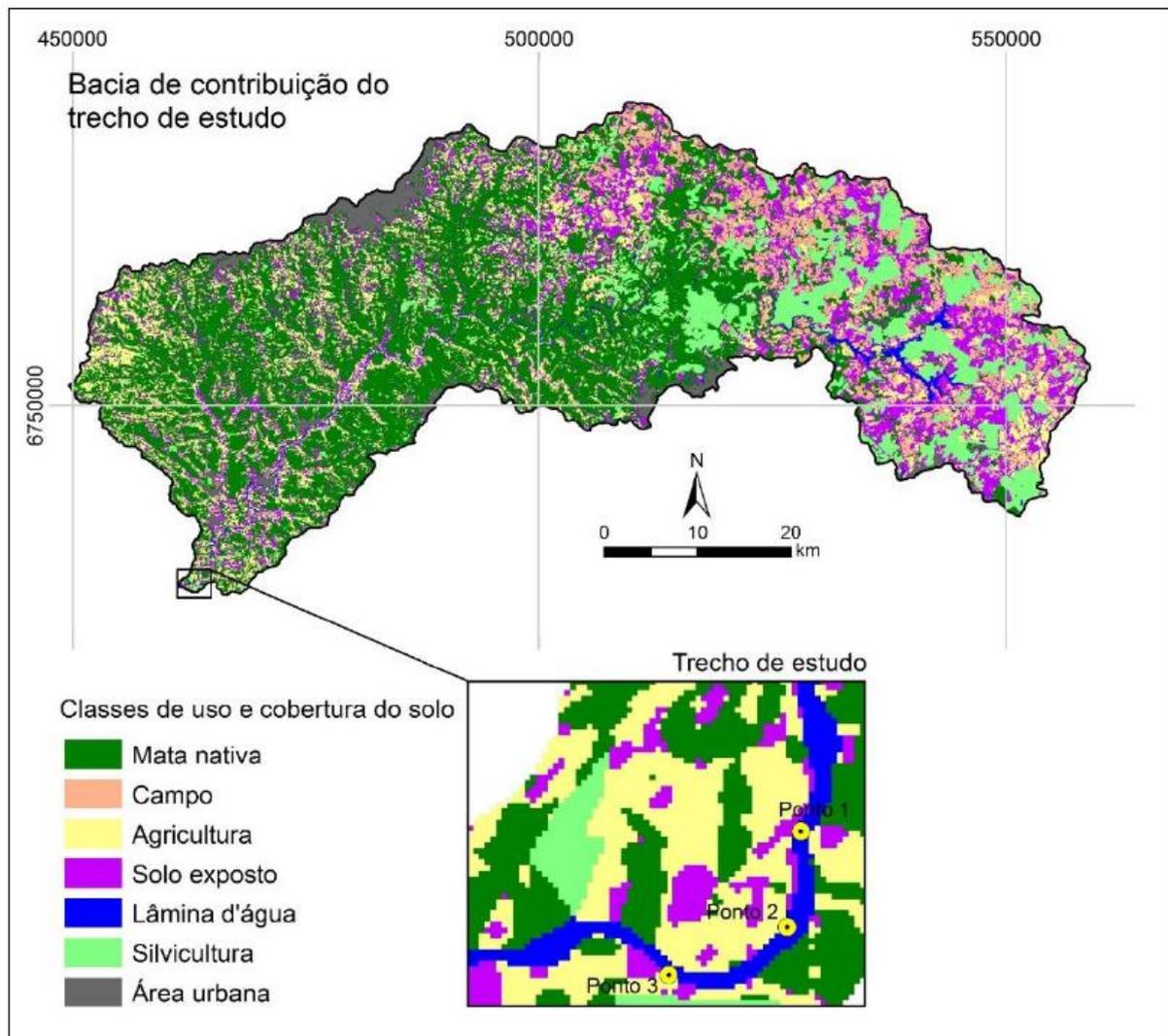
4.1.2 Uso e ocupação do solo

A Figura 25 demonstra os principais usos e ocupações de do solo na bacia e a Tabela 4 indica a extensão de cada uma delas.

Tabela 4 – Uso do Solo

Uso do Solo	Área	
	km ²	%
Mata nativa	1181.49	41.28
Campo	223.52	7.81
Agricultura	522.74	18.27
Solo exposto	495.98	17.33
Lâmina d'água	72.44	2.53
Silvicultura	294.11	10.28
Área urbanizada	71.66	2.50
Total	2861.94	100.00

Figura 25 – Uso e ocupação do solo



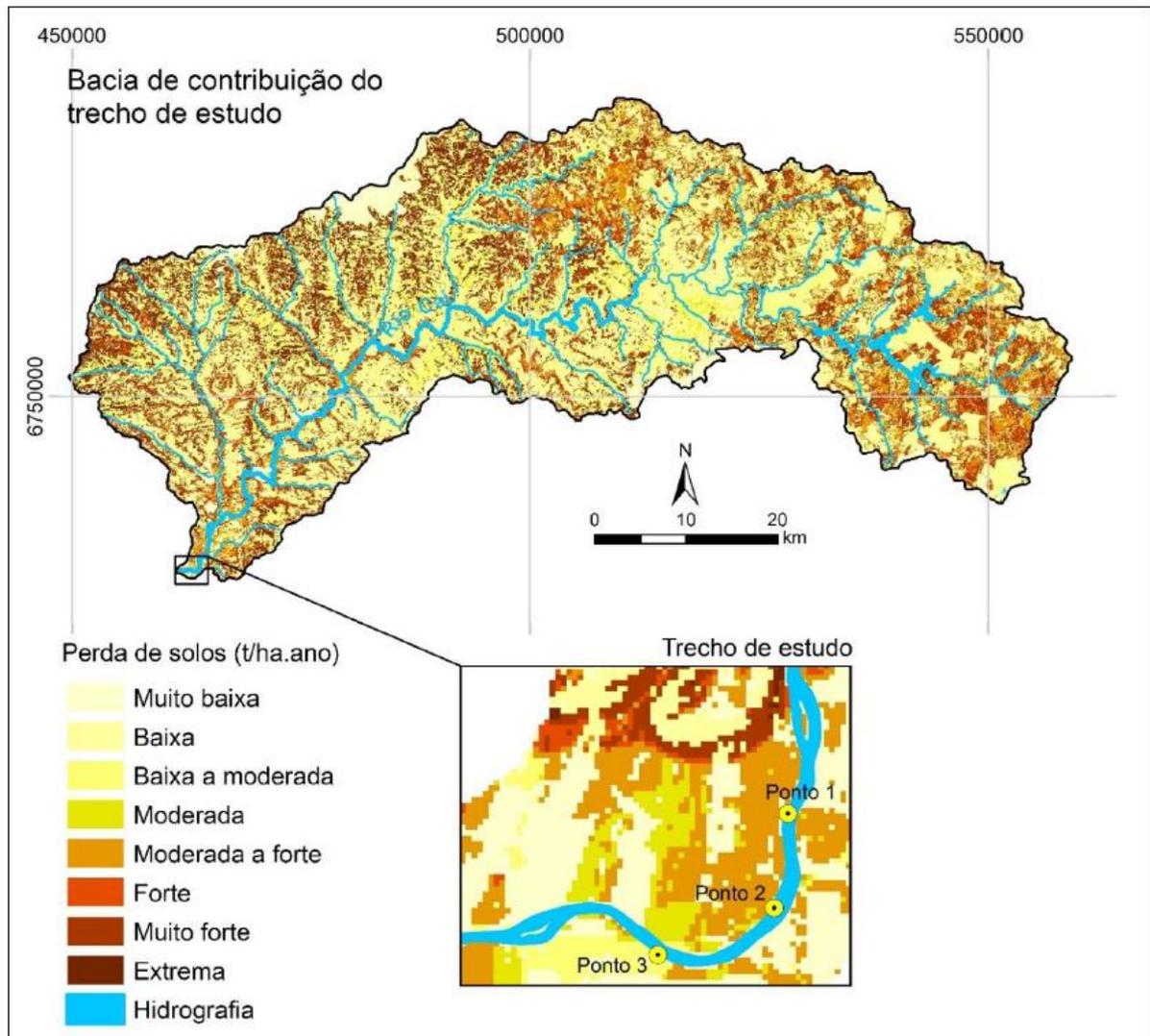
Fonte: Autor, 2019

Observa-se uma predominância de mata nativa, abrangendo 41% de toda a área da bacia seguida por agricultura e solo exposto, totalizando 35% da área. As áreas de solo exposto são as áreas mais responsáveis pela produção de sedimentos.

4.2 PERDA DE SOLOS

Os potenciais de perda de solo calculados a partir da RUSLE são apresentados na Figura 26 e resumidos na Tabela 5.

Figura 26 – Perda de solos



Fonte: Autor, 2019

Tabela 5 – Resumo perda de solos

Perda de solos (t/ha.ano)	Área	
	km ²	%
Muito baixa	216,09	7,55
Baixa	977,82	34,17
Baixa a moderada	611,69	21,37
Moderada	46,03	1,61
Moderada a forte	131,06	4,58
Forte	164,93	5,76
Muito forte	507,32	17,73
Extrema	206,99	7,23
Total	2861,94	100,00

Os locais caracterizados por uma perda de solo de forte a extrema ficaram concentrados nas áreas de maior declividade e de solo exposto. Todavia as áreas com potencial de muito baixo a moderado, caracterizadas por terrenos com menores inclinações e com cobertura vegetal, são as áreas que predominam na bacia,

totalizando em torno de 65% da área. Os valores em termos absolutos variaram de 0 t/ha.ano a um máximo de 192.685,78 t/ha.ano com a média de 1.238,12 t/ha.ano.

4.3 ENSAIOS DE SEDIMENTOS SUSPENSOS E DE LEITO

4.3.1 Concentração de sedimentos suspensos

Os resultados das concentrações de sedimentos suspensos nos três pontos de coleta por filtração de membranas são apresentados na Tabela 6 e resumidos na Tabela 7.

Tabela 6 – Resultados material suspenso

(Continua)

VOLUME TOTAL FILTRADO POR AMOSTRA (mL): 500			
IDENTIFICAÇÃO DA AMOSTRA: PONTO 01		DATA DA COLETA: 12/11/2018	
IDENTIFICAÇÃO DA MEMBRANA	TARA DA MEMBRANA (g)	MASSA MEMBRANA + AMOSTRA (g)	MASSA DA AMOSTRA (mg)
Filto N° 01 - 12/11/2018	0,0867	0,0872	0,50
Filto N° 02 - 12/11/2018	0,0851	0,0856	0,50
Filto N° 03 - 12/11/2018	0,087	0,0879	0,90
Filto N° 04 - 12/11/2018	0,0843	0,0848	0,50
Filto N° 05 - 12/11/2018	0,0871	0,0879	0,80
		Σ [mg.500mL]	3,20
		C [mg.L-1]	6,4
VOLUME TOTAL FILTRADO POR AMOSTRA (mL): 500			
IDENTIFICAÇÃO DA AMOSTRA: PONTO 02		DATA DA COLETA: 12/11/2018	
IDENTIFICAÇÃO DA MEMBRANA	TARA DA MEMBRANA (g)	MASSA MEMBRANA + AMOSTRA (g)	MASSA DA AMOSTRA (mg)
Filto N° 01 - 12/11/2018	0,0848	0,085	0,20
Filto N° 02 - 12/11/2018	0,0848	0,0849	0,10
Filto N° 03 - 12/11/2018	0,0853	0,0859	0,60
Filto N° 04 - 12/11/2018	0,0837	0,0841	0,40
Filto N° 05 - 12/11/2018	0,0834	0,0839	0,50
		Σ [mg.500mL]	1,80
		C [mg.L-1]	3,6
VOLUME TOTAL FILTRADO POR AMOSTRA (mL): 500			
IDENTIFICAÇÃO DA AMOSTRA: PONTO 03		DATA DA COLETA: 12/11/2018	
IDENTIFICAÇÃO DA MEMBRANA	TARA DA MEMBRANA (g)	MASSA MEMBRANA + AMOSTRA (g)	MASSA DA AMOSTRA (mg)
Filto N° 01 - 12/11/2018	0,0834	0,0837	0,30
Filto N° 02 - 12/11/2018	0,0839	0,0844	0,50
Filto N° 03 - 12/11/2018	0,0817	0,0822	0,50
Filto N° 04 - 12/11/2018	0,0837	0,084	0,30
Filto N° 05 - 12/11/2018	0,0853	0,0858	0,50

(Conclui)

		Σ [mg.500mL]	2,10
		C [mg.L-1]	4,2
VOLUME TOTAL FILTRADO POR AMOSTRA (mL): 500			
IDENTIFICAÇÃO DA AMOSTRA: PONTO 02		DATA DA COLETA: 10/12/2018	
IDENTIFICAÇÃO DA MAMBRANA	TARA DA MEMBRANA (g)	MASSA MEMBRANA + AMOSTRA (g)	MASSA DA AMOSTRA (mg) (Conclui)
Filto N° 01 - 12/11/2018	0,0841	0,0847	0,60
Filto N° 02 - 12/11/2018	0,0836	0,0845	0,90
Filto N° 03 - 12/11/2018	0,0839	0,0843	0,40
Filto N° 04 - 12/11/2018	0,0841	0,0844	0,30
Filto N° 05 - 12/11/2018	0,084	0,0847	0,70
		Σ [mg.500mL]	2,90
		C [mg.L-1]	5,8
VOLUME TOTAL FILTRADO POR AMOSTRA (mL): 500			
IDENTIFICAÇÃO DA AMOSTRA: PONTO 03		DATA DA COLETA: 10/12/2018	
IDENTIFICAÇÃO DA MAMBRANA	TARA DA MEMBRANA (g)	MASSA MEMBRANA + AMOSTRA (g)	MASSA DA AMOSTRA (mg)
Filto N° 01 - 12/11/2018	0,0823	0,0827	0,40
Filto N° 02 - 12/11/2018	0,0828	0,083	0,20
Filto N° 03 - 12/11/2018	0,0837	0,0843	0,60
Filto N° 04 - 12/11/2018	0,0837	0,084	0,30
Filto N° 05 - 12/11/2018	0,0816	0,0822	0,60
		Σ [mg.500mL]	2,10
		C [mg.L-1]	4,2

Fonte: Autor, 2019

Tabela 7 – Resumo da concentração sedimentos suspensos

Local	Concentração (mg/L)		
	12/11/2018	10/12/2018	Média
Ponto 1	6,4	-	6,4
Ponto 2	3,6	5,8	4,7
Ponto 3	4,2	4,2	4,2
			5,1

Fonte: Autor, 2019

Os resultados das coletas variaram de 3,6 a 6,4 mg/L com média de 5,1 mg/L entre todas as amostras, sendo que no ponto 1 foi possível realizar coleta em apenas uma ocasião a coleta.

