



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL**

RAFAELI ALVES BRUNE

**MÉTODOS DE ESTIMATIVA DE DESCARGA SÓLIDA EM RIOS -
ANÁLISE COMPARATIVA**

VITÓRIA, ES
2014

RAFAELI ALVES BRUNE

**MÉTODOS DE ESTIMATIVA DE DESCARGA SÓLIDA EM RIOS -
ANÁLISE COMPARATIVA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Ambiental, na área de concentração em Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. PhD. Antônio Sérgio Ferreira Mendonça

VITÓRIA, ES

2014

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Biblioteca Setorial Tecnológica,
Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

Brune, Rafaeli Alves, 1989-
B895m Métodos de estimativa de descarga sólida em rios: análise
comparativa / Rafaeli Alves Brune. – 2014.
147 f. : il.

Orientador: Antônio Sérgio Ferreira Mendonça.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) –
Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Hidrologia. 2. Sedimentos (Geologia). 3. Transporte de
sedimentos. I. Mendonça, Antônio Sérgio Ferreira. II.
Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. III.
Título.

CDU: 628



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

“Métodos de Estimativa de Descarga Sólida em Rios - Análise Comparativa”.

RAFAELI ALVES BRUNE

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Antônio Sérgio Ferreira Mendonça
Orientador – DEA/CT/UFES

Prof. Dr. Daniel Rigo
Examinador Interno – DEA/CT/UFES

Prof. Dr. Frederico Fábio Mauad
Examinador Externo – USP

Coordenador do PPGEA: Prof. Dr. Edmilson Costa Teixeira

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
Vitória, ES, 14 de outubro de 2014.

Dedico...

À minha família.

A amiga Monik Luns (*in memoriam*). Um
Ser especial que na arquibancada da Vida sempre
torceu e confiou em minha vitória.

AGRADECIMENTOS

À Deus, pai todo poderoso. Sem ele, nada é possível e tudo é sem sentido.

Aos meus pais, Paulo Sérgio e Luzia, a qual dedico este trabalho, que através do apoio, do incentivo, das orações, da renúncia e até do sacrifício por mim me ajudaram a chegar até aqui.

Aos meus irmãos Rodrigo e Roberta, que sempre me apoiaram.

Ao professor Antônio Sérgio pela orientação e paciência nos momentos de desespero, sempre com uma palavra para me acalmar.

Ao professor Caiado, pessoa marcante na graduação, sempre disponível para boas conversas e dando atenção e apoio nas horas solicitadas.

Aos meus queridos colegas conquistados durante o mestrado, foram momentos engraçados e descontraídos compartilhados: Dariene, Lorena, Joãozito e Ivaniel. Em especial a Drica (Adriellen), pelas longas conversas, não só do mestrado, mas da vida e dos sonhos a serem realizados.

Aos amigos desde sempre, e sei que sempre posso contar: Dayana, Layss, Jéssica, Juliana, Érika e Paola.

A família Jacobsen, em especial, Eliane, Débora, Raquel, Fernanda e Lorena por me apoiar em todos os momentos.

Ao pessoal do GEARH, em especial a Mônica e ao Ramon, que me ajudaram na manipulação dos dados.

A Fernanda, Joseline e Luana, fundamentais para finalização do trabalho.

Pelo PPGEA, na pessoa de Rose Leão, pelos “help’s” nos momentos necessários.

A FAPES pelo financiamento da bolsa de mestrado e do projeto de pesquisa.

A todos, que compreenderam com carinho os momentos de estresse e as ausências.

Muito obrigada!

*“Nunca deixe que lhe digam que não vale a
pena acreditar nos sonhos que se tem
ou que os seus planos nunca vão dar certo
ou que você nunca vai ser alguém...”*

Renato Russo

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Movimento de partículas de sedimentos no curso d'água.	26
Figura 2 - Zonas de amostragens de sedimentos em suspensão e de leito.	27
Figura 3 - Localização das bacias hidrográficas estudadas e dos respectivos pontos de monitoramento.	47
Figura 4 - Principais tipos de solos encontrados na região de estudo.	49
Figura 5 - Alguns tipos de uso do solo das bacias em estudo.....	51
Figura 6 - Panorama do relevo da região de estudo.	53
Figura 7 - Relevo da região de estudo.	54
Figura 8 - Amostrador de sedimento em suspensão USDH-59 (AMS-3).	59
Figura 9 - Amostrador tipo draga de Petersen para coleta de material do leito.....	60
Figura 10 - Métodos de análise do sedimento em suspensão e de leito.....	61
Figura 11 - Tubo de retirada pelo fundo para análise granulométrica de material fino.	62
Figura 12 - Peneiras para análise granulométrica pelo Método de Peneiramento. ...	63
Figura 13 - Tubo de Chapman para determinação do peso específico do sedimento.	64
Figura 14 - Viscosidade cinemática em função da temperatura da água.....	66
Figura 15 - Valores de x em função de K_s (ou D_{65}).	67
Figura 16 - Gráficos de determinação da porcentagem de fluxo amostrado A'	68
Figura 17 - Gráfico de obtenção de Φx em função de Ψ	69
Figura 18 - Comparação entre os resultados da Q_{sml} estimada para o rio Doce. ...	100

Figura 19 - Comparação entre os resultados da Qsml estimada para o rio Santa Maria do Doce.....	103
Figura 20 - Comparação entre os resultados da Qsml estimada para o rio Santa Joana.	104
Figura 21 - Comparação entre os resultados da Qsml estimada para o córrego Santa Júlia.....	104
Figura 22 - Comparação entre os resultados da Qsml estimada para o córrego Sossego.	105

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Distribuição percentual das áreas dos diferentes tipos de solo nas bacias e microbacias.	48
Tabela 2 - Percentuais de uso e ocupação do solo nas bacias e microbacias hidrográficas.....	52
Tabela 3 - Classes de declividades e percentuais das áreas correspondentes.	55
Tabela 4 - Categorias hierárquicas de declividade do relevo, quanto a fragilidade à erosão.	55
Tabela 5 - Coordenadas UTM e áreas das bacias.	56
Tabela 6 - Estações pluviométricas consideradas.	57
Tabela 7 - Valores das constantes da fórmula de Ackers & White.....	77
Tabela 8 - Características hidráulicas e geométricas da seção transversal da área em estudo.....	83
Tabela 9 - Distribuição granulométrica do sedimento de fundo na seção do rio Doce, em %.	84
Tabela 10 - Distribuição granulométrica do sedimento de fundo na seção do rio Santa Maria do Doce, em %.....	85
Tabela 11 - Distribuição granulométrica do sedimento de fundo na seção do rio Santa Joana, em %.	85
Tabela 12 - Distribuição granulométrica do sedimento de fundo na seção do córrego Santa Júlia, em %.	86
Tabela 13 - Distribuição granulométrica do sedimento de fundo na seção do córrego Sossego, em %.	86
Tabela 14 - Diâmetros do material de leito, em mm.....	88

Tabela 15 - Valores dos coeficientes de rugosidade e dos números de Manning.....	89
Tabela 16 - Parâmetros hidrossedimentológicos.	91
Tabela 17 - Média da Produção Específica de Sedimentos em Suspensão.	92
Tabela 18 - Limites para aplicação de métodos de estimativa de descarga sólida de material de leito.	93
Tabela 19 - Dados de entrada para métodos de estimativa de descarga de leito nas diferentes campanhas.	95
Tabela 20 - Parâmetros fora dos limites de aplicação dos métodos.	97
Tabela 21 - Descarga sólida de material de leito estimada, em ton/dia*.....	99
Tabela 22 - Comparação entre métodos de estimativa.....	101
Tabela 23 - Média da descarga sólida de material de leito estimada, para períodos seco e chuvoso, em t/dia.....	106
Tabela 24 - Comparação da estimativa da descarga sólida total pelo método de Einstein Modificado (1955) e Simplificado de Colby (1957), em ton/dia.....	109
Tabela 25 - Valores médios dos pesos específicos estimados e diferenças percentuais relativas à cada bacia.	112
Tabela 26 - Descargas sólidas de material de leito estimadas, considerando pesos específicos dos sedimentos estimados e obtidos com valor apresentado na literatura, em ton/dia.....	114

LISTA DE ABREVIATURAS

GEARH/UFES - Laboratório de Sistemas de Suporte à Decisão em Recursos Hídricos do Grupo de Estudos e Ações em Recursos Hídricos da UFES;

LABHIDRO/UFES - Laboratório de Hidráulica e Monitoramento Ambiental;

PARH-SANTA MARIA- Relatório do Plano de Ação de Recursos Hídricos para a Unidade de Análise Santa Maria do Doce;

UFES - Universidade Federal do Espírito Santo;

USBR - United States Bureau of Reclamation;

USGS - United States Geological Survey.

LISTA SÍMBOLOS

A - área da seção transversal ao escoamento e valor do número de Froude em movimento inicial no método de Ackers & White (1973);

B - largura da seção do curso d'água;

D_{35} - diâmetro da partícula para o qual 35% do material do leito são mais finos;

D_{50} - diâmetro da partícula para o qual 50% do material do leito são mais finos;

D_{65} - diâmetro da partícula para o qual 65% do material do leito são mais finos;

D_{90} - diâmetro da partícula para o qual 90% do material do leito são mais finos;

D_{gr} - diâmetro adimensional da partícula no método de Ackers & White (1973);

D_m - diâmetro médio do material de leito;

e - razão de eficiência no método de Colby (1957);

F_{gr} - mobilidade da partícula no método de Ackers & White (1973);

g - aceleração da gravidade;

G_{gr} - descarga sólida adimensional no método de Ackers & White (1973);

gs - descarga sólida total no método de Engelund & Hansen (1967) em kgf/m.s;

m - expoente da função de transporte de sedimento no método de Ackers & White (1973);

n - expoente de transição que depende da granulometria do sedimento o método de Ackers & White (1973);

P - perímetro da seção;

p - profundidade média do escoamento;

Q - descarga líquida da seção;

Q_b - descarga de fundo no método de Einstein Modificado por Colby e Hembree (1955);

Q_m - descarga total de sedimentos medida;

Q_{nm} - descarga sólida não amostrada no método de Colby (1957);

Q_{ss} - descarga sólida em suspensão;

Q_{sm} - descarga sólida medida;

Q_{sml} - descarga sólida de material de leito;

Q_{st} - descarga sólida total;

S - declividade da linha d'água;

S_g - gravidade específica do sedimento, igual a γ_s / γ ;

U - Velocidade média do escoamento;

U^* - velocidade de cisalhamento do escoamento;

U_{cr} - velocidade crítica do escoamento no movimento incipiente, no método de Yang (1973);

W - velocidade de sedimentação da partícula;

Δ - igual a 1,65 no método de Karim (1998);

α - coeficiente, no método de Ackers & White (1973), que no regime turbulento, devido à rugosidade tem valor igual a dez;

ϕ - parâmetro adimensional de transporte de Einstein;

ρ - massa específica da água;

ρ_s - massa específica do sedimento;

γ_s - peso específico do sedimento;

γ - peso específico da água;

ψ - potência da corrente;

ν - viscosidade cinemática da água;

Θ_{cr} - parâmetro adimensional da tensão de atrito no método de Cheng (2002);

τ_o - tensão de atrito no leito do canal;

τ_c^* - tensão de cisalhamento crítica adimensional definida por Shields;

RESUMO

Transporte de sedimentos em bacias hidrográficas está relacionado com geomorfologia, ecologia fluvial, estabilidade das estruturas de engenharia e condições de navegação, dentre outros aspectos importantes para o planejamento e o controle de recursos hídricos. Existência de inúmeras variáveis envolvidas na mecânica de transporte de sedimentos e complexidade nas interações de processos físicos tornam difícil o estabelecimento de metodologias indiretas para estimativa de transporte de sedimentos em rios. Desta forma, não existe ainda metodologia universalmente aceita. O principal objetivo do presente trabalho é a análise comparativa de diferentes métodos empíricos disponíveis na literatura para estimativa de descargas sólidas em rios, considerando suas características específicas e resultados de aplicações às bacias dos rios Santa Joana e Santa Maria do Doce e microbacias Sossego e Santa Júlia, inseridas na porção da bacia do rio Doce localizada no Espírito Santo. Foram aplicados os métodos de estimativa indireta de descarga sólida: Einstein Modificado por Colby e Hembree (1955); Colby Simplificado (1957); Engelund & Hansen (1967); Ackers & White (1973); Yang (1973), Karim (1998) e Cheng (2002). Considerando as médias das estimativas de descarga sólida de material de leito (Q_{sml}) relativas às campanhas realizadas em período chuvoso para a seção transversal do rio Doce, de maior porte, o método de Karim (1998), seguido pelo método de Ackers & White (1973), apresentou o maior valor, enquanto que o método de Yang (1973) apresentou o menor. Para os rios Santa Maria do Doce e Santa Joana e os córregos Santa Júlia e Sossego, verificou-se que o método de Ackers & White (1973), seguido de Karim (1998) e Yang (1973) apresentaram as maiores médias, enquanto que os métodos de Cheng (2002) e Engelund & Hansen (1967) apresentaram as menores. O método Simplificado de Colby apresentou as maiores estimativas de descargas sólidas totais (Q_{st}) para todas as seções transversais de todos os cursos d'água monitorados. Concluiu-se que os diferentes métodos indiretos podem resultar em grandes diferenças em estimativas de transporte de sedimento em rios e que, desta forma, resultados de aplicação destes métodos devem ser considerados com muita cautela. Os resultados mostraram a grande importância de realização de campanhas de medição sedimentométricas para avaliação do transporte de sedimentos e definição dos melhores métodos indiretos de estimativa para cursos d'água específicos.

Palavras-Chave: Hidrologia. Sedimentos. Transporte de sedimentos em rios. Descarga sólida de material de leito.

ABSTRACT

Sediment transport in watersheds is related to geomorphology, river ecology, engineering structures stability and navigation conditions, among many important water resources planning and control aspects. The large number of variables involved in the mechanics of sediment transport and the existing complexity in the interactions of physical processes make it difficult to establish precise indirect methodologies for estimating sediment transport in rivers. Hence, there is still no universally accepted indirect methodology. The main objective of this work is the comparative analysis of different empirical methods available in the literature for estimating solid transport in rivers, considering their specific characteristics and results of applications to the river Santa Joana and Santa Maria do Doce, Sossego e Santa Júlia watersheds, located in the lower portion of the Doce river basin, in Espírito Santo State, Brazil. Einstein Modified by Colby and Hembree (1955); Simplified Colby (1957); Englund & Hansen (1967); Ackers & White (1973); Yang (1973), Karim (1998) and Cheng (2002) methods for indirect estimation of solid transport were applied. Considering the average estimates of discharge of solid bed material (Q_{sml}) for campaigns developed during rainy periods for the Doce River cross section, the method of Karim (1998), followed by the method of Ackers & White (1973), showed the highest value, while the method of Yang (1973) showed the lowest. For Santa Joana and Santa Maria do Doce rivers and Sossego and Santa Júlia creeks, it was found that the Ackers & White (1973) method, followed by Karim (1998) and Yang (1973) methods, presented the highest values, while Cheng (2002) and Englund & Hansen (1967) methods showed the lowest. The Simplified Colby method showed the highest estimates of total solid discharges (Q_{st}) for all cross sections of all watercourses sampled. It was concluded that the application of the different indirect methods can result in large differences in estimates of sediment transport in river sand, thus, results from application of these methods should be taken with caution. The results showed the great importance of carrying out sediment transport measurement campaigns to assess sediment transport and choose the best indirect estimation methods for specific watercourses.

Keywords: Hydrology. Sediments. Sediment transport in rivers. Sediment transport on river beds.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	20
2 OBJETIVOS.....	22
2.1 Objetivo Geral	22
2.2 Objetivos Específicos.....	22
3 REVISÃO DE LITERATURA	23
3.1 Hidrossedimentologia e processos erosivos em bacias hidrográficas	23
3.2 Transporte fluvial de sedimentos.....	25
3.3 Descarga de sedimentos.....	28
3.4 Métodos de estimativa do cálculo da descarga de sedimentos a partir de medições em rios	30
3.4.1 Métodos de estimativa de descarga sólida total.....	30
3.4.1.1 Método de Einstein Modificado por Colby e Hembree (1955)	30
3.4.1.2 Método Simplificado de Colby (1957)	31
3.4.2 Métodos de estimativa de descarga sólida de material do leito	32
3.4.2.1 Método de Engelund & Hansen (1967).....	33
3.4.2.2 Método de Yang (1973)	34
3.4.2.3 Método de Ackers & White (1973)	34
3.4.2.4 Método de Karim (1998)	35
3.4.2.5 Método de Cheng (2002).....	36
3.4.3 Alguns estudos empregando métodos analisados.....	37
3.5 Declividade da linha d'água.....	41

3.6 PESO ESPECÍFICO DO SEDIMENTO.....	44
4 METODOLOGIA	45
4.1 Caracterização da região de estudo.....	45
4.1.1 Características gerais	45
4.1.2 Solos	48
4.1.3 Uso e Cobertura do Solo	51
4.1.4 Relevo e Declividade.....	53
4.2 Coleta de Dados.....	56
4.3 MEDIDAS HIDRÁULICAS.....	57
4.3.1 Cálculo da Declividade da linha d'água	57
4.3.2 Medição da velocidade e descarga líquida	58
4.4 Amostragem de sedimentos em suspensão e de material de leito.....	58
4.5 Análises de laboratório	60
4.6 Cálculo da Descarga Sólida dos Sedimentos Através de Fórmulas.....	65
4.6.1 Método de Einstein Modificado por Colby e Hembree (1955)	65
4.6.2 Método Simplificado de Colby (1957).....	71
4.6.3 Método de Engelund & Hansen (1967)	72
4.6.4 Método de Yang (1973)	73
4.6.5 Método de Ackers & White (1973).....	75
4.6.6 Método de Karim (1998).....	77
4.6.7 Método de Cheng (2002).....	78
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	81

5.1 Comparação entre características das bacias e microbacias	81
5.2 Variáveis utilizadas na aplicação dos métodos de determinação da descarga sólida.....	82
5.3 Características, formas e limites relativos ao desenvolvimento e aplicação dos métodos de descarga sólida de material de leite.....	93
5.4 Análise comparativa entre os resultados dos métodos de descarga sólida de material de leite	97
5.5 Análise comparativa entre os resultados dos métodos de descarga sólida total	109
6 SÍNTESE DOS RESULTADOS.....	115
7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	118
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	120
ANEXOS	131

1 INTRODUÇÃO

Erosão, transporte e deposição de sedimentos em leitos de cursos d'água são processos naturais e se dão de forma lenta e contínua. Os problemas começam a surgir quando o homem acelera esses processos naturais ocupando, de forma desordenada e irresponsável. A retirada da vegetação, o manejo inadequado do solo e a urbanização acelerada próxima aos rios são alguns dos fatores que trazem sérias consequências, como assoreamento de reservatórios e rios aumentando a incidência das cheias e, por conseguinte, dos alagamentos; redução da qualidade da água para consumo e irrigação, mortandade de espécies aquáticas e impossibilidade de navegação devido à diminuição da lâmina d'água (BRANCO, 1998; FILIZOLA *et al.*, 2001; SCAPIN, 2005; LIMA e SILVA, 2007).

A quantidade de sedimentos transportada, proveniente do leito do rio, é altamente dependente da composição do material do leito e das características geométricas e hidráulicas da seção e do trecho do rio. Por essa razão, qualquer intervenção que altere o equilíbrio natural do rio pode trazer sérias consequências em termos de erosão e deposição de sedimentos (SCAPIN, 2005).

Existem métodos diretos e indiretos para a determinação da descarga de sedimento sem uma seção. Porém, devido à dificuldade de obtenção de dados e aos custos envolvidos, os indiretos são os mais utilizados. Alguns métodos de cálculo de descarga sólida fazem a estimativa da quantidade de sedimentos transportada pela corrente de maneira indireta, a partir de parâmetros hidráulicos da corrente em uma seção ou trecho do rio e das características do material de leito (CARVALHO, 2008).