4.3.2 Granulometria dos sedimentos do leito

Os sedimentos de leito que passaram por um peneiramento cujos resultados são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Resumo do ensaio granulométrico do material de leito

Ponto 1 mm	Coleta 1		Coleta 2	
	Percentual do total (%)	Percentual acumulado (%)	Percentual do total (%)	Percentual acumulado (%)
50	0,000	0,00	14,20	14,20
37,5	15,160	15,16	18,58	32,78
25	20,440	35,60	11,48	44,26
19	12,480	48,08	10,59	54,85
4,75	34,550	82,63	24,03	78,88
2	2,780	85,41	6,96	85,84
1	1,920	87,33	4,59	90,43
0,5	7,300	94,63	2,82	93,24
0,25	4,790	99,42	4,78	98,03
0,125	0,390	99,81	1,71	99,74
0,045	0,090	99,90	0,19	99,93
<0,045	0,100	100,00	0,07	100,00

Ponto 2 mm	Coleta 1		Coleta 2		Coleta 3	
	Percentual do total (%)	Percentual acumulado (%)	Percentual do total (%)	Percentual acumulado (%)	Percentual do total (%)	Percentual acumulado (%)
50	0,00	0,00	2,21	2,21	3,72	3,72
37,5	12,15	12,15	29,25	31,47	15,35	19,06
25	31,12	43,27	23,37	54,84	34,51	53,57
19	15,21	58,48	13,90	68,74	13,70	67,28
4,75	25,52	84,00	24,27	93,02	19,08	86,35
2	4,55	88,55	2,21	95,23	4,34	90,70
1	2,36	90,91	0,97	96,20	3,05	93,75
0,5	2,19	93,09	0,62	96,82	2,06	95,81
0,25	5,07	98,16	2,21	99,03	3,15	98,96
0,125	1,31	99,48	0,83	99,86	0,90	99,86
0,045	0,26	99,74	0,07	99,93	0,10	99,97
<0,045	0,26	100,00	0,07	100,00	0,03	100,00

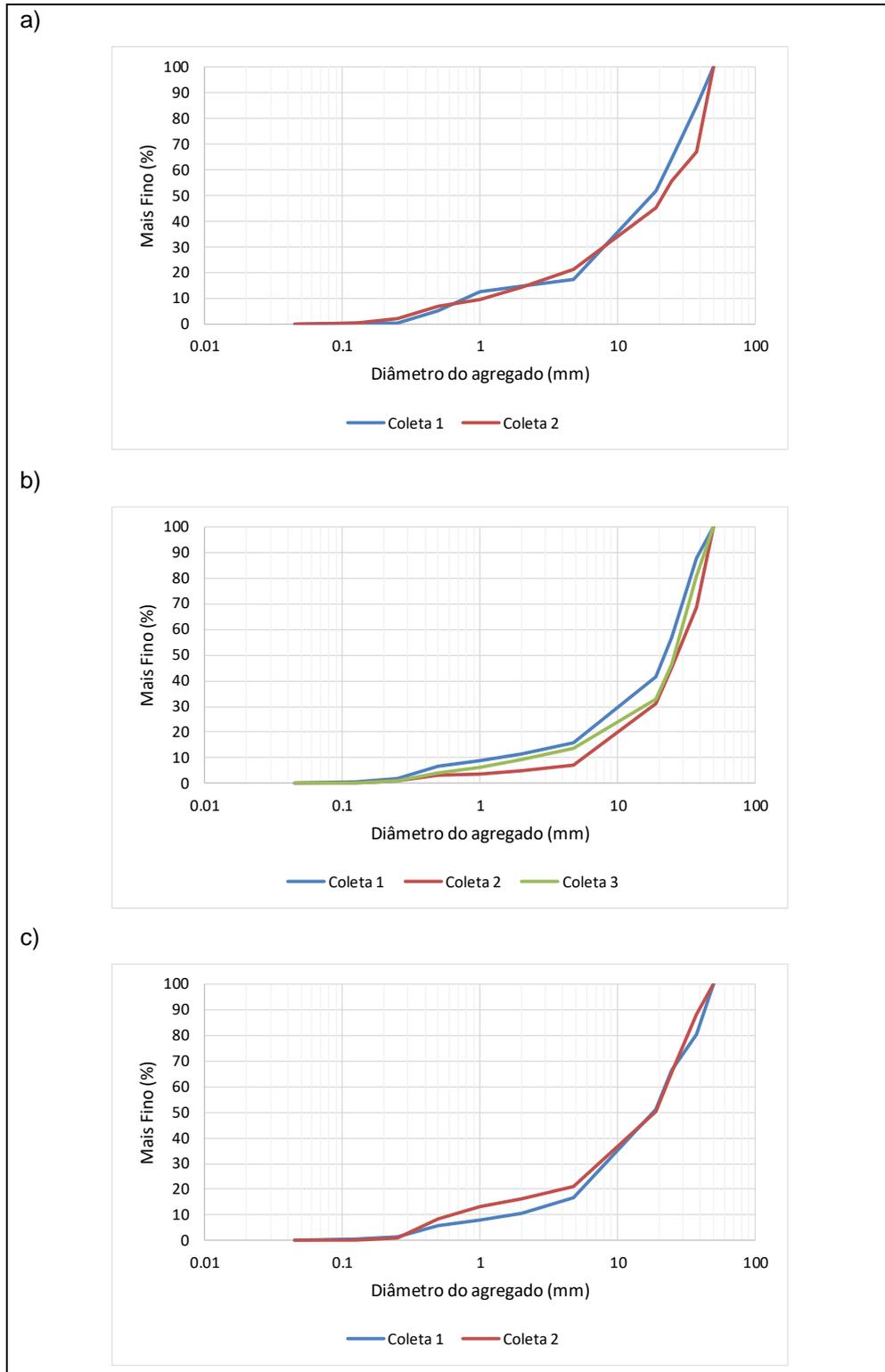
Ponto 3 mm	Coleta 1		Coleta 2	
	Percentual do total (%)	Percentual acumulado (%)	Percentual do total (%)	Percentual acumulado (%)
50	9,88	9,88	0,00	0,00
37,5	9,79	19,67	11,67	11,67
25	14,00	33,68	22,89	34,56
19	15,12	48,80	15,29	49,85
4,75	34,54	83,33	29,07	78,92
2	6,10	89,43	4,89	83,81
1	2,75	92,18	2,79	86,60
0,5	2,15	94,33	4,89	91,49
0,25	4,12	98,45	7,38	98,87
0,125	1,12	99,57	0,98	99,85
0,045	0,26	99,83	0,08	99,92
<0,045	0,17	100,00	0,08	100,00

Fonte: Autor, 2018

Os resultados podem também ser observados através das curvas granulométricas exibidas na

Figura 27.

Figura 27 – Curva granulométrica dos pontos 1 (a), 2 (b) e 3 (c)



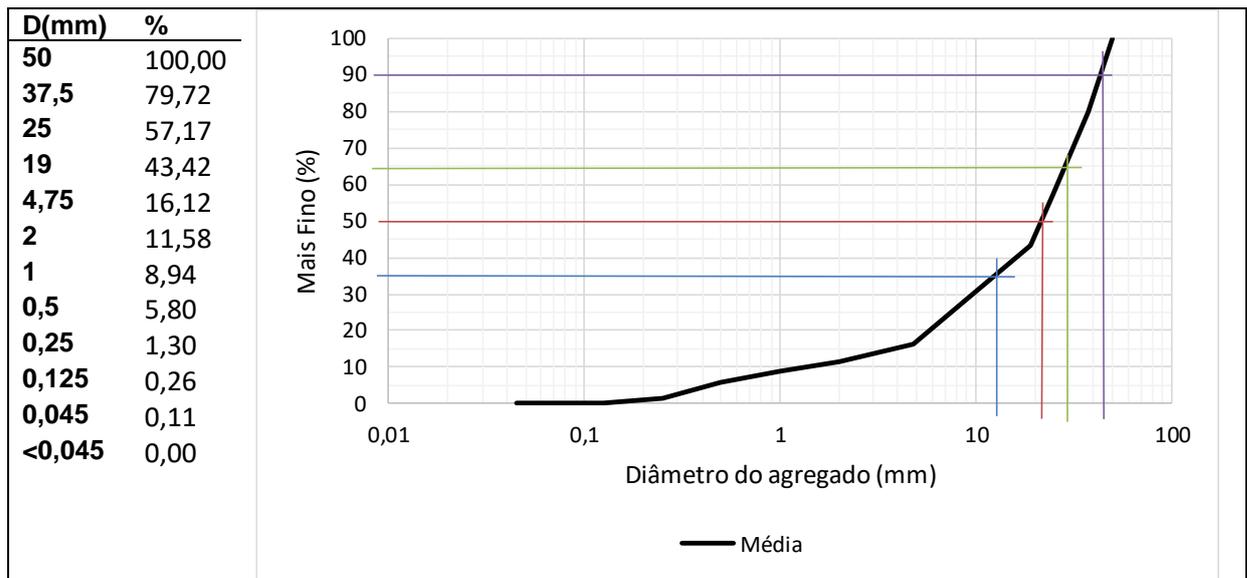
Fonte: Autor, 2019

Observa-se nos resultados que em todas as amostras os sedimentos com mais de 19 mm de diâmetro representaram pelo menos 48% da amostra, chegando a

um máximo de 68,64%. De acordo com a classificação de Weil e Brady (2016) os sedimentos predominantes da amostra podem ser classificados como pedregulho, de 90,70% a 83,81%, e por consequência, 9,30% e 16,19% classificados como areia. Os percentuais de silte a argila, menor que 0,05 mm, não chegam a 1% da amostra.

A Figura 28 apresenta a média das amostragens do material de leito referente à granulometria e os diâmetros notáveis D35, D50, D65 e D90.

Figura 28 – Resumo das amostras de sedimentos de leito



Fonte: Autor, 2019

Observa-se que 35% da amostra é de menor diâmetro do que em torno de 11 mm (D35), 50% menor do que 21 mm (D50), 65% menor que 30 mm (D65) e 90% menor que em torno de 45 mm (D90), indicando uma classificação de pedregulho (WEIL; BRADY, 2016).

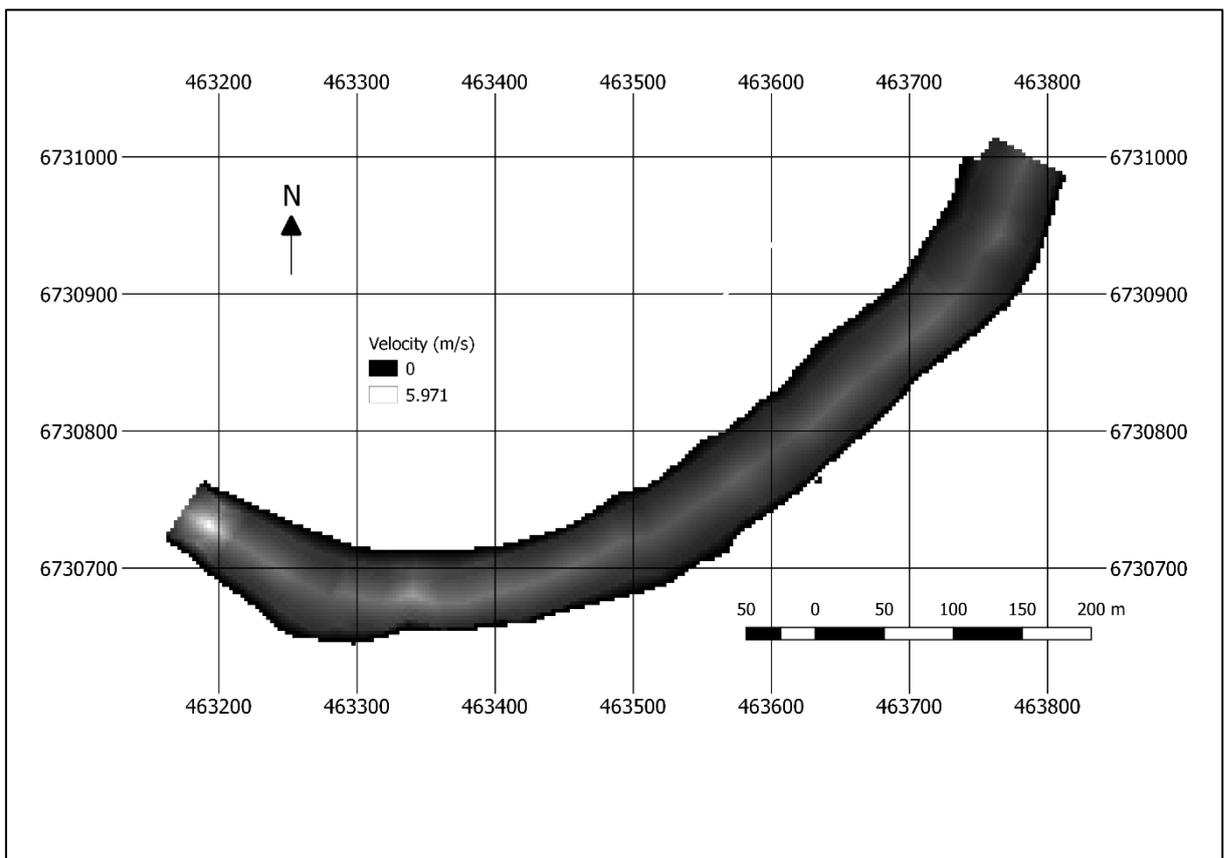
Tendo em vista essa característica do leito, Bradley *et al.* (1998) aponta que a modelagem das etapas do processo hidrossedimentológico para este tipo de rio é uma tarefa ainda mais difícil do que dos demais. Os autores salientam que não existe uma metodologia que auxilie o operador a escolher a função que melhor se adequa às características do rio em estudo, por isso uma alternativa é comparar os resultados de mais de uma função, o que foi feito no trabalho.