O entendimento do potencial de produção de sedimento em bacias hidrográficas é de extrema importância para planejamento ambiental, sendo de grande auxílio na definição de diretrizes e ações a serem implementadas para uma gestão territorial adequada (MENDONÇA, 2013).

As bacias hidrográficas dos rios Santa Maria do Doce e Santa Joana e as microbacias dos córregos Santa Júlia e Sossego foram escolhidas para o estudo por serem sub-bacias do rio Doce situadas de forma contígua, na margem direita, em

seu curso médio, com características pedológica, geomorfológica e de uso e cobertura da terra semelhantes e áreas totais de drenagem próximas (Santa Maria do Doce e Santa Joana, 910,76 km² e 883,42 km² e Santa Júlia e Sossego, 72,20 km² e 62,82 km², respectivamente). Também foram considerados dados relativos a seção transversal do rio Doce situada a jusante das afluições dos rios Santa Joana e Santa Maria do Doce, na localidade de Itapina.

Além disso, estas bacias e microbacias hidrográficas pertencem à mesma Unidade de Análise do Plano de Ação de Recursos Hídricos do Rio Doce (PARH-SANTA MARIA, 2010) e foram alvos de pesquisa hidrosedimentológica realizada pelo Grupo de Estudos e Ações em Recursos Hídricos/Laboratórios de Sistemas de Suporte à Decisão e Monitoramento de Recursos Hídricos da UFES (GEARH/LABHIDRO/UFES), que contou com o apoio da FAPES e do CNPq, o que facilitou a aquisição de dados hidrosedimentológicos.

Para estimativas de descargas de sedimentos nas seções transversais consideradas na pesquisa supracitada e no presente estudo utilizou-se os métodos de Einstein Modificado por Colby e Hembree (1955), Colby Simplificado (1957), Engelund & Hansen (1967), Yang (1973), Ackers & White (1973), Karim (1998) e Cheng (2002).

No sentido de compreender melhor o transporte de sedimento em rios e métodos disponíveis na literatura para estimativas de descargas sólidas, no presente trabalho são analisadas características destes métodos e limitações quanto à aplicação e comparação dos resultados, para as bacias e microbacias estudadas. É apresentada, ainda, análise dos valores de descarga de sedimentos estimados em função de aspectos relacionados com as bacias e microbacias hidrográficas contribuintes.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Maior compreensão a respeito de aspectos relacionados com o transporte de sedimentos em rios e com métodos empíricos disponíveis para estimativas indiretas de descargas de sedimentos em rios.

2.2 Objetivos Específicos

- Analisar diferentes métodos empíricos disponíveis na literatura para estimativa de descargas sólidas em rios através da análise de suas características e de resultados de aplicações às bacias dos rios Santa Joana e Santa Maria do Doce e respectivas sub-bacias Sossego e Santa Júlia.
- Levantamento e análise de informações a respeito das bacias dos rios Santa Joana e Santa Maria do Doce e dos córregos Sossego e Santa Júlia relacionadas com a propensão à erosão e produção de sedimentos, incluindo precipitações pluviométricas, relevo, tipos de solos e uso e ocupação do solo.
- Estimativa, para as bacias e microbacias estudadas, de descargas sólidas, a partir de resultados de medições de sedimentos em suspensão e granulometria de sedimentos de leito, através da aplicação de diferentes métodos.
- Análise e comparação dos resultados obtidos pelos diferentes métodos, considerando características das bacias hidrográficas contribuintes.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Hidrossedimentologia e processos erosivos em bacias hidrográficas

Os processos hidrossedimentológicos estão intimamente vinculados ao ciclo hidrológico e os materiais resultantes do processo de erosão acabam sendo transportados principalmente pela ação das águas de escoamento superficial. (SILVA *et al.*, 2003; VESTANA, 2008).

A erosão, o transporte e a deposição de sedimentos são processos naturais que podem sofrer desequilíbrio com a ação do homem. Ações como a retirada da vegetação, o manejo inadequado do solo, e a ocupação urbana acelerada próxima às margens de rios são alguns dos fatores que afetam o transporte de sedimentos. O desequilíbrio dos processos sedimentares em um rio pode ocasionar o aumento da ocorrência de enchentes, reduzir a vida útil de reservatórios, prejudicar a prática da navegação e elevar os custos de tratamento da água (SCAPIN *et al.*, 2007).

A erosão hídrica diminui a capacidade produtiva do solo e é uma das responsáveis pela produção de sedimentos na bacia hidrográfica, sendo constituída por um processo de três fases: desagregação, transporte e deposição da partícula do solo (BRANCO, 1998; MENDES, 2005). A primeira é a desagregação, que ocorre quando as partículas de solo são desagregadas pelo impacto das gotas de chuva na superfície do solo descoberto. A segunda é o transporte das partículas desagregadas, principalmente pela água que não se infiltra no solo e escorre superficialmente (enxurrada) e a terceira é a deposição das partículas desagregadas nas partes mais baixas da paisagem (vales e leitos dos rios), sendo que essas partículas passam a ser chamadas de sedimentos (EDWARDS e GLYSSON, 1999 *apud* LOUREIRO, 2008; CARVALHO, 2008).

Segundo Botelho (1997) *apud* Mendonça (2013), a análise de uma bacia hidrográfica não compreende apenas os processos que ocorrem no leito dos rios, já que grande parte dos sedimentos transportados é oriunda de áreas situadas mais a

montante, vindos das encostas da bacia. Assim, qualquer alteração que aconteça em uma bacia hidrográfica repercutirá em consequências diretas ou indiretas sobre os canais fluviais.

Os fatores que determinam a produção de sedimentos de uma bacia hidrográfica, segundo Yang (1996), podem ser resumidos em: quantidade e intensidade pluviométrica; tipo de solo e formação geológica; cobertura do solo; uso do solo; topografia; taxa de erosão; drenagem; declividade; forma, tamanho e alinhamento dos canais; características dos sedimentos, tais como granulometria e mineralogia; e características hidráulicas do canal.

Segundo Nascimento e Coiado (2001), a erosão superficial das bacias hidrográficas desprotegidas provavelmente é a responsável pelo arraste de milhares de toneladas de solo fértil para dentro das calhas dos rios.

A produção de sedimentos pode ser entendida como a quantidade de partículas erodidas que são transportadas pelo curso d'água. Tal produção acontece através da associação de eventos naturais e antrópicos que, associados a diversas variáveis, têm maior ou menor produção por área. A produção de sedimentos pode ser expressa em metros cúbicos ou em toneladas, quando referida à área da bacia, podendo ser também expressa como produção específica, em $m^3/km^2/ano$ ou $t/km^2/ano$ (PEREIRA, 2010).

A bacia hidrográfica do rio Doce apresenta alta capacidade de produção de sedimentos devida à localização e fisiografia da bacia, com grande declividade nos seus trechos alto e médio. O material de origem, a elevada pluviosidade e o alto índice de desmatamento das matas ciliares e demais coberturas vegetais contribuem para a erosão do solo e a conseqüente produção de sedimentos carregados para os corpos hídricos da bacia (COELHO, 2007).

3.2 Transporte fluvial de sedimentos

O movimento dos sedimentos no leito fluvial depende da estrutura mecânica do fluxo configurando um sistema dinâmico e em permanente evolução. As propriedades deste movimento estão relacionadas principalmente com as características do fluido (densidade e viscosidade) do escoamento (declividade e profundidade) e do sedimento (diâmetro e densidade) (YALIN, 1972 *apud* MARTINS, 2004).

Os sedimentos que chegam ao curso d'água têm diversas granulometrias e sofrem processos de transporte diferenciados, de acordo com as condições do local e do escoamento. As forças que atuam sobre a partícula podem mantê-la deslizando ou rolando ao longo do leito, saltando do leito para o escoamento e em suspensão ou no fundo do rio. As formas do transporte de sedimentos podem ser definidas em três tipos, conforme citado em Carvalho (2008) e apresentados na Figura 1.

Carga Sólida de Arrasto: são as partículas de sedimento que rolam ou escorregam longitudinalmente no curso d'água. As partículas estão em contato com o leito praticamente todo o tempo;

Carga Sólida Saltante: são as partículas que pulam ao longo do curso d'água por efeito da correnteza ou devido ao impacto de outras partículas; e;

Carga Sólida em Suspensão: são as partículas que estão suportadas pelas componentes verticais das velocidades do fluxo turbulento, enquanto estão sendo transportadas pelas componentes horizontais dessas velocidades, sendo pequenas suficientemente para permanecerem em suspensão.

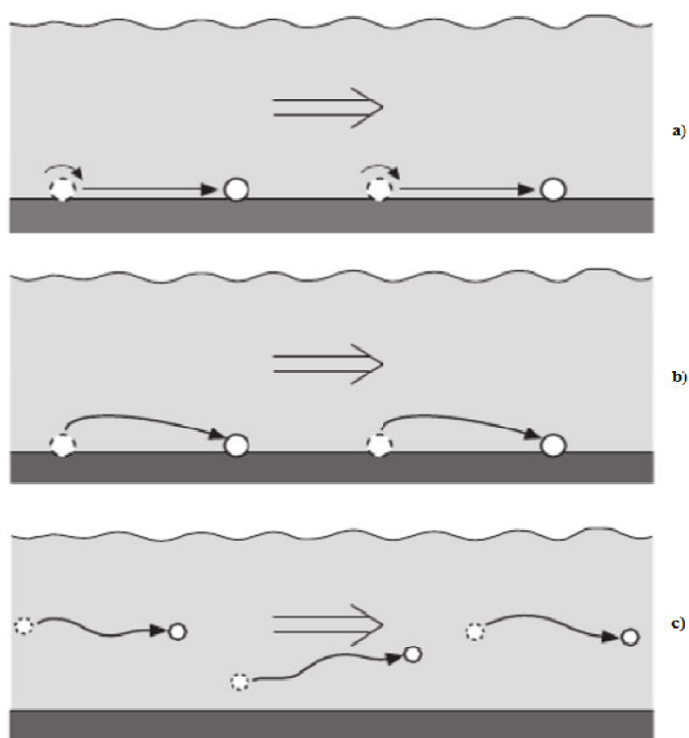


Figura 1 - Movimento de partículas de sedimentos no curso d'água.
 a) deslizando ou rolando ao longo do leito; b) saltação de partículas; c) partículas em suspensão.