4.4 MODELAGEM HIDROSEDIMENTOLÓGICA

4.4.1 Perfil de velocidades

Para melhor compreender os fenômenos de deposição e erosão, é importante entender como funciona a distribuição de velocidades do fluxo ao longo do canal (VAN DE GRAAF; VAN OVEREEM, 1979). Para isso gerou-se um mapa de distribuição de velocidades com a velocidade do fluxo no trecho de estudo (Figura 29), sendo as cores mais vermelhas as maiores velocidades. O mapa foi gerado a partir de uma simulação em fluxo permanente no HEC-RAS com o dado de maior vazão da série temporal, cujos resultados foram posteriormente importados para o ArcGIS através do *plugin* HEC-GeoRAS e criado o mapa.

Figura 29 – Distribuição de velocidades no canal



Fonte: Autor, 2019

Observa-se uma velocidade de maior magnitude mais próxima do centro do canal, onde encontram-se as maiores profundidades e onde fica-se mais distante das margens. Outro fator observado é de que as maiores velocidades se encontram levemente mais próximas ao lado aberto da curva. Por fim, observa-se uma

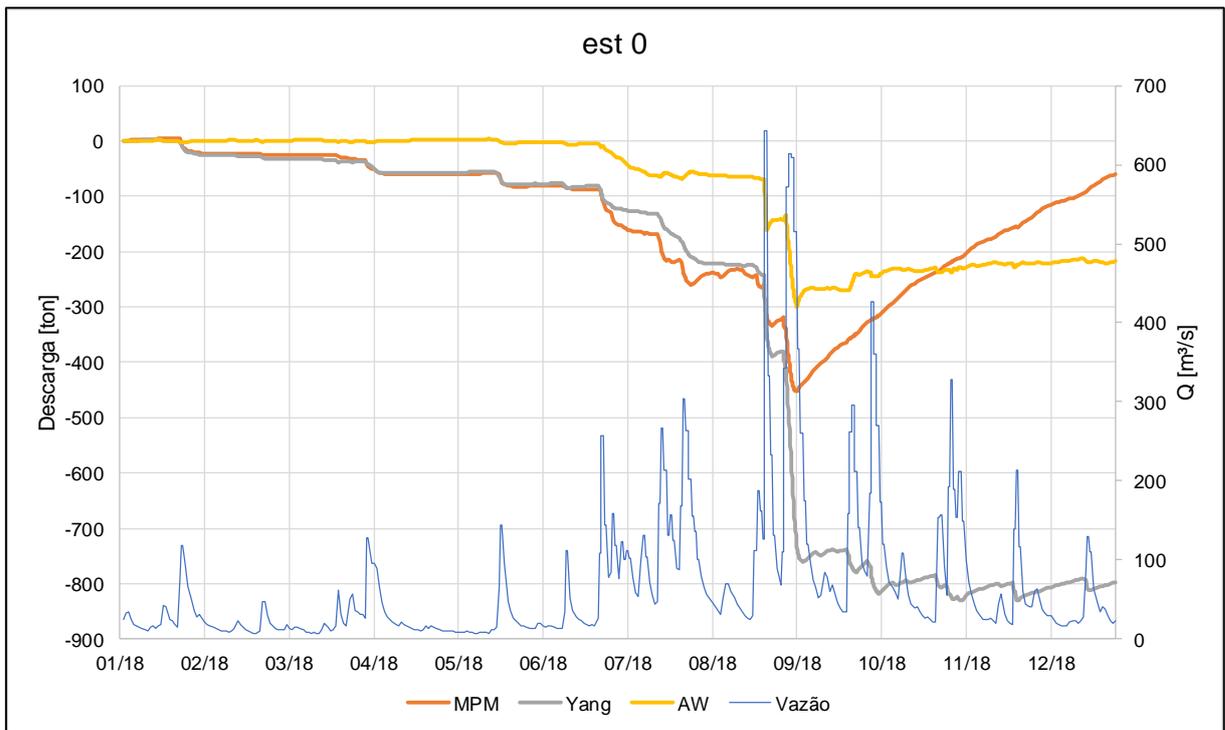
concentração de velocidades elevadas próximas à seção a jusante do canal. Esse fato ocorre devido ao estreitamento do canal no ponto referido.

4.4.2 Descarga sólida de leito

Os resultados da descarga sólida do leito são apresentados na 30 a

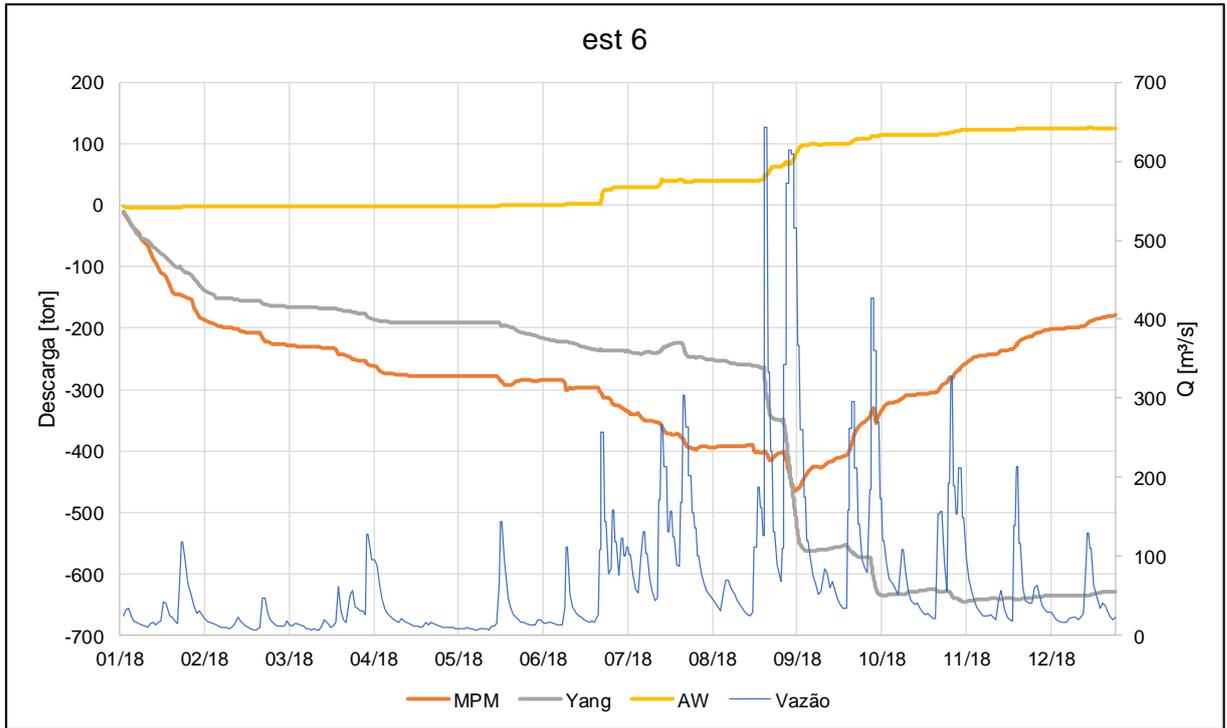
Figura 35 em conjunto com a vazão observada para as seções que apresentam depósitos de seixos de acordo com levantamento topobatimétrico (Figura 18). Os gráficos apontam a descarga sólida de leito acumulada (eixo y) ao longo da série temporal (eixo x) onde valores positivos apontam deposição e os negativos caracterizam erosão, além de demonstrar também as vazões observadas.