Fonte: Lopes (2012).

São duas as forças principais que atuam sobre a dinâmica fluvial e o transporte de sedimentos: a força da gravidade e a tensão de cisalhamento. A força da gravidade é a força vertical exercida pela massa líquida sobre o canal, e direciona o fluxo das áreas com maior declividade para as partes mais baixas (CHRISTOFOLETTI, 1981). A tensão de cisalhamento por unidade de área é a força de atrito existente entre o líquido em movimento e o canal, implicando em uma resistência ao escoamento e ao transporte de sedimentos. Esta força é decisiva para iniciar o movimento de partículas pequenas, enquanto para o carregamento das partículas maiores além do atrito, a velocidade do fluxo é também imprescindível (SUGUIO e BIGARELLA, 1990).

Quando as forças hidrodinâmicas atingem valores superiores aos das forças de resistência, provenientes do contato da partícula com o leito e do próprio peso da partícula, ocorre o deslocamento do grão de sedimento (CHRISTOFOLETTI, 1981; CARVALHO, 2008).

Sendo assim, partículas de sedimento de fundo podem entrar na coluna d'água por um curto período de tempo, fazer parte da carga de sedimento em suspensão, e depois se depositar novamente e retornar à carga de fundo. Este processo é uma espécie de ciclo contínuo em que a circularidade é dependente da velocidade do fluxo, da intensidade da turbulência, da tensão de cisalhamento do grão, da concentração de sedimentos na coluna d'água, do tamanho dos sedimentos, e das formas de fundo. O entendimento desse processo é fundamental para compreender o comportamento de um curso d'água (HOLMES, 2010).

O transporte de sedimentos em suspensão é uma função predominante da velocidade da corrente, e o transporte de sedimentos do leito é influenciado pelo atrito que atua no seu deslocamento (CARVALHO, 2008). Em rios naturais, os sedimentos são transportados principalmente como carga suspensa (YANG, 1996; BRANCO, 1998).

Na carga sólida do leito encontra-se o material grosso, como areias e pedregulhos, e, como o volume e densidade das partículas são maiores, e a velocidade da descarga do leito é menor que a do fluxo, as partículas podem se movimentar de modo intermitente (CHRISTOFOLETTI, 1981).

A Figura 2 apresenta as zonas de amostragem das cargas em suspensão e de leito.

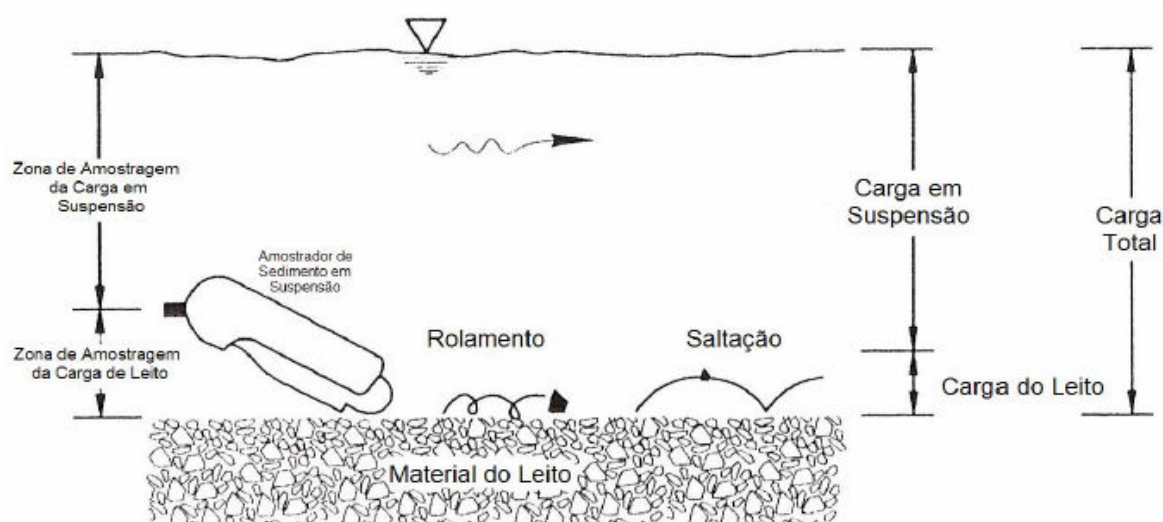


Figura 2 - Zonas de amostragens de sedimentos em suspensão e de leito.
Fonte: Morris e Fan (1997) *apud* Vestena (2008).

3.3 Descarga de sedimentos

A carga de sedimentos diz respeito ao tipo de material transportado, podendo ser em suspensão, de arrasto, em contato e saltante, enquanto que o termo “descarga sólida” ou “descarga de sedimentos” é definido como a massa total de sedimentos que passa em uma seção transversal do rio por unidade de tempo, geralmente expressa em toneladas por dia (VANONI, 1977 *apud* COSTAS, 2003).

Einstein (1964) *apud* Hilu (2003), explicou:

“Toda partícula sólida que passa por uma determinada seção do rio deve satisfazer as seguintes condições: (1) deve ter sido erodida em algum lugar do canal a montante da seção medida, (2) deve ter sido transportada pelo fluxo do lugar onde erodiu até a seção medida. A taxa de sedimentos que passam pela seção medida depende da condição do material no rio e da capacidade de transporte do fluxo.

A obtenção da descarga de sedimentos em suspensão e de leito é realizada geralmente por meio da utilização de técnicas de amostragem e análises granulométricas do sedimento em suspensão e do leito que permitem, a partir de sua análise, o cálculo do volume transportado. Considerando que não se pode fixar, *a priori*, as percentagens da descarga sólida total que são transportadas em suspensão e no leito, deve-se estimá-las e somá-las para estimar a descarga sólida total (VESTENA, 2008).

A separação da medição se deve ao fato das forças de resistência aos movimentos envolvidos nos processos de transporte em suspensão e no leito serem diferentes (CARVALHO *et al.*, 2000a).

A descarga sólida em suspensão é composta pelo material em suspensão proveniente do material do rio e do escoamento superficial da bacia hidrográfica (COIADO *et al.*, 2001). Segundo Carvalho *et al.* (2000a), a descarga sólida em suspensão pode corresponder, em média, entre 70% e 95% da descarga sólida total, sendo função da posição da seção transversal no curso d'água e de outros

fatores, o que faz com que o sedimento em suspensão represente, na maioria dos casos, a maior quantidade de descarga sólida total.

O cálculo da descarga sólida em suspensão é simples de se realizar e oferece a maior aproximação da realidade. Por definição, segundo Santos *et al.* (2001), tem-se a equação (01):

$$Q_{ss} = 0,0864 \cdot Q \cdot C_{ss} \quad (01)$$

Onde:

Q_{ss} : descarga sólida em suspensão ($\text{ton} \cdot \text{d}^{-1}$);

Q : vazão líquida ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$);

C_{ss} : concentração de sedimentos em suspensão (ppm ou $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$).

A amostragem de material em suspensão normalmente é feita com o objetivo de determinar: a concentração média de sedimentos em suspensão na seção, sua distribuição ao longo da seção e das verticais de amostragem, a distribuição granulométrica dos sedimentos em suspensão e a descarga sólida em suspensão. A amostragem pode ser feita utilizando-se amostradores pontuais ou amostradores integradores na profundidade, que coletam amostras representativas de cada vertical, da superfície até próximo do fundo (COIADO *et al.*, 2001).

De acordo com Carvalho (2008), o material de leito se movimenta como carga de arrasto e como carga saltante, incorporando-se também ao material em suspensão devido às condições hidráulicas do escoamento, sendo normalmente partículas maiores que argila e silte ($D > 0,0625 \text{ mm}$). Assim sendo, a descarga sólida do material do leito corresponde, aproximadamente, à total subtraída da descarga de material em suspensão.

Conforme Carvalho *et al.* (2000a), a descarga sólida do material de leito representa a menor parte da descarga sólida total, sendo, em média, de 5% a 10%, podendo chegar a 30%.

Para a estimativa indireta da descarga do material de leito, através de fórmulas, é necessário o conhecimento da composição do material de leito. A composição do

material do leito é obtida a partir de amostras coletadas, no trecho em estudo, com a utilização de amostradores. Os amostradores para esse tipo de coleta são equipamentos relativamente simples que fazem a coleta do material de fundo quando são arrastados junto ao leito ou dragas dotadas de emissários que permitem o seu fechamento quando atingem o fundo (COIADO *et al.*, 2001).

3.4 Métodos de estimativa do cálculo da descarga de sedimentos a partir de medições em rios

Na literatura existem diversas equações e métodos para estimativa da descarga sólida transportada pelos rios. Porém, o emprego destes fica limitado à condição de origem. Um grupo de equações é limitado ao cálculo da descarga sobre o leito ou de arrasto (= arrasto + saltação + rolamento), outro grupo é adequado à descarga total do leito (= descarga sobre o leito + descarga do leito suspensa) e outro à descarga sólida total (NASCIMENTO e COIADO, 2001).

O valor da descarga sólida depende de muitas variáveis, mas a maioria dos métodos foram desenvolvidos com base em uma ou duas grandezas predominantes, tais como descarga de água, profundidade média do escoamento, velocidade média defluxo, declividade da linha d'água, tensão de cisalhamento, potência da corrente e diâmetro das partículas de sedimento (CARVALHO, 2008). É muito difícil, simultaneamente, incorporar todas estas variáveis e desenvolver uma única função de descarga de sedimentos.

3.4.1 Métodos de estimativa de descarga sólida total

3.4.1.1 Método de Einstein Modificado por Colby e Hembree (1955)

Colby e Hembree (1955) apresentaram uma modificação do método de Einstein (1950). As modificações consistiram, basicamente, na utilização da velocidade de escoamento medida, ao invés da teórica, e da incorporação de medidas de concentração de material em suspensão. A amostra do material do leito, assim como a do material em suspensão, é fracionada em intervalos granulométricos (LOPES, 1993).