30 – Descarga sólida de leito da estaca 0



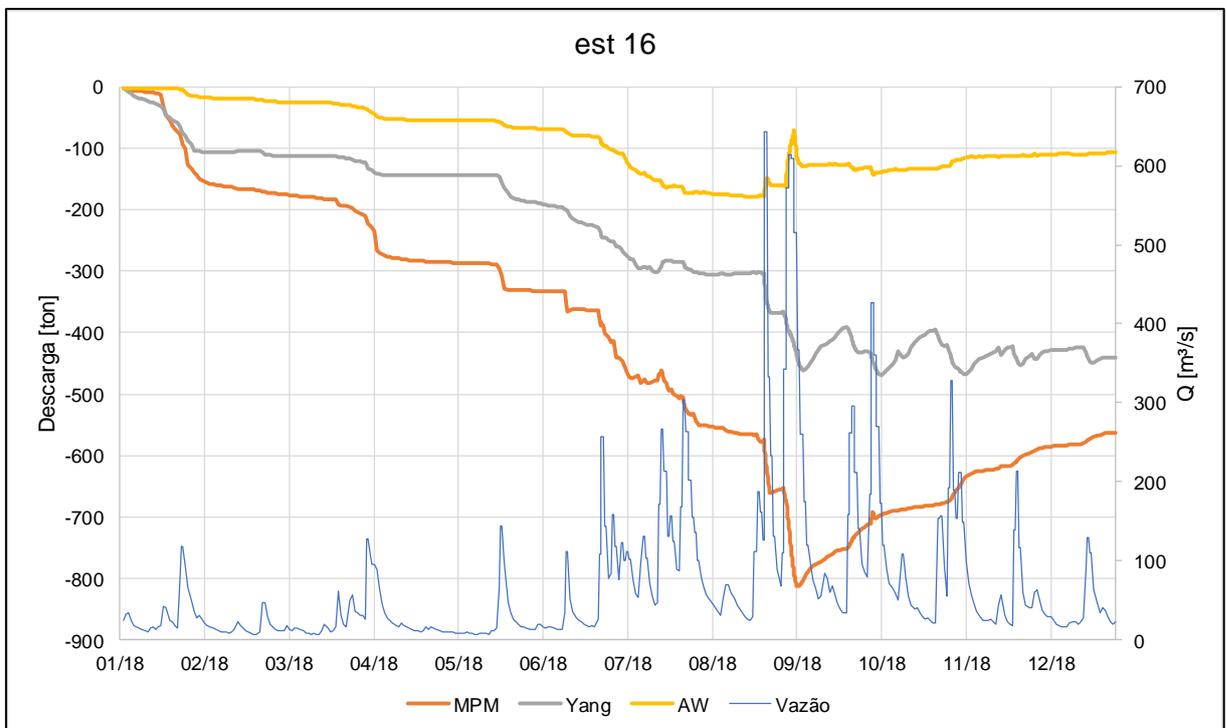
Fonte: Autor, 2019

Figura 31 - Descarga s3lida de leito da estaca 6



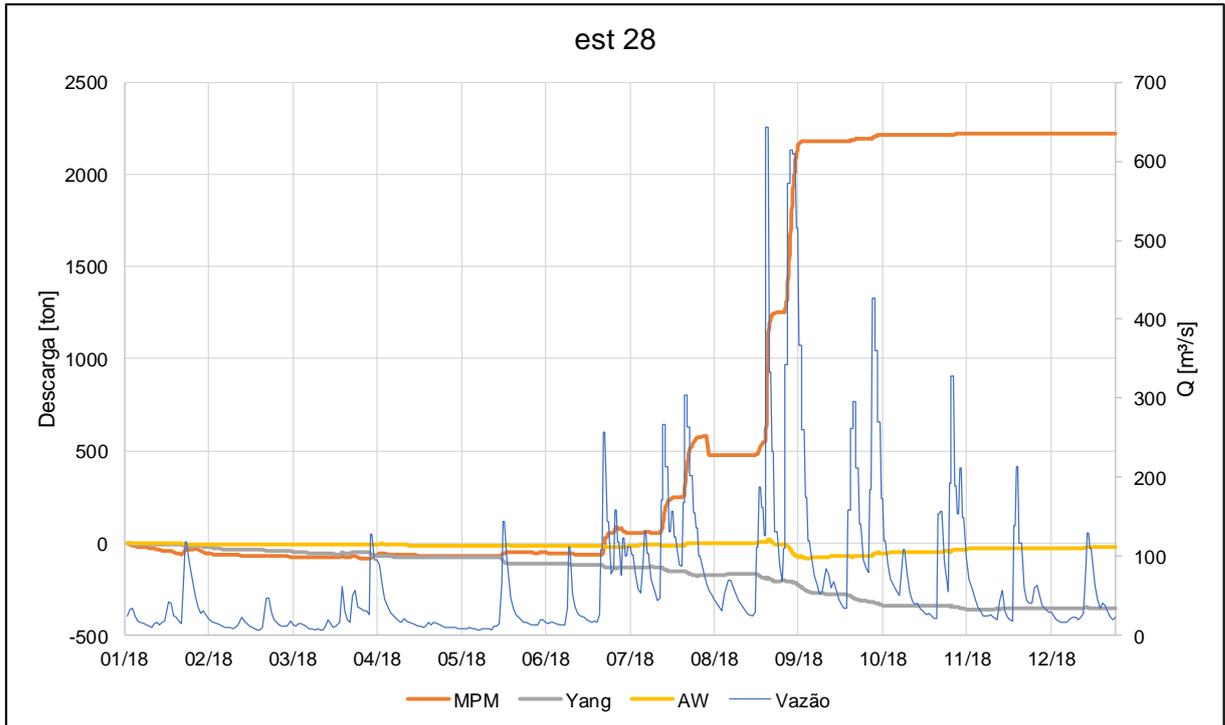
Fonte: Autor, 2019

Figura 32 - Descarga s3lida de leito da estaca 16



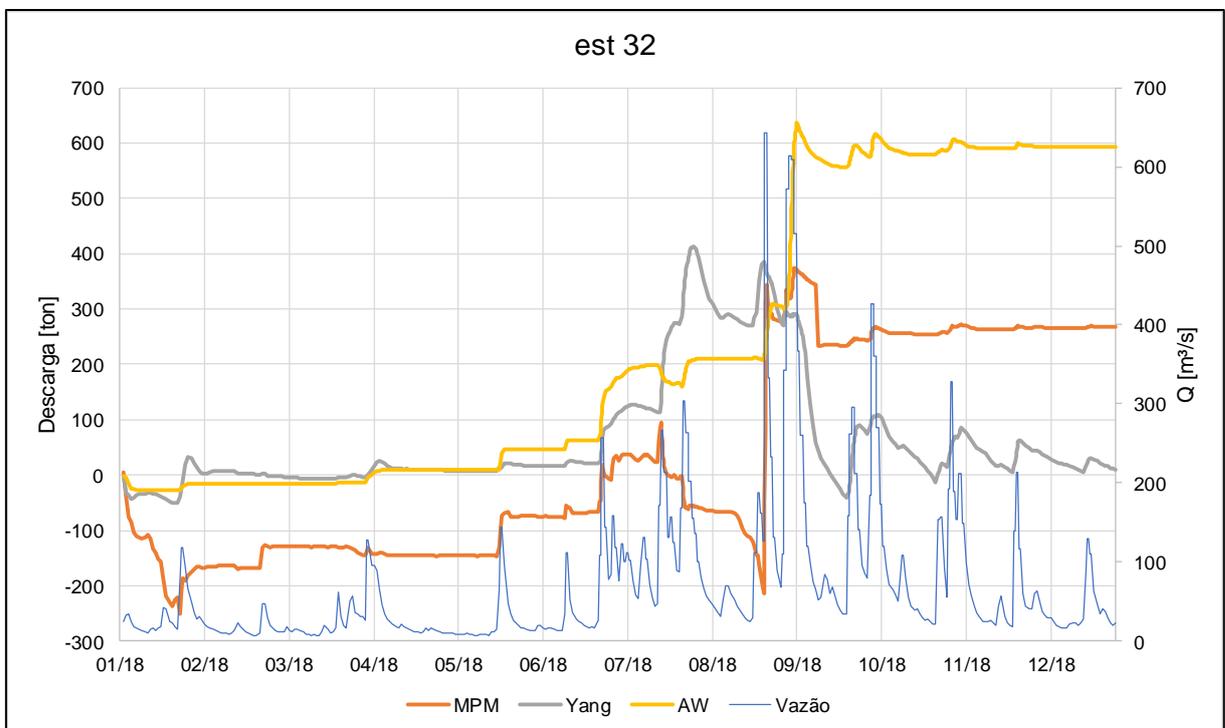
Fonte: Autor, 2019

Figura 33 - Descarga s33lida de leito da estaca 28



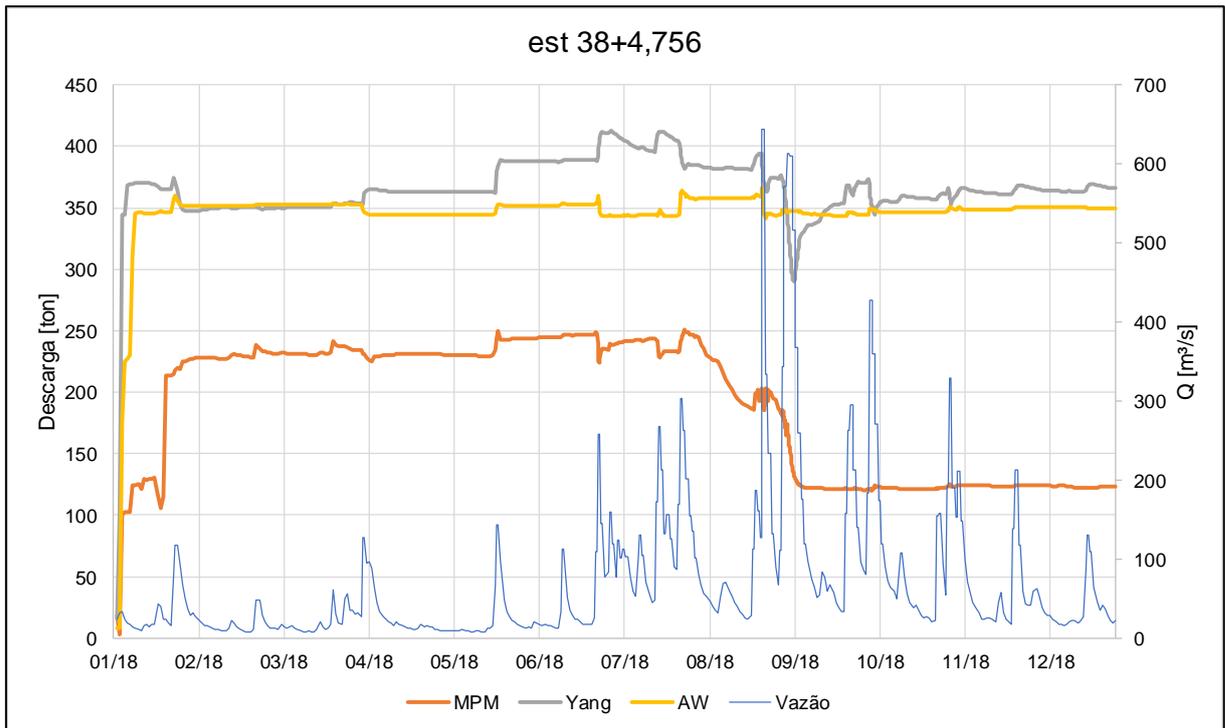
Fonte: Autor, 2019

Figura 34 - Descarga s34lida de leito da estaca 32



Fonte: Autor, 2019

Figura 35 - Descarga sólida de leito da estaca 38+4,756



Fonte: Autor, 2019.

Os resultados demonstram um comportamento, de forma geral, de erosão, balanço final negativo, nas seções a montante e de deposição, balanço final positivo, nas seções a jusante. Na estaca 0, o método de Yang apresentou um balanço final de descarga sólida de aproximadamente -800 toneladas, o com maior balanço em termos absolutos. Nota-se que o comportamento da função de Meyer-Peter & Muller (MPM) apresenta uma decrescente, indicando erosão, até um evento de maio vazão, em torno de 600 m³/s, a partir do qual passou a ocorrer deposição.

Na seção da estaca 6, a função de Ackers-White (AW) foi a única com balanço positivo, indicando deposição, com um valor final de 125 ton. A função de Yang foi a que apresentou a maior erosão, terminando a série temporal com um balanço total negativo de -628 ton. Observa-se que a função de MPM obteve um comportamento semelhante da seção anterior de declínio e posterior crescimento em função do evento de vazão intensa.

Para a estaca 16 todos os métodos apontam erosão, com destaque para a função de MPM que novamente apresentou o mesmo comportamento, e apesar de terminar em ascendência, foi a função que apresentou o balanço final mais negativo de -562 ton.

Para a estaca 28 a função de AW apresentou um comportamento quase que linear, terminando com um balanço final próximo a zero. A função de Yang foi a única a apresentar erosão, isto é, balanço final negativo na ordem de -350 ton. Já a função de MPM a partir do episódio de vazão intensa deu um salto significativo no balanço da descarga de 500 ton a 2200 ton, valor no qual o sistema estabilizou e terminou a série temporal.

Na estaca 32 todos os métodos terminaram a série temporal com balanço final positivo. O método de Yang, apesar de ter alcançado valores de 500 ton positivas, terminou a série com o balanço muito próximo a zero. As funções de AW e MPM tiveram um comportamento semelhante, onde a partir dos eventos de vazão intensa no mês de agosto atingiram um pico na deposição e terminaram a série com um comportamento quase linear. A função de AW terminou a série com o maior balanço, chegando próximo às 600 ton.

Por fim, na estaca 38+4,756, a estaca mais a jusante do trecho, as funções de Yang e AW apresentaram um comportamento praticamente idêntico, ambas terminando a série com valores próximos a 350 ton. A função de MPM chegou a valores de 250 ton, mas a partir dos eventos de vazão intensa diminuiu para 122 ton, valor no qual terminou a série.

Alonso (1980) afirma que a equação de Yang apresenta a aplicabilidade mais confiável dentre as funções disponíveis. Nakato (1990), em seus estudos em um rio com leito variando de areia a cascalho, também aponta para um melhor desempenho da equação de Yang. Ambos também apontam da performance razoável da função de Ackers-White.

A equação de Yang apresenta-se de forma geral como a mais confiável em diversos estudos de previsão de descarga sólida (ALONSO, 1980; NAKATO, 1990; KARMAKER *et al.*, 2010; YEN *et al.*, 2017), todavia Choi e Lee (2014) também apontam que o fato de uma função apresentar um bom desempenho em um rio não significa que também o vá fazer em outro. Outros estudos (NAKATO, 1990; BROWNLIE, 1991) apontam que a função de Ackers-White também traz resultados satisfatórios e dentro destes autores, os que usaram a função de Meyer-Peter & Muller, apontam que é uma função limitada.

Em relação à discrepância de resultados acerca da função MPM, em outros estudos a função apresentou resultados semelhantes (ALONSO, 1980; HABERSACK; LARONNE, 2002; CAMENEN *et al.*, 2002). Uma das causas apontadas para tal

fenômeno é o fato de a função não computar transporte de sedimentos enquanto a tensão cisalhante não for maior do que a tensão cisalhante crítica. Tendo em vista o fato de que é muito difícil calcular essa tensão crítica, é impossível dizer que não há transporte de sedimentos mesmo nas condições supracitadas (CAMENEN *et al.*, 2002).

Wilcock *et al.* (2009) aponta as razões que levam a concluir tal fenômeno que consistem em que, nas equações, acelerações de fluxo pontuais são frequentemente negligenciadas, o que interfere na tensão cisalhante; no fato de que é uma tarefa difícil determinar qual parcela da tensão total atua efetivamente nos sedimentos e por fim o fato de o canal não ser homogêneo, levando as funções a não considerarem fatores locais.

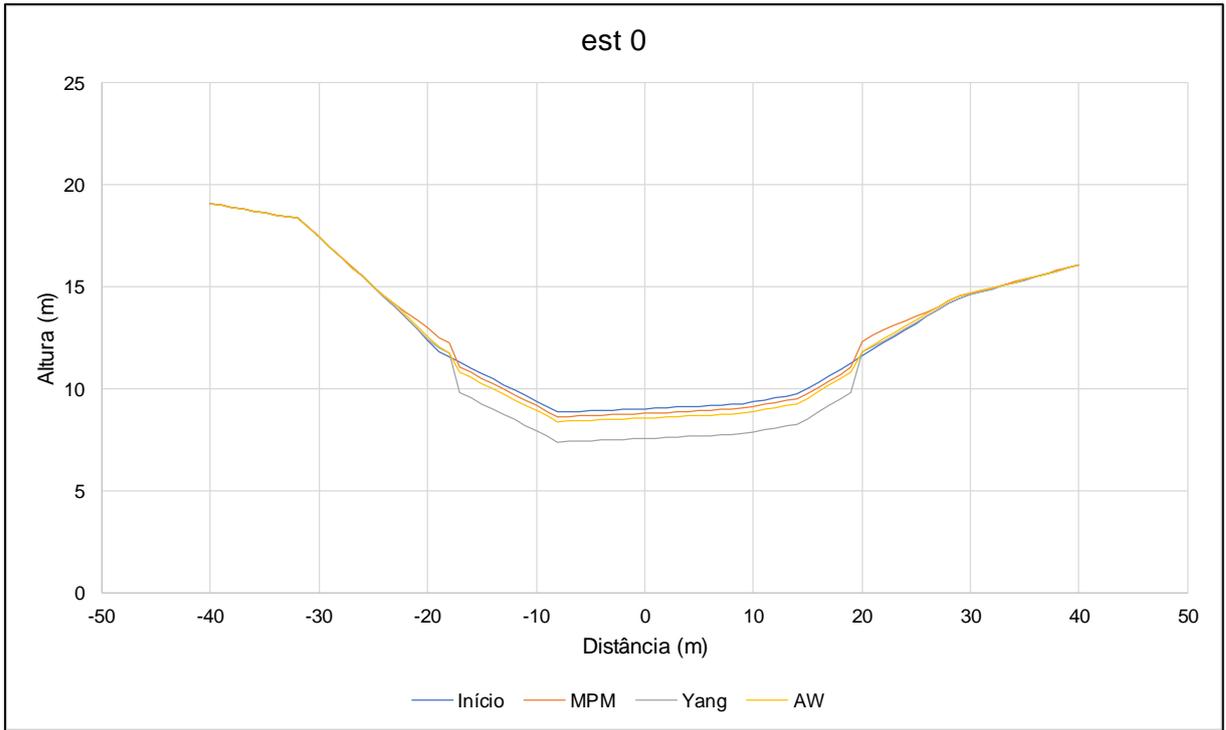
4.4.3 Mudanças no leito

Nesta seção serão apresentados os resultados referentes às mudanças nas seções transversais a fim de indicar as zonas de deposição e erosão. Os resultados foram separados em mudanças nas seções transversais, onde foram escolhidas seções representativas do leito, e identificação das zonas de deposição e erosão a partir de uma visualização em planta.