De acordo com Paiva (2001), o Método de Einstein Modificado por Colby e Hembree (1955) calcula a descarga total de sedimentos, a partir de medidas da descarga de sedimentos em suspensão na seção do rio até uma pequena distância do fundo, da extrapolação da carga em suspensão medida até o fundo do rio e do conhecimento da granulometria do material em suspensão e do leito.

O trabalho original do USBR (1955) foi adaptado para o sistema métrico por Otto Pfafstetter, do extinto Departamento Nacional de Obras de Saneamento e os gráficos dependentes de unidades foram adaptados ao sistema métrico por Carvalho (2008).

O Método de Einstein Modificado (1955) necessita de pelo menos uma faixa granulométrica coincidente de ambas as descargas de fundo e suspensão. O Método dos Z's de Lara requer pelo menos 3. Enfatiza-se que o Método Modificado de Einstein só processará os dados se existir, mesmo que mínima, uma coincidência de materiais tanto em suspensão quanto de fundo. Em outras palavras, é necessário que as duas curvas granulométricas possuam um trecho coincidente no qual partículas de mesmo diâmetro são encontradas nos dois tipos de descarga (MENDES, 2002).

3.4.1.2 Método Simplificado de Colby (1957)

O método simplificado desenvolvido por Colby, em 1957, baseou-se no método de Einstein Modificado e em várias medições de campo. Basicamente utiliza três

ábacos e dados de descarga líquida, velocidade média, profundidade média, largura da seção e concentração medida de sedimentos em suspensão.

Os ábacos foram obtidos de um desenvolvimento semiempírico baseado em experiências sobre diversos processos de cálculos de descarga sólida, principalmente no Método de Einstein Modificado e medições em diversos rios dos EUA. Os gráficos de Colby originalmente apresentados no sistema de unidades inglesas foi apresentado por Carvalho (2008) no sistema métrico.

Lopes (1993) destacou que é importante observar que o método Simplificado de Colby (1957) apresentou bons resultados para os dados analisados por ele, servindo para estimativas aproximadas numa seção qualquer quando não se disponha de outros dados. O método Simplificado de Colby é vantajoso no que concerne à simplicidade na aplicação e à necessidade de poucos dados. Segundo Costa (2012), o método é bastante aplicado em estudos desenvolvidos no Brasil, por só necessitarem de dados de medição de descarga líquida e de concentração de sedimentos em suspensão.

3.4.2 Métodos de estimativa de descarga sólida de material do leito

Na literatura, são abundantes os métodos que permitem estimar a descarga de sedimentos de fundo em cursos d'água. Foram selecionadas apenas 5 métodos para serem aplicados neste trabalho. Os métodos foram escolhidos de acordo com as limitações de aplicação em relação às condições hidrodinâmicas encontradas nas seções estudadas e de acordo com a extensão de uso e grau de reconhecimento dos mesmos na literatura.

Na escolha dos métodos tentou-se optar por fórmulas com diferentes abordagens para verificar o comportamento de cada uma delas ao local. Além disso, foram considerados também os dados de campo que poderiam ser viabilizados dentro das limitações do projeto. Portanto, para este trabalho foram utilizados os métodos

propostos por Engelund & Hansen (1967), Yang (1973), Ackers & White (1973) e os mais recentes, Karim (1998) e Cheng (2002).

3.4.2.1 Método de Engelund & Hansen (1967)

É um método que calcula a descarga sólida de material de leito, incluindo os movimentos por arrasto e em suspensão (SIMONS; SENTÜRK, 1992 *apud* SOUTO, 2013). É semiempírico, baseado na tensão de cisalhamento, potência da corrente e princípio de similaridade (YANG, 1996; HOSSAIN e RAHMAN, 1998; CARVALHO, 2008). Foi desenvolvido a partir de experimentos de laboratório, em condições de altas taxas de transporte e declividades suaves (MESELHE *et al.*, 2010).

De acordo com Paiva (1988) *apud* Scapin *et al.* (2007), Engelund & Hansen fizeram uma análise com base em condições de similaridade para prever o fator de atrito. Separaram o gradiente de energia em: uma declividade devido à rugosidade dos grãos e outra devido às formas de fundo. As hipóteses de semelhança, quando em duas correntes dinamicamente semelhantes, foram: a tensão de atrito devido aos grãos deve ser a mesma e a perda por expansão, devido à rugosidade de forma, é a mesma fração da perda total de energia.

O método de Engelund & Hansen (1967) é um dos métodos mais utilizados na prática devido à sua base teórica e confirmação com os experimentos. A equação foi desenvolvida com base em 116 séries de dados de laboratório, que incluem calhas com sedimento de diâmetro médio de 0,19 mm a 0,93 mm, com profundidades até 0,34 m (MOLINAS e WU, 2001; BRUNNER, 2010). Yang (1996) e Carvalho (2008) especificam que a equação pode ser usada, com precisão razoável, tendo o material de leito diâmetro médio superior a 0,15 mm.

O método de Engelund & Hansen (1967) foi projetado para estimar a descarga de sedimentos quando o leito do rio é formado por dunas, com areias médias e grossas e (BATALLA, 1997). Uma particularidade desta equação é que a mesma não considera o efeito da viscosidade do fluido (CHENG, 2011).

3.4.2.2 Método de Yang (1973)

Yang (1973) analisou dados de laboratório e de campo e desenvolveu uma equação para estimativa da descarga sólida de material de leito, para leitos de rios compostos por areias. O método é baseado na análise dimensional e no conceito de potência unitária do escoamento, que é o valor da energia potencial dissipada por unidade de peso da água, sendo expressa pelo produto da velocidade da corrente pela declividade (PAIVA, 1995; HOSSAIN e RAHMAN, 1998; PAIVA, 2001; MOLINA e WU, 2001; CARVALHO, 2008).

O método de Yang (1973) considera uma série de constantes e coeficientes determinados por regressão múltipla a partir da análise de dados de laboratório e parâmetros de escoamento e de sedimentos (CARVALHO, 2008). A precisão e aplicabilidade do método de Yang (1973) foram verificadas experimentalmente para um grupo de 1093 dados de laboratório e 166 dados de rios, variando de 0,137 mm a 1,35 mm de tamanho de partícula, e 0,022 m a 0,86 m de profundidade de fluxo (YANG, 1996; MOLINAS e WU, 2001).

Segundo Paiva (2001), o método de Yang (1973) é proposto para uso tanto em calha de laboratório como em rios naturais e pode ser usado para qualquer tipo de forma de fundo. Entre os métodos aplicados por Scapin (2005), o método de Yang (1973) apresentou os melhores resultados quando comparados com a descarga sólida direta.

3.4.2.3 Método de Ackers & White (1973)

O método de Ackers & White (1967) é semiempírico e foi desenvolvido para estimativa da descarga sólida de material de leito baseado no conceito de potência de corrente (MOLINAS e WU, 2001). O método utiliza a técnica da análise dimensional para expressar a mobilidade e a taxa de transporte de sedimentos em termos de três grupos adimensionais: granulometria (D_{gr}), mobilidade da partícula

(F_{gr}) e descarga sólida (G_{gr}) (PAIVA, 1995; YANG, 1996; HOSSAIN e RAHMAN, 1998; CARVALHO, 2008).

As relações propostas no método foram obtidas com base em 925 experiências em calhas laboratoriais com movimentos uniformes e aproximadamente uniformes, para profundidades de até 0,40 m, e para tamanhos de partículas entre 0,04 mm a 4,94 mm (YANG, 1996; MOLINAS e WU, 2001; BRUNNER, 2010). Comparações foram feitas com dados obtidos em pesquisas de campo nas estações sedimentométricas de Wallingford, na Inglaterra (PAIVA, 1995).

O método de Ackers & White (1973) deve ser aplicado quando o número de Froude for inferior a 0,8 e as condições hidráulicas onde o leito do rio é formado por ondulações, dunas ou leito plano (YANG, 1996; BATALLA, 1997).

O método considera que os sedimentos grossos são transportados principalmente como carga do leito e somente uma parte da tensão de cisalhamento no leito do canal causa movimento dos sedimentos grossos. Os sedimentos finos são transportados como carga em suspensão devido à tensão de cisalhamento total que causa seu movimento (CARVALHO, 2008).

De acordo com Paiva (1995), pesquisas realizadas no rio Paraguai, com tamanho médio $D_{50} = 24$ mm, apresentaram erro médio em torno de 7% e desvio padrão aproximadamente igual a 82%. Melhores resultados foram obtidos quando se usou $D_{35} = 0,20$ mm como diâmetro representativo do material.

3.4.2.4 Método de Karim (1998)

Karim (1998), para desenvolvimento de uma nova equação, reporta-se a outros trabalhos de sua autoria publicados na década de 80, nos quais determinou uma expressão para obtenção da descarga de sedimentos por unidade de largura (qs) para amostras de sedimentos uniformes.

No trabalho de 1998, o autor altera a equação apresentada entre os anos de 1981 e 1983, incidindo sobre esta uma expressão que contempla um fator de ocultação e que também possibilita o cálculo da descarga de sedimentos, tanto para sedimentos de granulometria uniforme, quanto para aqueles de granulometria não-uniforme

A integração entre os diferentes granulometrias de sedimentos é feita através de uma formulação na qual se insere uma expressão que contempla o fator de ocultação, refletindo a redução no transporte das partículas finas, devido ao seu encobrimento ou ocultação pelas partículas maiores (PAIVA, 2007). A expressão para fator de ocultação foi testada para diversos grupos de dados de escoamentos com superfície livre, incluindo ensaios de laboratório e dados de levantamentos de correntes naturais. No total foram testados 15 conjuntos de dados, sendo 12 em laboratório e 3 em rios (KARIM, 1998).

Para os dados analisados nos experimentos de Karim (1998), o diâmetro do sedimento, D_{50} , variou entre 0,137 a 28,65 mm, a concentração média de sedimentos variou entre 20 a 49,3 ppm, a profundidade variou entre 0,03 a 5,29 m, a velocidade entre 0,32 a 2,88 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, a declividade entre 0,00005 a 0,00732 $\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$, a temperatura entre 0,6 a 38 °C e o número de Froude entre 0,09 a 2,08.

3.4.2.5 Método de Cheng (2002)

De acordo com Cheng (2002) a maioria das fórmulas disponíveis na literatura para o transporte de sedimentos de leito se adaptava bem para moderadas a elevadas tensões de cisalhamento. O autor procurou adequar algumas fórmulas para cálculo da descarga de sedimentos aplicáveis para condições de baixas a altas tensões de cisalhamento.

Segundo o mesmo autor, a fórmula foi testada para vários conjuntos de dados experimentais, incluindo condições de fracas a elevadas tensões de cisalhamento. Foram feitas comparações com diversos métodos de estimativa de descarga sólida de material de leito citados na literatura. Para moderadas tensões de atrito, a fórmula é muito próxima daquelas propostas por Einstein (1950) e Meyer-Peter &

Muller (1984), respectivamente. Para transportes mais fracos, a fórmula se aproxima mais das relações propostas por Einstein (1942) e Paintal (1971).

3.4.3 Alguns estudos empregando métodos analisados

Paiva (1995), a partir de 24 campanhas de medição no rio Atibaia, em São Paulo, obteve a descarga sólida direta e comparou os resultados medidos diretamente com os obtidos por diferentes métodos indiretos de descarga sólida. Os dados hidráulicos, geométricos e sedimentométricos da seção transversal, obtidos durante o período de medições, foram: profundidade (1,12 a 2,74 m); vazão líquida (3,74 a 52,61 m³/s); raio hidráulico (0,83 a 1,65 m); Q_{ss} (2,69 a 443,21 t/dia); Q_{sml} (1,27x10⁻³ a 307,28x10⁻³ t/dia); Q_{st} (3,39 a 443,52 t/dia) e declividade (0,3x10⁻⁴ a 2,31x10⁻⁴ m/m). O autor comparou os métodos de Laursen (1958), Garde e Dattatri (1963), Bagnold (1963), Bishop-Simons e Richardson (1965), Shen e Hungs (1972), Maddock (1976), Karim-Kennedy (1985), Ackers & White (1973), Engelund & Hansen (1967) e Yang (1973, 1976, 1979), utilizando o cálculo da diferença percentual relativa (DIF). Entre os métodos de descargas sólidas indiretas aplicados, usando o diâmetro D₅₀, concluiu que os Engelund & Hansen (1967), Ackers & White e Yang apresentaram os melhores resultados.

Vestena (2008), a partir de medições em uma seção na bacia hidrográfica do Caeté, localizada em Alfredo Wagner, Santa Catarina, com área de drenagem 163,95 km², obteve as seguintes informações em campanhas realizadas entre agosto de 2004 a janeiro de 2008: vazão (0,13 a 70,17m³/s); área molhada (3,06 a 32,28 m²); largura (17,1 a 23,0 m); velocidade média (0,04 a 2,17 m/s) e profundidade (0,15 a 1,12 m). Os métodos empregados para estimativa de descarga sólida foram: Einstein modificado por Colby e Hembree (1955); Colby (1957); Shen e Hung (1971); Ackers & White (1973); Karim (1998); Engelund e Hansen (1997); Yang (1973) e Cheng (2002). O método que melhor se ajustou aos dados medidos em ocasiões de vazões baixas, inferiores a 15,78 m³/s, segundo o autor, foi o de Einstein modificado por Colby e Hembree (1955), seguido pelos métodos de Shen e Hung (1971), Ackers &

White (1973) e Karim (1998). Os métodos de Cheng (2002), Yang (1973) e Colby (1957) superestimaram os valores.

Sobrinho *et al.* (2013) mediram a descarga sólida, em três eventos distintos, em uma seção na foz do córrego Guariroba, município de Campo Grande - MS. Compararam os resultados medidos diretamente de descarga sólida com os obtidos por diferentes métodos indiretos de estimativa de descarga sólida. Obtiveram as seguintes informações através de medições durante os três eventos em uma seção na foz do referido córrego: vazão (entre 4,44 e 5,09 m³/s); área (entre 8,10 e 8,31 m²); velocidade (entre 0,55 e 0,61 m/s); largura (entre 8,50 e 8,80 m) e profundidade (entre 0,94 e 0,96 m). Para o cálculo indireto da descarga sólida utilizaram os métodos de estimativa de: Ackers & White (1973), Colby (1957), Karim (1998) e Yang (1973). Concluíram que as estimativas pelo método de Colby (1957) foram as que melhor se aproximaram da descarga sólida medida. Segundo os autores, os demais métodos superestimaram a descarga sólida por medição direta, sendo o método de Yang (1973) resultou nas maiores estimativas.

Scapin (2005) realizou no rio Arroio Cancela, Santa Maria, RS, treze campanhas de medições de descarga sólida e de parâmetros para a aplicação de métodos indiretos de estimativa de descarga sólida através de medições na seção transversal monitorada foram obtidas as seguintes informações: área da seção transversal (1,80 a 11,41 m²); perímetro da seção (5,07 a 7,02 m); largura da seção (4,30 a 6,00 m); velocidade média do escoamento (0,31 a 1,40 m/s); profundidade média do escoamento (0,37 a 2,22 m); vazão (0,56 a 13,10 m³/s); declividade da linha d'água (0,00110 a 0,0196 m/m). As descargas totais de sedimentos medidas foram comparadas com as estimadas pelos métodos de Einstein Modificado por Colby e Hembree (1955), Colby (1957), Engelund & Hansen (1967), Yang (1973), Ackers & White (1973), Van Rijn (1984), Karim (1998) e Cheng (2002). Neste sentido, segundo os autores, os dois métodos que consideram dados medidos de concentração de sedimentos em suspensão (Einstein Modificado por Colby e Hembree, 1955 e Colby, 1957) obtiveram os melhores resultados. Dos métodos da estimativa indireta da descarga de sedimentos, o método de Yang (1973) foi o que apresentou os melhores resultados. Os métodos de Karim (1998) e Ackers & White (1973) apresentaram bons resultados, mas, subestimaram a descarga sólida

calculada. Os piores resultados foram apresentados pelos métodos de Engelund & Hansen (1967) e Cheng (2002), que superestimaram a descarga sólida calculada.

Almeida (2012) procurou avaliar a adequação de metodologias para o cálculo da descarga de fundo em um trecho do rio Doce, ES. Foram aplicadas as fórmulas propostas por Einstein & Brown (1950), Engelund & Hansen (1967), Ackers & White (1973), Yang (1973) e Van Rijn (1984). Foi observada grande variação nos valores obtidos, com diferenças alcançando várias ordens de magnitude. O autor concluiu que, dentre as equações aplicadas, as equações de Engelund & Hansen (1967) e Van Rijn (1984) foram as que apresentaram as estimativas mais razoáveis para a descarga de sedimentos de fundo. As demais fórmulas aparentemente superestimaram esta descarga, sendo a equação de Yang (1973) a que apresentou as maiores estimativas.

Molinas; Wu (2001) fizeram comparações entre as descargas de sedimentos calculadas e medidas, utilizando os métodos de Engelund & Hansen (1967), Ackers & White (1973) e de Yang (1973). Segundo os mesmos autores, estes métodos, foram desenvolvidos através de experimentos, principalmente em calhas, e não são aplicáveis em rios com grandes profundidades. No estudo foram considerados grandes rios referem-se aqueles com profundidades de fluxo anuais médios superiores a 4 m, e rios com médios portes referem-se aqueles com profundidades médias entre 2 e 4 m. Segundo os mesmos autores, para rios com profundidades médias entre 2 e 4 m, o método de Engelund & Hansen (1967) forneceu valores razoáveis de descarga de sedimentos, enquanto que o método de Ackers & White (1973) superestimou e o método de Yang (1973) subestimou as descargas de sedimentos.

Lopes (1993) realizou estimativa da descarga sólida na barragem da usina de Telêmaco Borda, rio Tibagi, Paraná. No local da barragem, não se dispõe de dados sedimentométricos. Desse modo, foram utilizados dados obtidos a partir de amostras de material em suspensão coletadas em quatro estações sedimentométricas do rio Tibagi. Estimou-se, a partir de cada amostragem em cada uma dessas estações as descargas sólidas totais, utilizando o método de Colby. Segundo o autor, os valores estimados diferiram ligeiramente dos fornecidos pela Companhia Paranaense de

Energia - COPEL. Segundo o mesmo autor, o método de Colby (1957), muito utilizado quando se dispõe somente de medidas de concentração de material em suspensão, não é confiável, a menos que as relações envolvidas sejam calibradas para o caso específico. O autor ainda complementa que, embora alguns métodos apresentem resultados razoáveis com alguma regularidade, nenhum método garante bom desempenho, a menos que seja aplicado nas mesmas condições de sua calibragem.

Rivas *et al.* (2004), com dados de descargas líquida e sólida do rio Orinoco (terceiro maior rio em vazão do mundo) aplicou os métodos de Van Rijn (1984); Engelund & Hansen (1967); Ackers & White (1973); Bagnold (1966) e Yang (1973), com o objetivo de verificar os que melhor se ajustariam para o determinado rio. Segundo os autores, os resultados da aplicação dos referidos métodos de estimativa de descarga sólida não forneceram bons resultados quando comparados com as descargas sólidas medida diretamente. Os autores afirmam que os resultados inadequados podem ter advindo do fato que os referidos métodos de estimativa foram desenvolvidos a partir de dados de laboratório e de pequenos rios.

Diante das incertezas dos métodos de estimativa de descarga de sedimentos, o “TASK COMITEE” (PAIVA, 1988 *apud* PAIVA, 2007), alerta para uma série de observações sobre a utilização dos métodos de descarga de sedimentos e para os critérios de medições da descarga sólida:

- Há uma urgente necessidade de se testarem as fórmulas propostas sob uma variedade de condições como as encontradas na prática da Engenharia;
- uma análise sistemática das condições requeridas para cada fórmula e para cada faixa de condições em que essa fórmula possa ser empregada é necessária;
- de maior importância pode ser uma listagem das condições sob as quais cada fórmula não deve ser aplicada;
- a falta de uma equação de transporte de sedimentos apropriada tende a limitar o progresso no desenvolvimento de relações com bases físicas entre a morfologia do canal e a produção de sedimentos;

- a ausência de uma relação apropriada para os rios naturais faz as interpretações de relações empíricas tênues e dependentes das considerações requeridas para cada fórmula de transporte de sedimentos;
- as relações originadas de canais de laboratório dificilmente contemplarão todas as intervenções impostas pela natureza ao transporte dos sedimentos.