4.4.3.1 Seções transversais

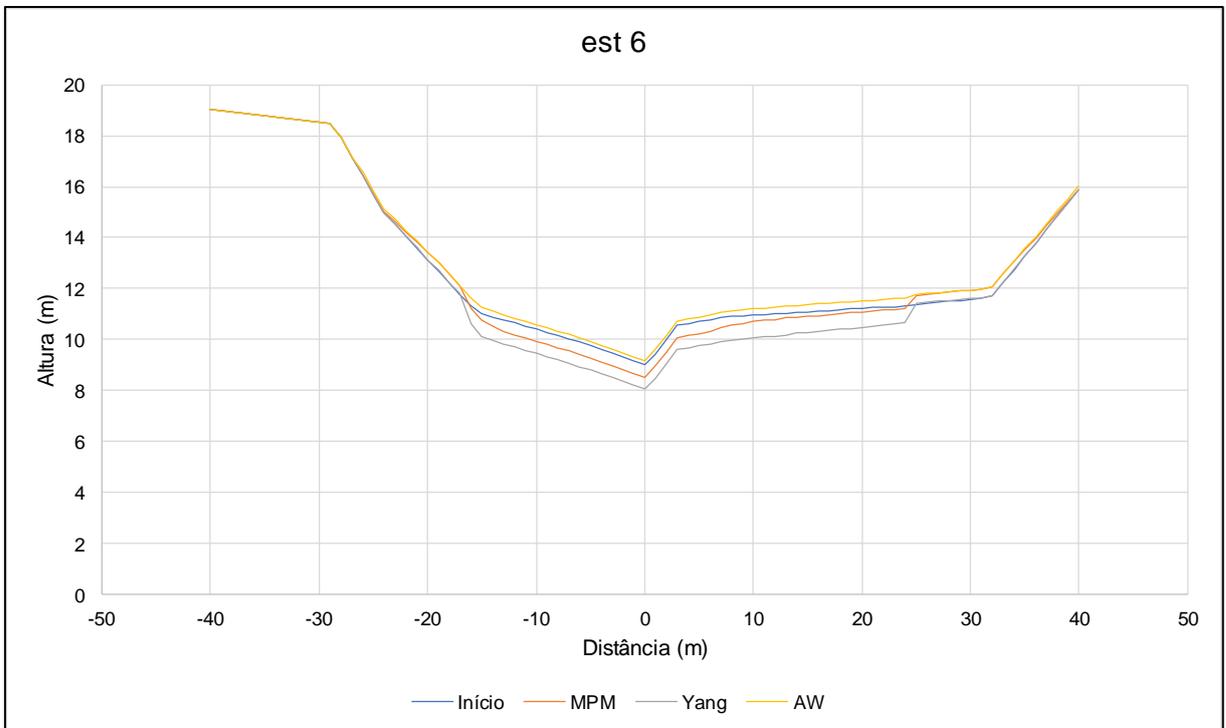
As seções escolhidas para a representação gráfica são aquelas em que atualmente se observa zonas de seixo, isto é, zonas de concentração de sedimentos grosseiros. Além destas, representa-se também as seções de montante e jusante (Figura 36 a Figura 41).

Figura 36 – Seção transversal estaca 0



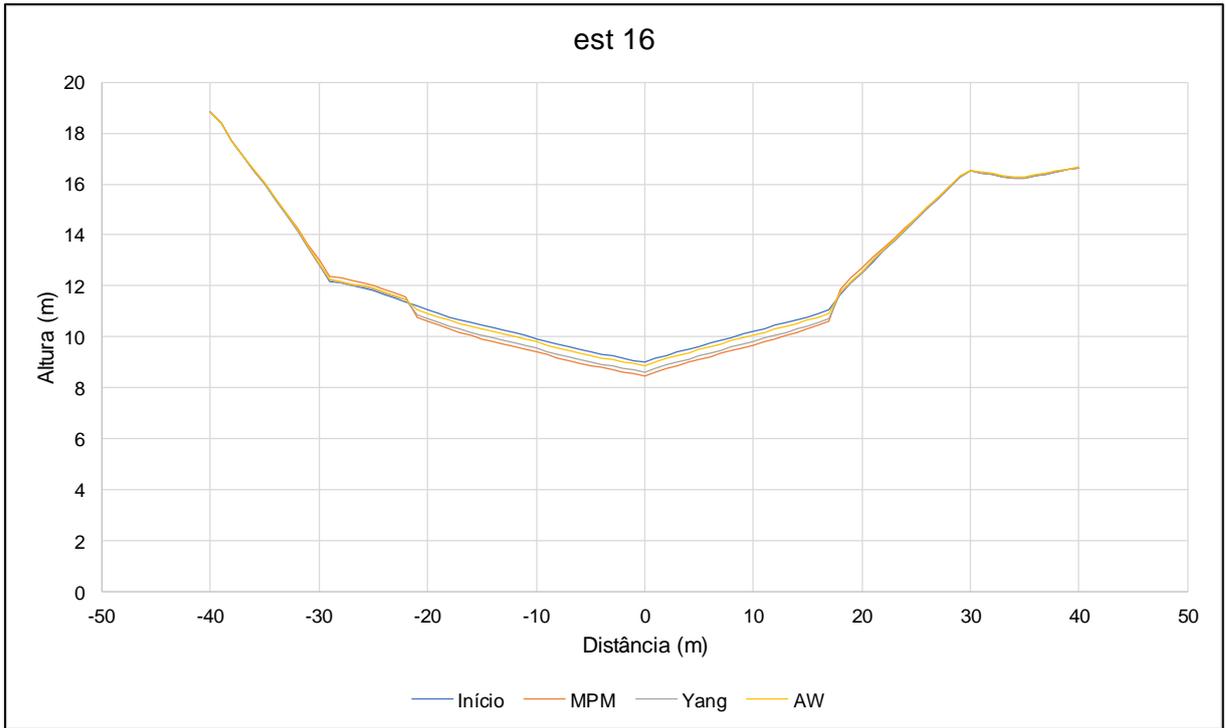
Fonte: Autor, 2019

Figura 37 - Seção transversal estaca 6



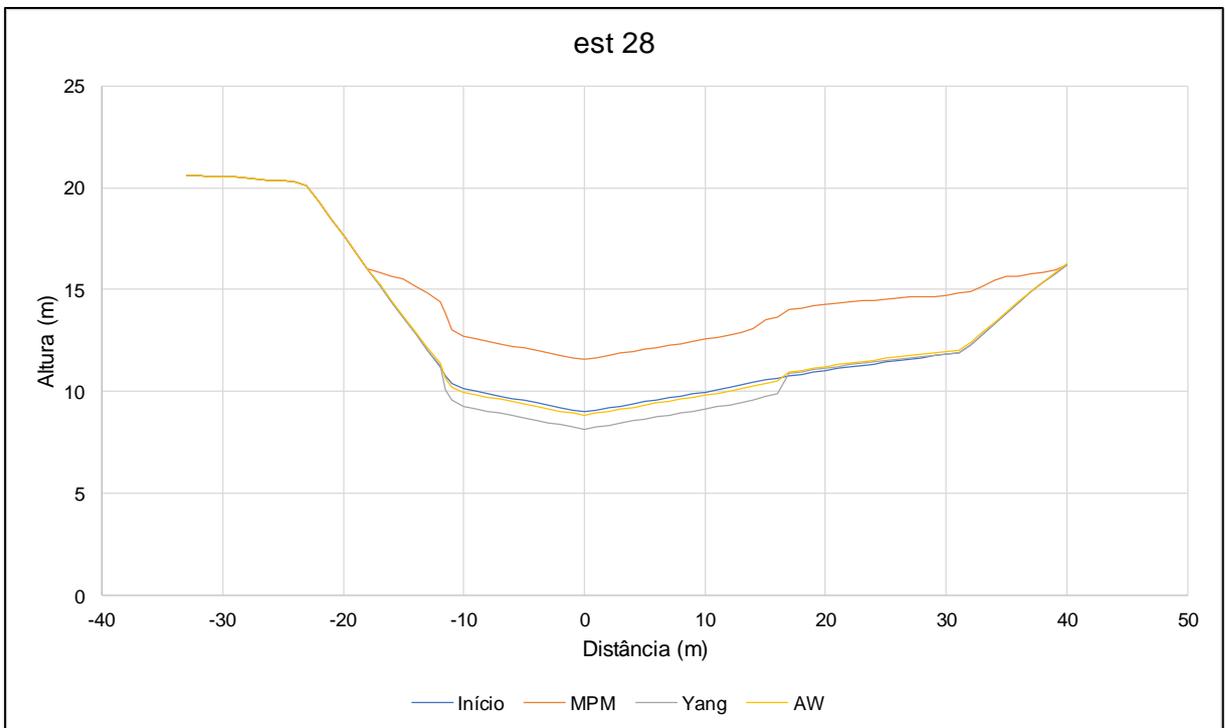
Fonte: Autor, 2019

38 - Seção transversal estaca 16



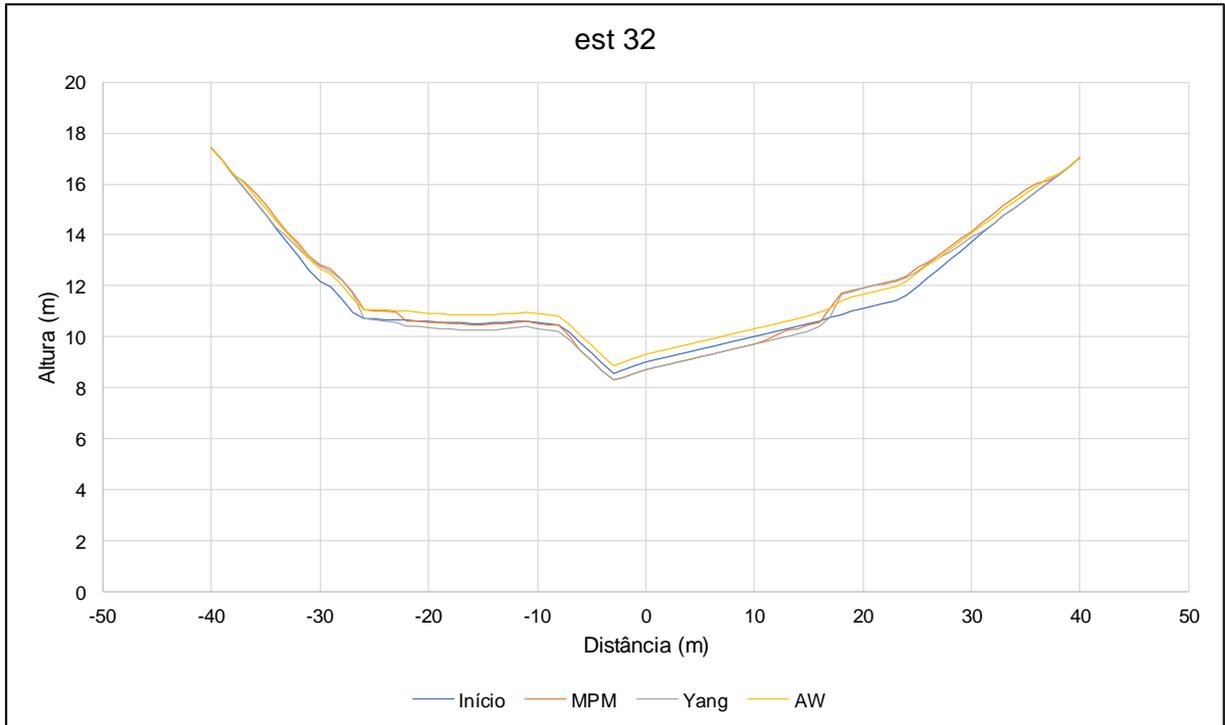
Fonte: Autor, 2019

Figura 39 - Seção transversal estaca 28



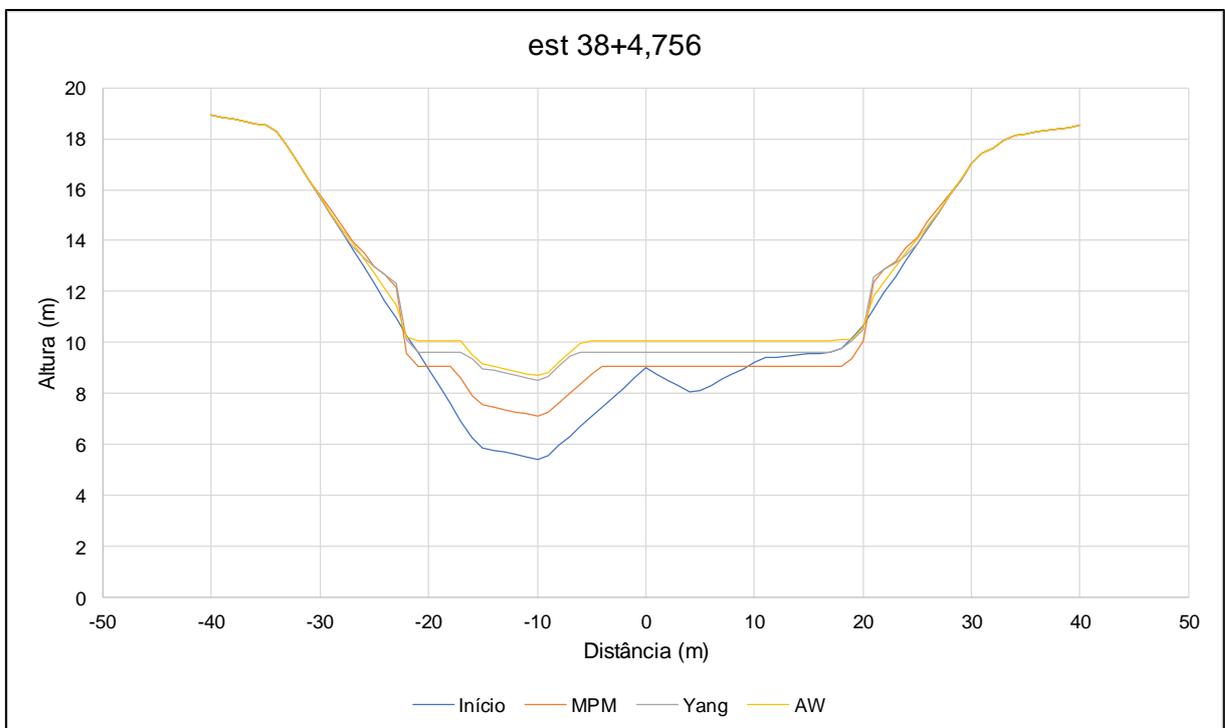
Fonte: Autor, 2019

40 - Seção transversal estaca 32



Fonte: Autor, 2019

Figura 41 - Seção transversal estaca 34+4,576



Fonte: Autor, 2019.