3.5 Declividade da linha d'água

De acordo com Burmester (2005), a equação de Manning foi extensamente pesquisada em trabalhos experimentais realizados entre 1930 e 1950 e resume as características de rugosidade de fundo em um único parâmetro, designado coeficiente de rugosidade ou coeficiente de Manning "n". CHOW (1959) apresentou tabelas fornecendo valores numéricos e fotografias mostrando aspectos relacionados com os cursos d'água e seguidos valores de n . Para cada tipo de canal, são apresentados valores mínimo, normal e máximo.

A fórmula de Manning é a mais utilizada para determinação da declividade da linha d'água (S) em rios e canais em virtude de resultados comprovados sobre a sua validade e da grande quantidade de dados decorrentes das aplicações (SILVA *et al.*, 2003).

Chow (1959) considera que a maior dificuldade na aplicação da fórmula de Manning está na determinação do coeficiente de rugosidade, que é altamente variável e depende de um grande número de fatores como: rugosidade da superfície do perímetro molhado, irregularidade do canal, erosão e decomposição, obstruções do fluxo, tamanho e forma do canal, valores cota x vazão e mudanças sazonais. Para Lee e Mays (1986), o coeficiente de rugosidade e a declividade são responsáveis por 95% das incertezas hidráulicas e não existe método exato para determinar o seu valor.

O coeficiente de rugosidade do escoamento, n , normalmente é definido, como forma de simplificação, como único para determinada seção de canal. Contudo, como

demonstrado por Chow (1959), este coeficiente varia na seção de acordo com o nível d'água. Em geral, quanto menor a profundidade d'água, maiores os efeitos das irregularidades do fundo do canal e, portanto, maior o seu valor (MATOS *et al.*, 2011).

De acordo com Santos (2012), a escolha correta do coeficiente de rugosidade, n , é essencial na avaliação da capacidade de escoamento em canais naturais ou artificiais e selecionar um valor de coeficiente de rugosidade significa estimar a resistência ao escoamento exercida sobre o fluido. Ainda segundo Santos (2012), a variação do coeficiente de rugosidade, n , pode proporcionar grandes variações, como o aumento/diminuição da capacidade de vazão de uma seção, com consequência na análise de problemas de inundações, alteração da velocidade de escoamento ou até sedimentação de detritos.

O valor do coeficiente de rugosidade, n , pode ser calculado no sistema métrico pela fórmula de Strickler (1923), a partir do diâmetro médio, D_m , em m, pela equação (02) (YANG, 1996; CARVALHO, 2008).

$$n = \frac{D_m^{1/6}}{21,1} \quad (02)$$

A fórmula de Stricker (1923) foi obtida em experimentos em um canal de laboratório, de fundo fixo, formado por grãos de areia uniformes colados na parede e no leito. Por essa razão, essa equação não é recomendada para ser aplicada em rios naturais com materiais de leito não uniformes (YANG, 1996; SIMONS e SENTURK, 1992 *apud* PAIVA, 2007).

Meyer-Peter & Muller (1948) alteraram a fórmula de Strickler (1923) para aplicações que contemplam leitos constituídos por misturas de areias. A nova fórmula (Equação 03), que utiliza o D_{90} , no sistema métrico, não é recomendada para aproximar o coeficiente de Manning para leitos constituídos de pedregulhos (YANG, 1996; PAIVA, 2007).

$$n = \frac{D_{90}^{1/6}}{26} \quad (03)$$

A equação (03) fornece bons resultados para canais regulares e aproximadamente prismáticos com fundo de areia. Mesmo que na maioria das vezes, principalmente no caso de canais naturais, essas condições não prevalecem e a resistência constitui-se em um fenômeno muito mais complexo influenciado por macro irregularidades, obstruções, contrações e expansões e outros fatores de difícil quantificação (BURMESTER, 2005; RUSSELL *et al.*, 2010).

Limerinos (1970) apresenta a fórmula de Strickler (1923) para cálculo de n com uso do D_{50} , para leitos compostos por pedras e pequenos pedregulhos, de acordo com a equação (04).

$$n = 0,039 \cdot D_{50}^{1/6} \quad (04)$$

Alguns estudos foram conduzidos com o objetivo da determinação do coeficiente de rugosidade para cursos d'água naturais, a partir da granulometria do leito.

Nascimento (2001), para avaliação do coeficiente de rugosidade, n , dependente do diâmetro das partículas, propõe a utilização da relação de Strickler, de acordo com a equação (05), sendo D_{50} em metros.

$$n = \frac{D_{50}^{1/6}}{24} \quad (05)$$

Alguns autores não apresentam em seus estudos, como foram obtidos os valores do coeficiente de rugosidade. Apenas citam os valores que são considerados no estudo. Hilu (2003) adotou o coeficiente de rugosidade de Manning igual a 0,03; Vestena (2008) adotou coeficiente de rugosidade de Manning igual a 0,03 para rios naturais; Vieira (2011) fixou o coeficiente de Manning em $n = 0,02$ para canais de microbacia desmatadas e $n = 0,03$ para canais de microbacias vegetadas; Almeida (2012) adotou o valor do coeficiente de rugosidade de Manning igual a 0,055; Scapin (2005) adotou coeficiente de rugosidade igual a 0,07.

Campos e Freitas (2007) adotaram o coeficiente de rugosidade, o valor médio calculado com a equação (07) e (08), para cada seção considerada.

$$n = \frac{D_{50}^{1/6}}{21,1} \quad (07)$$

$$n = \frac{D_{90}^{1/6}}{26} \quad (08)$$

3.6 PESO ESPECÍFICO DO SEDIMENTO

Um solo pode possuir partículas com características variadas. Em geral, há mais interesse na determinação do peso específico médio das partículas sólidas que o compõe. O peso específico (γ_s) de uma partícula sólida é, por definição, o peso da substância que a forma, por unidade do volume que ocupa no espaço (ALMEIDA, 2005).

O peso específico do sedimento depende da constituição mineralógica do solo. Geralmente, os constituintes minerais do sedimento são correspondentes à rocha inicial. Quando as partículas são consideradas em conjunto, as variações do peso específico do sedimento são muito pequenas. Por este motivo, geralmente é adotado o valor de 2,65 t/m³ em estudos de transporte de sedimentos (NIÑO e TAMBURRINO, 2009).

Segundo Carvalho *et al.* (2000) sedimento fluvial é todo o material sólido transportado pela água do rio, que tenha uma densidade média aproximada à das rochas fragmentadas possuindo, em média, peso específico igual a 2,65 kg/m³ e é determinado pela razão entre o peso seco do sedimento e o seu volume.

4 METODOLOGIA

Para obtenção de dados para aplicação dos métodos de estimativas das descargas de sedimentos em rios foram analisados resultados de medições *in loco* nas seções transversais consideradas. Foram analisadas informações relativas a 5 (cinco) campanhas de medições em campo realizadas no período de estação seca e chuvosa (Março de 2011 a Maio de 2012), desenvolvidas de acordo com Mendonça *et al.* (2013) dentro do projeto: “Modelagem e Proposição de Alternativas para a Minimização de Produção, Transporte e Deposição de Sedimentos e Melhoria de Qualidade de Água no Sistema Integrado da Bacia Hidrográfica do Rio Doce”, com o apoio da FAPES e do CNPq.

As análises sedimentométricas laboratoriais relativas a estas campanhas foram realizadas no Laboratório de Hidráulica e Monitoramento Ambiental (LABHIDRO/UFES). Mapas da região de estudo foram confeccionados com equipe do Laboratório de Sistemas de Suporte à Decisão em Recursos Hídricos do Grupo de Estudos e Ações em Recursos Hídricos da UFES (GEARH/UFES).

4.1 Caracterização da região de estudo

4.1.1 Características gerais

O estudo abrangeu as bacias dos rios Santa Maria do Doce e Santa Joana, afluentes da margem direita do rio Doce em curso médio. Inseridas nestas bacias foram consideradas, especificamente, as microbacias Santa Júlia e Sossego. Também foram considerados no trabalho dados relativos a seção transversal do rio Doce na localidade de Itapina.

A Figura 3 apresenta as bacias em estudo. Os pontos de monitoramento localizam-se em exutórios das respectivas bacias hidrográficas, com exceção do ponto de

Itapina, localizado no rio Doce, que se localiza a montante dos exultórios das bacias do rio Santa Joana e Santa Maria do Doce.

A bacia do rio Santa Maria do Doce possui área de aproximadamente 910,76 km² e o rio principal desenvolve-se por cerca de 88 km, desde suas nascentes na Serra do Gelo, no município de Santa Teresa, atravessa o município de São Roque do Canaã e segue até o Rio Doce, no interior da sede municipal de Colatina.

A bacia do rio Santa Joana possui área aproximada 883,41 km² e o rio principal estende-se por cerca de 100 km desde suas nascentes, no município de Afonso Cláudio, até desembocar no rio Doce. No seu trajeto, atravessa as sedes municipais de Itarana e Itaguaçu.

A microbacia do córrego Santa Júlia está inserida na bacia do rio Santa Maria do Doce, possuindo área aproximada 72,20 km², na área rural do município de São Roque do Canaã. O curso principal do córrego desenvolve-se por 14 km.

A microbacia do córrego Sossego está inserida na bacia do rio Santa Joana. Este córrego desenvolve-se aproximadamente 19 km no município de Itarana. Sua bacia possui uma área de aproximadamente 62,82 km², em área rural do município de Itarana.