De forma geral, os resultados da mudança do leito demonstram bastante coerência com os resultados obtidos na descarga sólida. Na estaca 0 (zero), a função de Yang apresentou a maior erosão, chegando a 1,46 m no centro do canal. Nota-se

que todas as funções apresentaram uma pequena parte de deposição nas margens, chegando a um máximo de 69 cm pelo método de MPM.

Na seção da estaca 6, em conformidade com a descarga sólida, a função de AW foi a única que apresentou deposição no centro do canal de 17 cm. A função com maior erosão no centro ficou a cargo da função de Yang, de 95 cm. A maior deposição na margem foi obtida pela função de AW, com 37 cm.

Na estaca 16, todos os métodos apresentaram erosão. Na zona de deposição de seixo a função com maior deposição foi a de MPM com 20 cm.

Na estaca 28 nota-se uma disparidade muito grande do método de MPM em relação aos demais, indicando uma deposição de mais de 2,5 m de sedimentos no centro do canal, em comparação com 84 cm para Yang e 16 para AW. Na zona de seixo a disparidade é ainda maior, tem-se mais de 3 m de deposição em comparação de 11cm para Yang e 18 cm para AW.

Na seção de jusante do trecho observa-se também uma tendência de deposição chegando a 3,2 m para AW. Uma possível explicação é o fato que imediatamente a montante da seção existe um estreitamento do canal que causa um aumento significativo na velocidade e que provavelmente causa uma transição para um escoamento turbulento. Logo em seguida o canal alarga novamente e a velocidade diminui, propiciando um cenário ideal para deposição de sedimentos.

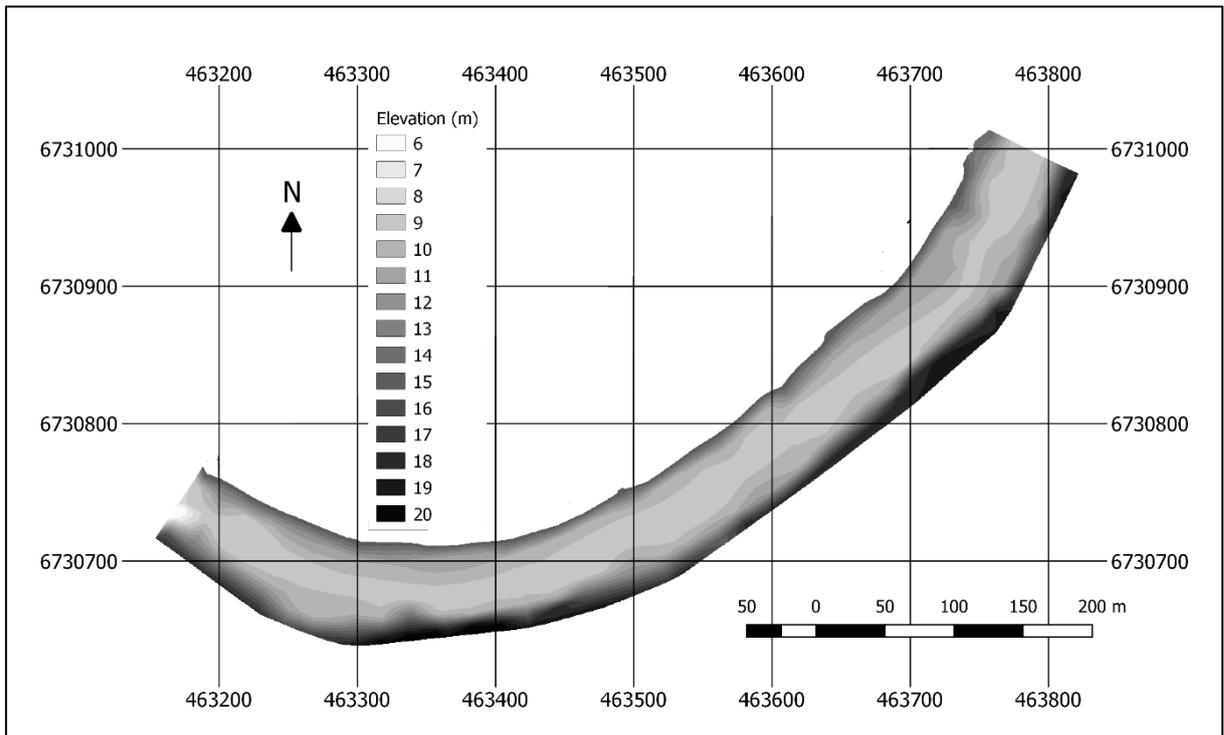
Alonso (1980) já apontava as limitações da função de MPM concluindo que para a sua respectiva área de estudo tal função foi a que apresentou o pior rendimento. O autor comparou os resultados calculados com resultados observados em 40 medições em campo a partir de uma razão que ele chamou de razão de discrepância. Tal função é a mais antiga de todas e passou inclusive por revisões (WONG; PARKER, 2006) devido às suas limitações de estimar o transporte de sedimentos quando a tensão cisalhante nos sedimentos é menor do que a tensão crítica.

Habersack e Laronne, (2002) apontam que funções de transporte que levam em conta *stream power*, como a de Yang, ao invés do ponto limite de tensão cisalhante, como Ackers-White e Meyer-Peter e Muller tendem a levar a melhores resultados. Os autores apontam também que os resultados ficam condicionados ao período de tempo no qual a simulação é feita.

4.4.3.2 Zonas de deposição e erosão

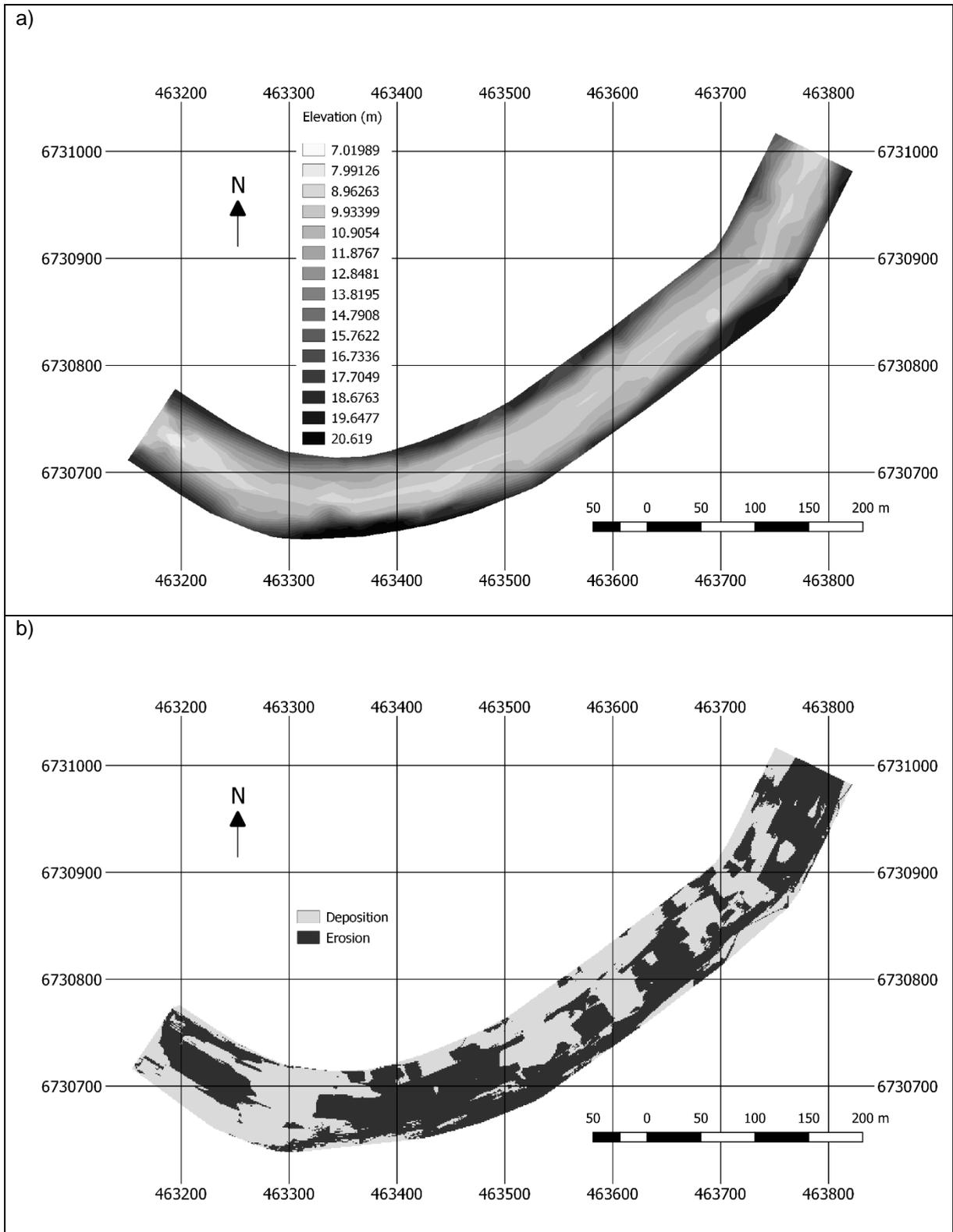
Nesta seção são apresentadas as zonas de deposição e erosão na totalidade do trecho, comparando o início da série temporal (Figura 42), com o final da série com cada um dos métodos (Figura 43 a Figura 45).

Figura 42 – Leito do trecho interpolado



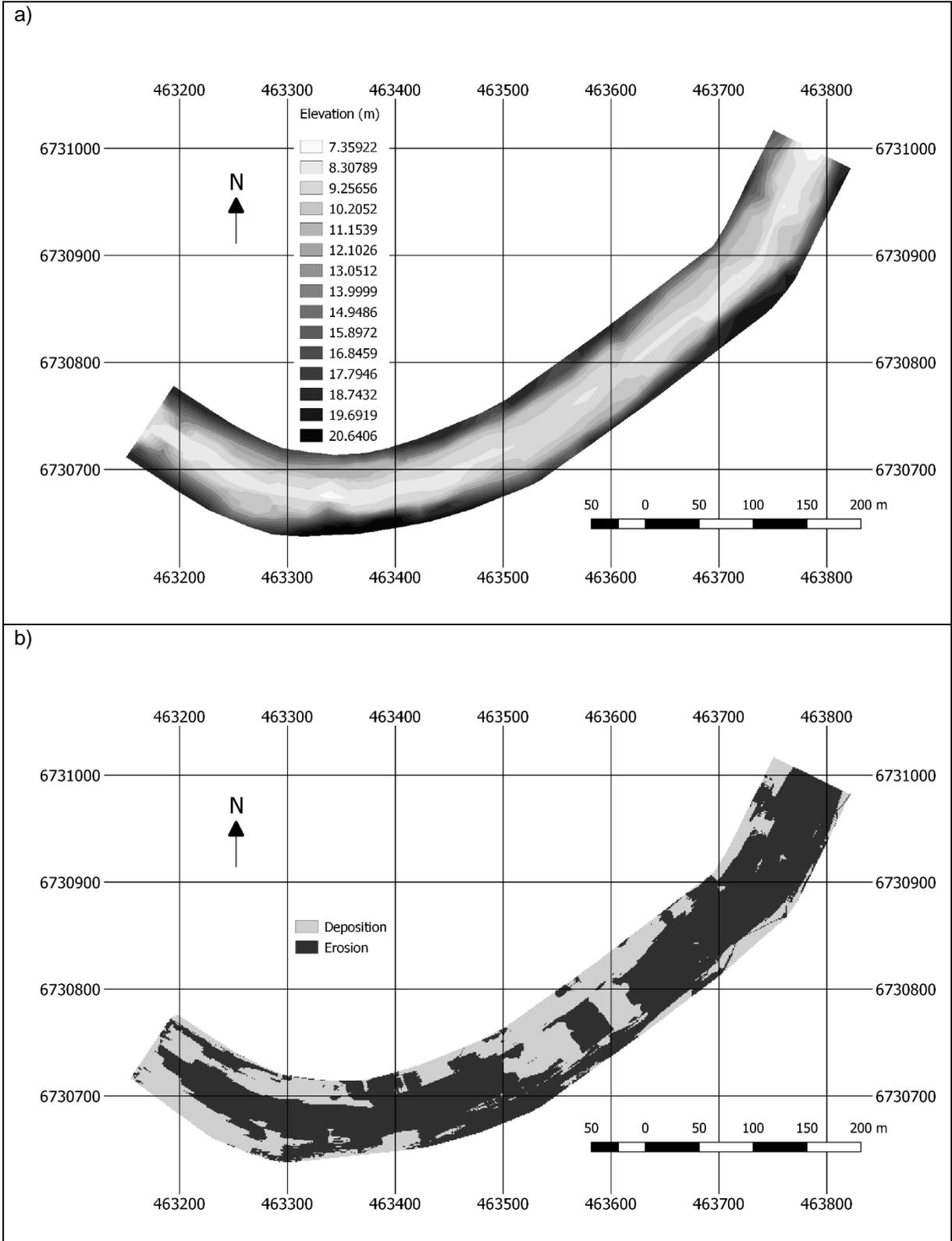
Fonte: Autor, 2019

Figura 43 – Leito interpolado (a) e zonas de deposição e erosão pelo método Ackers-White (b)



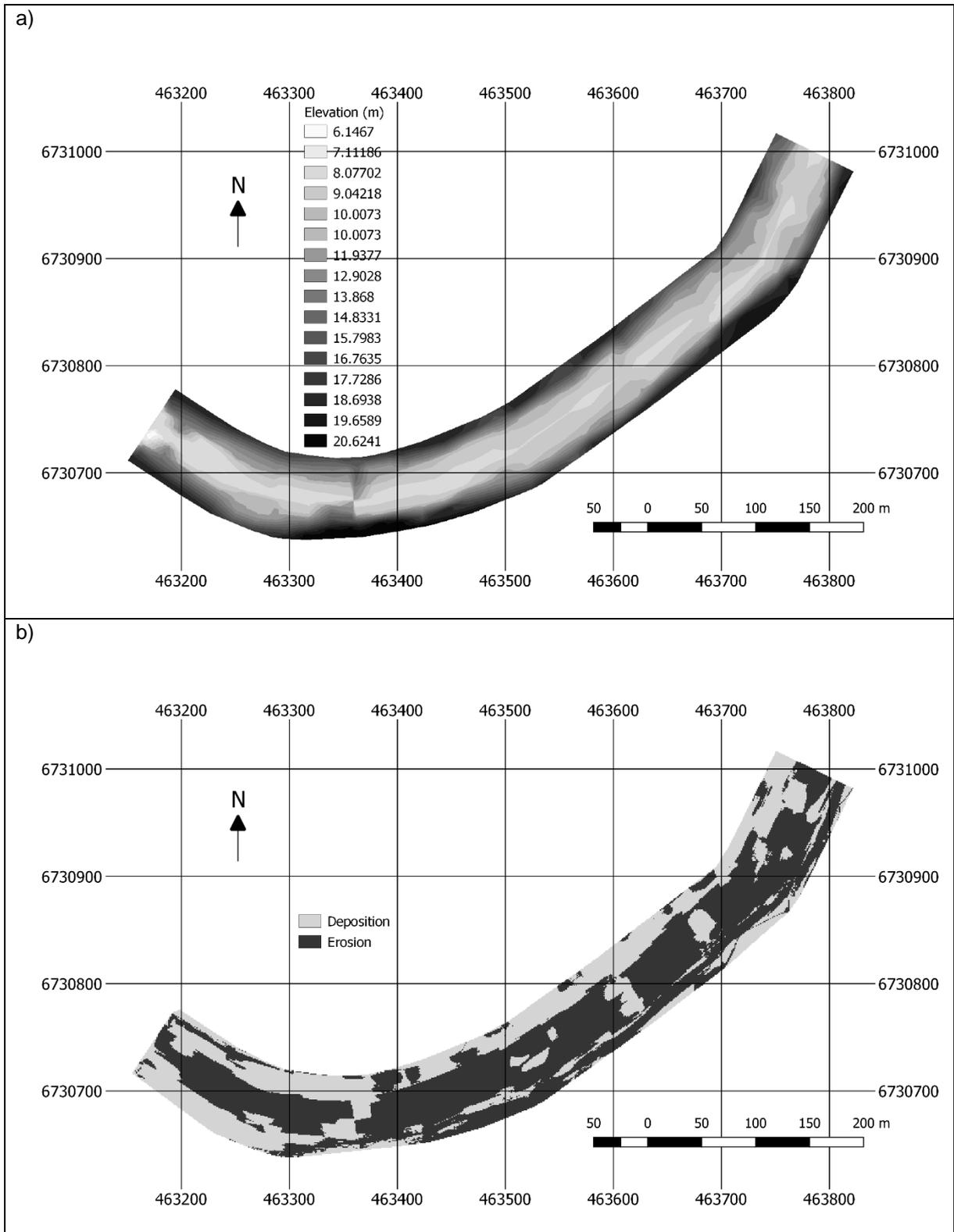
Fonte: Autor, 2019

Figura 44 – Leito interpolado (a) e zonas de deposição e erosão pelo método Yang (b)



Fonte: Autor, 2019

Figura 45 – Leito interpolado (a) e zonas de deposição e erosão pelo método Meyer-Peter & Muller (b)



Fonte: Autor, 2019

Em todos os métodos observou-se uma tendência de erosão no centro do canal, destacando-se o método de Yang, o qual apresentou erosão em praticamente toda a largura do canal na porção montante.

Outro comportamento observado é uma maior erosão nas zonas onde o fluxo apresenta maior intensidade, isto é, onde os perfis de velocidade são maiores.

Das zonas em que era observado deposição de sedimentos a partir do levantamento topobatimétrico, referente à seção 6, observa-se uma predominância de erosão para os métodos de Yang e MPM, enquanto para o método AW observa-se efetivamente uma deposição. Referente à estaca 16, observa-se um longo trecho de deposição na margem direita, diferindo do levantamento inicial que aponta uma concentração de seixo na margem esquerda.

Destaca-se a zona de deposição observada na estaca 32, a qual é observada especialmente pelo método AW. Os demais métodos apresentaram erosão ao centro e deposição apenas nas margens, diferente de AW que apresentou erosão em toda a seção.

4.4.4 Sedimentos suspensos

Obtiveram-se, também resultados referentes à descarga sólida de suspensão, os quais são apresentados como a descarga de sólidos suspensos (eixo y) em toneladas acumulada ao longo do tempo (eixo x) conforme Figura 46.

Figura 46 – Descarga de sólidos suspensos ao longo do tempo



Fonte: Autor, 2019

Observa-se que a descarga sólida está diretamente associada à vazão, onde quanto maior a vazão, maior a descarga sólida, especialmente nos picos de vazão.

Nota-se que apesar de haver uma pequena variação entre os valores, para todos os métodos o comportamento foi praticamente idêntico, isto é, sempre que houve um crescimento acentuado para um, também ocorreu para o outro praticamente em proporções iguais.

Ao final da série temporal o método de Yang terminou com a maior descarga de sólidos suspensos acumulada, totalizando 252.355 toneladas de sedimentos suspensos, seguido por MPM 246.740 toneladas e por fim AW com 239.870 toneladas.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em virtude do desenvolvimento do trabalho observou-se que os solos da bacia são predominantemente argilosos o que aponta um potencial de escoamento alto com uma taxa de infiltração muito baixa, criando um cenário propício ao escoamento superficial e ao transporte de sedimentos.

Em adição aos tipos de solo, o uso e ocupação do mesmo também foi determinado neste trabalho. Apesar de na parte mais baixa da bacia predominar a mata nativa, nas áreas mais altas de campos predomina a agricultura e o solo exposto, feições que são tipicamente associadas à produção de sedimentos.

Associando essas duas informações, foi determinado a perda de solos que apresentou um valor médio de 1.238,12 t/ha.ano, observando-se um maior potencial de perda de solos nas áreas de maior declividade e de solo exposto.

Além destes estudos realizados por sensoriamento remoto e geoprocessamento, foram realizados ensaios com material coletado em campo. Os resultados se dividiram em sólidos suspensos e descarga de leito. Os ensaios de sedimentos suspensos foram realizados em duas etapas e apontaram a uma concentração média de 5,1 mg/L. Já para os sedimentos de leito foram feitos ensaios de granulometria para determinar a mesma do trecho. Os resultados apontaram um leito composto predominantemente de pedregulho com diâmetro maior do que 2 mm.

Foram realizadas três simulações com três funções de transporte diferentes, Ackers-White (1974), Yang (1974) e Meyer-Peter e Muller (1948) com o auxílio do

software HEC-RAS do corpo de engenheiros do exército americano (USACE, 2016). Os resultados apresentados foram divididos em descarga sólida de leito, mudanças no leito e sedimentos suspensos. Para auxiliar na compreensão dos resultados ainda foram obtidos os perfis de velocidade ao longo do canal e a identificação das zonas de deposição e erosão.

A função de Yang apresentou resultados predominantemente de erosão, mais que os demais métodos, especialmente próximo ao centro do canal. Ackers-White foi a função que melhor representou os padrões de deposição conforme as zonas de seixo apontadas no levantamento topobatimétrico. A função de Meyer-Peter e Muller foi a função com os resultados que mais destoaram das demais uma vez que seu funcionamento se dá de forma diferente das demais, dependendo de um valor de tensão cisalhante limite para que haja transporte.

Com isso em mente, essa pode ser uma possível explicação do porquê a função de Meyer-Peter e Muller apresentou resultados tão distintos das demais, especialmente na mudança do leito da estaca 28. Neste local, observou-se que o modelo indicou uma deposição de 2,5 m de sedimentos, levando a crer que a tensão cisalhante do canal dificilmente ultrapassou a tensão cisalhante crítica fazendo com que os sedimentos se acumulassem nesta seção.

Para um melhor entendimento de qual função de transporte retrata os fenômenos de transporte de sedimentos do canal, sejam suspensos ou de leito, o ideal seria um extenso monitoramento contínuo dos episódios tanto de vazões menores quanto de vazões de cheias associados à descarga sólida. Sabe-se que é uma tarefa muito dispendiosa de tempo e recursos para tal, por isso um segundo levantamento topobatimétrico também poderia ser feito para compreender melhor sobre as zonas de deposição e erosão, o foco do presente trabalho.

Tento em vista tudo o que foi abordado neste trabalho, buscou-se de alguma forma retratar o comportamento sedimentológico de um trecho do rio Caí afim de subsidiar tecnicamente futuras tomadas de decisões no que tange a adoção de medidas de prevenção de cheias, uma vez que o assoreamento por parte dos sedimentos influi significativamente no comportamento das vazões e na extração de material de leito para empregar em obras de construção civil.

Para trabalhos futuros sugere-se monitorar por um período de tempo mais longo a descarga de sedimentos em ordem para subsidiar uma maior base de dados para comparar resultados calculados com dados observados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACKERS, Peter; WHITE, William Rodney. Sediment Transport: New Approach and Analysis. **Journal Of The Hydraulics Division**, [s.i.], v. 99, n. 11, p.2041-2060, 1973.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2017: relatório pleno**. Brasília: ANA, 2017.

ALONSO, C.V., 1980. Selecting a formula to estimate sediment transport capacity in nonvegetated channels. In: **CREAMS: A Field-Scale Model for Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems Conservation Research Report Number 25**. 1980, Cap 5. p. 426-439.

ANA, Agência Nacional de Águas. **Portal Hidroweb**. 2018. Disponível em: <<http://www.snirh.gov.br/hidroweb>>. Acesso em: 13 out. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-ISO 3310**: Peneiras de ensaio. Rio de Janeiro: 1997. 20 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE RECURSOS HÍDRICOS. **Carta de Brasília**. Brasília: ABRH, 2018

BAPTISTA, Isaurinda; RITSEMA, Coen; GEISSEN, Violette. Effect of Integrated Water-Nutrient Management Strategies on Soil Erosion Mediated Nutrient Loss and Crop Productivity in Cabo Verde Drylands. **PLOS ONE**, v. 10, n. 7, p. e0134244, 2015.

BRADLEY, J. B.; WILLIAMS, D. T.; WALTON, R.. Applicability and Limitations of Sediment Transport Modeling in Gravel-Bed Rivers. In: KLINGEMAN, Peter C. et al. **Gravel-bed Rivers in the Environment**. Highlands Ranch, Co: Water Resources Publications, 1998. Cap. 24. p. 543-578.

BROWNLIE, William R.. **PREDICTION OF FLOW DEPTH AND SEDIMENT DISCHARGE IN OPEN CHANNELS**. Pasadena, Ca: W. M. Keck Laboratory Of Hydraulics And Water Resources Division Of Engineering And Applied Science, 1981.

BRUNNER, Gary W.; GIBSON, Stanford. Sediment Transport Modeling in HEC RAS. **Impacts of Global Climate Change**. Anchorage, Alaska, United States: American Society of Civil Engineers, 2005, p. 1–12.

Buriti – MS. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 63p.

CAMENEN, B. et al. Assessment of Methods Used in 1D Models for Computing Bed-Load Transport in a Large River: The Danube River in Slovakia. **Journal Of Hydraulic**

Engineering, [s.l.], v. 137, n. 10, p.1190-1199, out. 2011. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)hy.1943-7900.0000427](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)hy.1943-7900.0000427).

CAMPEÃO, Roberta de Almeida Costa; HORA, Mônica de Aquino Galeano Massera da. **SEDIM 2.0 - Ferramenta computacional para o cálculo do transporte de sedimentos**. Niterói: Alternativa Editora, 2018. 80 p.

CARVALHO, N.O.; FILIZOLA JÚNIOR, N.P.; SANTOS, P.M.C.; LIMA, J.E.F.W. **Guia de práticas sedimentométricas**. Brasília: ANEEL. 2000. 154p.

CARVALHO, Newton de Oliveira. **Hidrossedimentologia prática**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2008.

CHAGAS, C. S. **Zoneamento Agroecológico do município de Dois Irmãos do**

CHAGAS, Celio I.; KRAEMER, Filipe B.; SANTANATOGLIA, Oscar J.; *et al.* Biological water contamination in some cattle production fields of Argentina subjected to runoff and erosion. **Spanish Journal of Agricultural Research**, v. 12, n. 4, p. 1008, 2014.

CHANG, Howard H.. **Fluvial Processes in River Engineering**. San Diego: Wiley, 1988.

CHOI, Sung-uk; LEE, Jinhwi. Prediction of Total Sediment Load in Sand-Bed Rivers in Korea Using Lateral Distribution Method. **Jawra Journal Of The American Water Resources Association**, [s.l.], v. 51, n. 1, p.214-225, 15 out. 2014. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1111/jawr.12249>.

CHOW, Ven Te. **Open-Channel Hydraulics**. 30057. ed. United States: The Blackburn Press, 2009.

COLLISCHONN, Walter; TASSI, Rutinéia. **Introduzindo Hidrologia**. 8. ed. Porto Alegre: IPH UFRGS, 2011.

CONFORTI, Massimo et al. Soil loss assessment in the Turbolo catchment (Calabria, Italy). **Journal Of Maps**, [s.l.], v. 12, n. 5, p.815-825, 25 ago. 2015. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/17445647.2015.1077168>.

DEY, Subhasish. Bed-Load Transport. In: DEY, Subhasish. **Fluvial Hydrodynamics**. Berlin: Springer, 2014. p. 261-326.

DRAKE, Jennifer; BRADFORD, Andrea; JOY, Doug. Application of HEC-RAS 4.0 temperature model to estimate groundwater contributions to Swan Creek, Ontario,

Canada. **Journal Of Hydrology**, [s.l.], v. 389, n. 3-4, p.390-398, ago. 2010. Elsevier BV.

DYSARZ, Tomasz; SZAŁKIEWICZ, Ewelina; WICHER-DYSARZ, Joanna. Long-Term Impact of Sediment Deposition and Erosion on Water Surface Profiles in the Ner River. **Water**, v. 9, n. 3, p. 168, 2017.

EDWARDS, Thomas K.; GLYSSON, G. Douglas (1988). **Field methods for measurement of fluvial sediment**. Reston: USGS, 1988.

GASSMAN, P. W.; REYES M. R.; GREEN; C. H.; Arnold, J. G. The Soil and Water Assessment Tool: Historical Development, Applications, and Future Research Directions. **Transactions of the ASABE**, v. 50, n. 4, p. 1211–1250, 2007.

GRAAFF, J. van de; VAN OVEREEM, J.. Evaluation of sediment transport formulae in coastal engineering practice. **Coastal Engineering**, [s.l.], v. 3, n. 1, p.1-32, 1979.

FAN, Chihhao et al. Sensitivity Analysis and Water Quality Modeling of a Tidal River Using a Modified Streeter–Phelps Equation with HEC-RAS-Calculated Hydraulic Characteristics. **Environmental Modeling & Assessment**, [s.l.], v. 17, n. 6, p.639-651, 30 mar. 2012. Springer Nature.

HAAN, Charles Thomas; BARFIELD, Billy J.; HAYES, J. C. **Design hydrology and sedimentology for small catchments**. Amsterdam, NE: Academic Press, c1994. xiv, 588 p. ISBN 0123123402.

HABERSACK, Helmut M.; LARONNE, Jonathan B.. Evaluation and Improvement of Bed Load Discharge Formulas based on Helley–Smith Sampling in an Alpine Gravel Bed River. **Journal Of Hydraulic Engineering**, [s.l.], v. 128, n. 5, p.484-499, maio 2002. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9429\(2002\)128:5\(484\)](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)0733-9429(2002)128:5(484)).

HABIB-UR-REHMAN; CHAUDHRY, Muhammad Asif; NAEEM, Usman Ali; *et al.* Performance evaluation of 1-D numerical model HEC-RAS towards modeling sediment depositions and sediment flushing operations for the reservoirs. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 190, n. 7, 2018.

HICKS, F e; PEACOCK, T.. Suitability of HEC-RAS for Flood Forecasting. **Canadian Water Resources Journal**, [s.l.], v. 30, n. 2, p.159-174, jan. 2005. Informa UK Limited

HUMMEL, Ryan; DUAN, Jennifer G.; ZHANG, Shiyan. Comparison of Unsteady and Quasi-Unsteady Flow Models in Simulating Sediment Transport in an Ephemeral Arizona Stream. **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, v. 48, n. 5, p. 987–998, 2012.

KARMAKER, Tapas; RAMPRASAD, y; DUTTA, Subashisa. Sediment transport in an active erodible channel bend of Brahmaputra river. **Sadhana**, [s.i.], v. 35, n. 6, p.693-706, 2010.

KINNELL, P.i.a.. Event soil loss, runoff and the Universal Soil Loss Equation family of models: A review. **Journal Of Hydrology**, [s.i.], v. 385, n. 1-4, p.384-397, 2010.

LOGAH, Frederick Yaw; AMISIGO, Akurugu Barnabas; OBUOBIE, Emmanuel; *et al.* Floodplain hydrodynamic modelling of the Lower Volta River in Ghana. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 14, p. 1–9, 2017.

MEYER-PETER, E; MULLER, R. Formulas for Bed Load Transport. In: **Proceedings of 2nd meeting of the International Association for Hydraulic Structures Research**. Delft, p. 39-64, 7 junho 1948.

MALAYSIA ENVIRONMENTAL JOURNAL. **Grab Samplers for slow moving river or streams**. 2019. Disponível em: <<http://envscientist.blogspot.com>>. Acesso em: 13 jun. 2019.

MOHAMMAD, Mohammad E. et al. Sediment in Mosul Dam reservoir using the HEC-RAS model. **Lakes & Reservoirs: Research & Management**, [s.i.], v. 21, n. 3, p.235-244, set. 2016.

NAKATO, Tatsuaki. Tests of Selected Sediment-Transport Formulas. **Journal Of Hydraulic Engineer**, [s.i.], v. 116, n. 3, p.362-379, mar. 1990.

NISTORAN, Daniela Gogoășe; IONESCU, Cristina; PĂTRU, Georgiana; *et al.* One Dimensional Sediment Transport Model to Assess Channel Changes along Oltenița-Călărași Reach of Danube River, Romania. **Energy Procedia**, v. 112, p. 67–74, 2017.

PARRAS-ALCÁNTARA, Luis et al. Long-term effects of soil management on ecosystem services and soil loss estimation in olive grove top soils. **Science Of The Total Environment**, [s.i.], v. 571, p.498-506, nov. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.07.016>.

QUEIROZ, William de; OLIVEIRA, Antonio Manoel dos Santos; ROSSI, Marcio; SAAD, Antonio Roberto; ANDRADE, Marcio Roberto Magalhães de. Análise geoambiental da bacia do Guarapiranga, região metropolitana de São Paulo: produção de sedimentos e assoreamento do reservatório. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.16, n. 1, p. 17, 2015.

RENARD K. G. *et al.* United States Department Of Agriculture. **Agriculture Handbook no. 703**: Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). Tucson: USDA, 1997. 404 p.

RETSINIS, Eugene; DASKALAKI, Erna; PAPANICOLAOU, Panos. Hydraulic and Hydrologic Analysis of Unsteady Flow in Prismatic Open Channel. **Proceedings**, v. 2, n. 11, p. 571, 2018.

RICKLY. **DH-48 Sediment Sampler**. 2019. Disponível em: <<https://rickly.com>>. Acesso em: 13 jun. 2019.

SARTORI, Aderson; LOMBARDI NETO, Francisco; GENOVEZ, Abel Maia. Classificação Hidrológica de Solos Brasileiros para a Estimativa da Chuva Excedente com o Método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos Parte 1: Classificação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [s.i.], v. 10, n. 4, p.05-18, 2005.

SIMONS, Daryl B.; SENTURK, Fuat. **Sediment Transport Technology**. Fort Collins: Water Resources Publications, 1977.

SONTEK. **RIVERSURVEYOR® S5 AND M9**. 2019. Disponível em: <<https://www.sontek.com>>. Acesso em: 13 jun. 2019.

SOUSA, Márcia Evangelista; SANTOS FILHO, Nilson Evangelista da Silva; PEREIRA, Lúcio Alberto; LYRA, Luiz Henrique de Barros. Monitoramento e caracterização do assoreamento no rio São Francisco nas orlas urbanas de Petrolina-PE e Juazeiro-BA. **Revista da Casa Geográfica** v. 15, n. 1, p. 68, 2013.

STEVENS, Herbert H.; YANG, Chih Ted. **Summary and use of selected fluvial sediment-discharge**. Denver: Water Resources Investigations, 1989.

STRECK, E. V.; KAMPF, N.; DALMOLIN, R. S. D. et al. **Solos do Rio Grande do Sul**. 2 ed. Porto Alegre: EMATER/RS. 2008. 222 p.

TAPP, J. S. et al. **Predicting suspended solids removal in pilot scale sediment ponds utilizing chemical flocculation**. Lexington: Institute For Mining And Mineral Materials Research, 1981.

TENZIN, Jigme; BHASKAR, Aparna S.. MODELING OF THE PRECIPITATION INDUCED FLASH FLOOD IN SARPANG, BHUTAN USING HEC-RAS. **Rasayan Journal Of Chemistry**, [s.l.], p.399-406, 2017.

THOMAS, William A.; CHANG, Howard. Computational Modeling of Sedimentation Processes. **Sedimentation Engineering**, [s.l.], p.649-681, 12 maio 2008. American Society of Civil Engineers

TOMAZONI, Julio Caetano; GUIMARÃES, Elisete. A sistematização dos fatores da EUPS em SIG para a bacia do rio Jirau. **Revista Brasileira de Cartografia**, [s.l.], v. 3, n. 57, p.235-244, 2005.

TUCCI, Carlos Eduardo Morelli (Org.). **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4. ed. Porto Alegre: UFRGS, 2009. 943 p. (Coleção ABRH de Recursos Hídricos; 4) ISBN 9788570259240.

ULLAH, Sana et al. Flood modeling and simulations using hydrodynamic model and ASTER DEM—A case study of Kalpani River. **Arabian Journal Of Geosciences**, [s.l.], v. 9, n. 6, p.439-450, maio 2016. Springer Nature.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. **AGRICULTURE HANDBOOK NO. 18: Soil Survey Manual**. Estados Unidos: Soil Science Division Staff, 2017.

USACE, US ARMY CORP OF ENGINEERS. **HEC-RAS River Analysis System User's Manual Version 5.0**. Davis: Institute For Water Resources Hydrologic Engineering Center (HEC), 2016. 962 p.

VIETZ; Geoff J.; LINTERN, Anna; WEBB, J. Angus; STRACCIONE, David. River Bank Erosion and the Influence of Environmental Flow Management. **Environmental Management**, v. 61, n. 3, p. 454, 2018.

WEIL, Ray R.; BRADY, Nyle C.. **The Nature and Properties of Soils**. 15. ed. Harlow: Pearson, 2016.

WEILL, Mara de Andrade Marinho; SPAROVEK, Gerd. Estudo da erosão na microbacia do Ceveiro (Piracicaba, SP): I - Estimativa das taxas de perda de solo e estudo de sensibilidade dos fatores do modelo EUPS. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 2, p. 801–814, 2008.

WILCOCK, Peter; PITLICK, John; CUI, Yantao. **Sediment transport primer: estimating bed-material transport in gravel-bed rivers**. Fort Collins, Co: U.s. Department Of Agriculture, 2009. 78 p.

WONG, Miguel; PARKER, Gary. Reanalysis and Correction of Bed-Load Relation of Meyer-Peter and Müller Using Their Own Database. **Journal Of Hydraulic Engineering**, [s.l.], v. 132, n. 11, p.1159-1168, nov. 2006. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9429\(2006\)132:11\(1159\)](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)0733-9429(2006)132:11(1159)).

WU, Baosheng; VAN MAREN, D. S.; LI, Lingyun. Predictability of sediment transport in the Yellow River using selected transport formulas. **International Journal Of Sediment Research**, [s.i.], v. 23, n. 4, p.283-298, jun. 2008.

WU, Yuyang; OUYANG, Wei; HAO, Zengchao; *et al.* Assessment of soil erosion characteristics in response to temperature and precipitation in a freeze-thaw watershed. **Geoderma**, v. 328, p. 56–65, 2018.

YANG, Chih Ted. Incipient Motion and Sediment Transport. **Journal Of The Hydraulics Division**, [s.i.], v. 99, n. 10, p.1679-1704, 1973.

YEN, Haw et al. Assessment of Optional Sediment Transport Functions via the Complex Watershed Simulation Model SWAT. **Water**, [s.i.], v. 9, n. 2, p.76-95, 29 jan. 2017. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/w9020076>.

ZHANG, Y.-g. et al. Comparative rates of wind versus water erosion from a small semiarid watershed in southern Arizona, USA. **Aeolian Research**, [s.i.], v. 3, n. 2, p.197-204, nov. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aeolia.2011.03.006>.