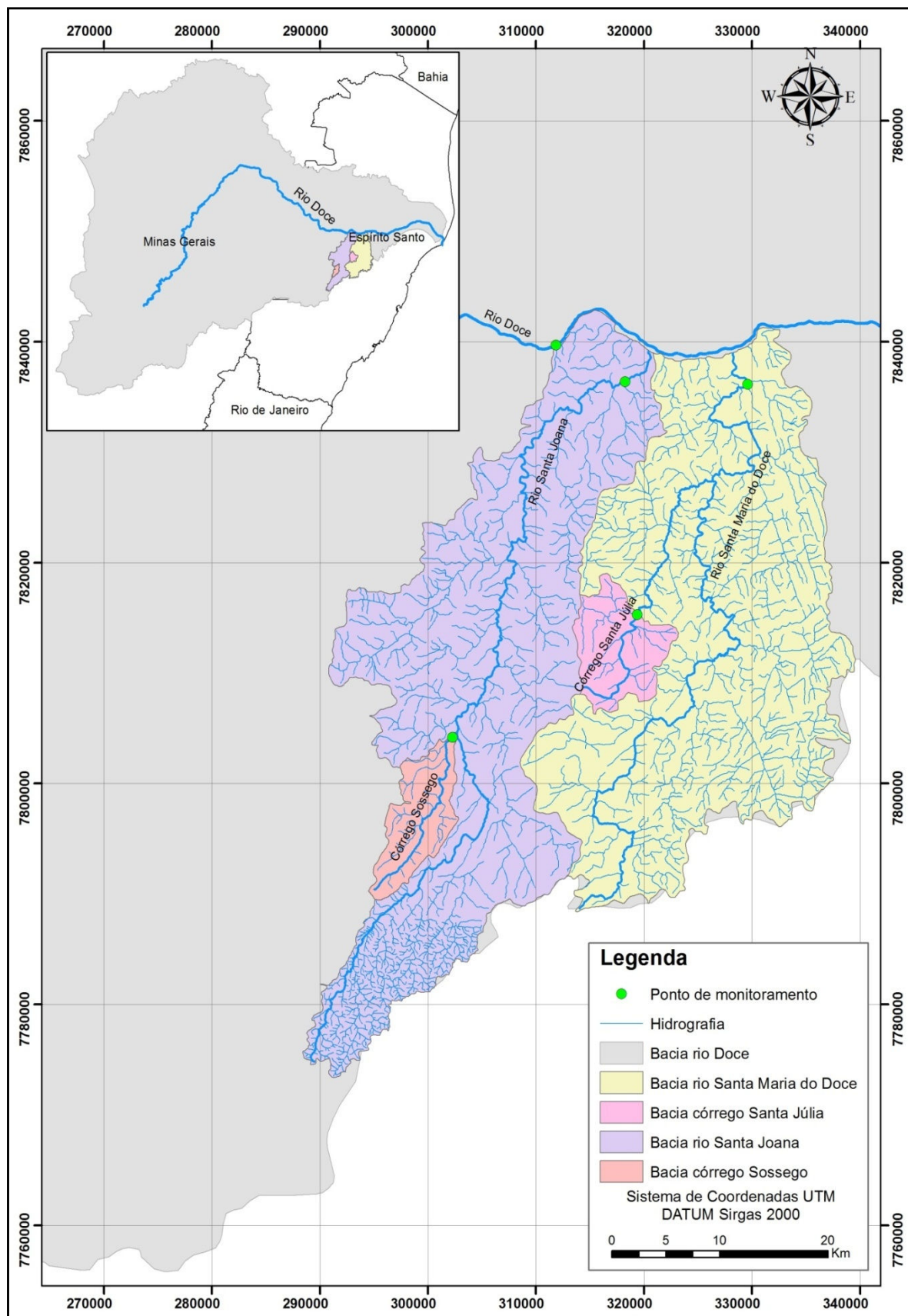


Figura 3 - Localização das bacias hidrográficas estudadas e dos respectivos pontos de monitoramento.

Fonte: Adaptado de Mendonça *et al.* (2013).

Segundo o relatório do Plano de Ação de Recursos Hídricos da Unidade de Análise Santa Maria do Doce (PARH-SANTA MARIA, 2010), que contempla a sub-bacia hidrográfica do rio Santa Maria do Doce e a sub-bacia hidrográfica do rio Santa Joana, o percentual de aproximadamente 75% da área total das bacias hidrográficas é ocupado por atividades agropecuárias, resultando em um elevado grau de antropização das bacias. Quanto à vulnerabilidade à erosão, nas áreas onde o relevo mostra-se com encostas íngremes e clima úmido, são comuns problemas de instabilização de encostas, com a ocorrência de deslizamentos de terra. É observada ainda a existência de sulcos e voçorocas, que predominam em áreas apresentando declives mais acentuados. Estes processos contribuem para a produção de sedimentos nas bacias hidrográficas, uma vez que mais de 85% da área apresenta média a forte suscetibilidade à erosão.

4.1.2 Solos

De acordo com o PARH-Santa Maria (2010), os Latossolos Vermelho Amarelos são os solos que predominam na região de estudo. O mapa de solos da região de estudo foi obtido a partir de shapes disponibilizados pela Empresa de Pesquisa e Energia – EPE (EPE, 2006), conforme apresentado na Figura 4.

A Tabela 1 apresenta as percentagens ocupadas pelas diferentes classes de solos das bacias dos rios Santa Maria do Doce e Santa Joana e microbacias dos córregos Santa Júlia e Sossego.

Tabela 1 - Distribuição percentual das áreas dos diferentes tipos de solo nas bacias e microbacias.

Tipo do solo	Santa Maria do Doce	Santa Joana	Santa Júlia	Sossego
	% área	% área	% área	% área
Latossolo Vermelho Amarelo	67,97	85,13	70,73	80,82
Argissolo Vermelho Amarelo	3,98	1,70	-	0,38
Cambissolo	2,14	2,89	-	-
Nitossolo Vermelho	17,22	2,33	16,17	10,46
Neossolo Litólico	8,69	7,94	13,10	8,34

Fonte: EPE (2006).

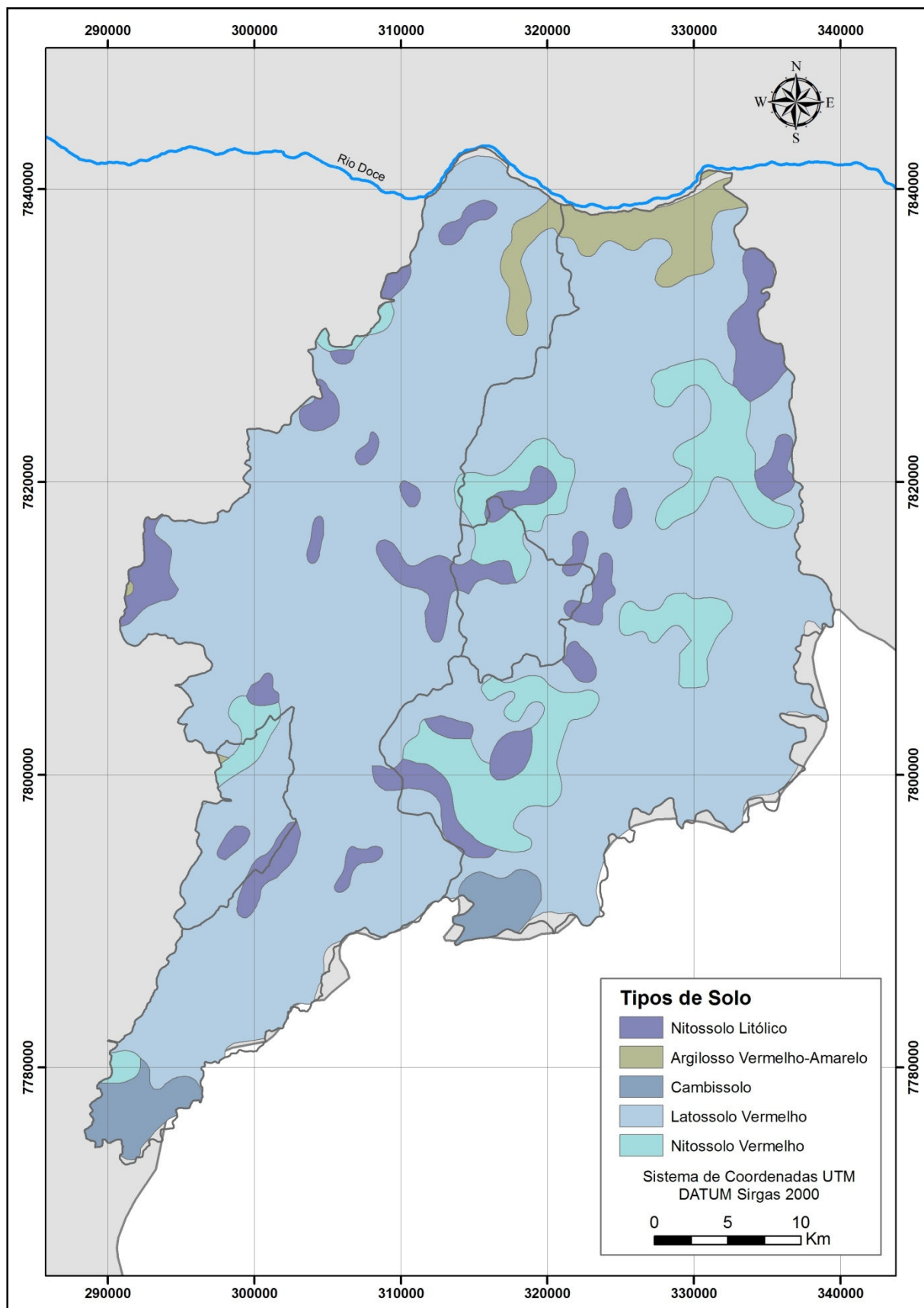


Figura 4 - Principais tipos de solos encontrados na região de estudo.
Fonte: EPE (2006).

Como observado na Tabela 1, há predomínio de Latossolo Vermelho Amarelo nas bacias dos rios Santa Maria do Doce e Santa Joana. Na microbacia do córrego Santa Júlia e Sossego, mais de 70% da área é ocupado por Latossolo Vermelho Amarelo. Segundo Oliveira (2011), as condições de relevo e a baixa erodibilidade dificultam os processos erosivos dos Latossolos.

Segundo Mendonça (2013), os Argissolos Vermelho Amarelo são solos de profundidade variável, os horizontes A, B e C são bastante diferenciados, sendo que o horizonte B apresenta maior teor de argila do que o horizonte A. Para Oliveira (2011), este acúmulo de argila no horizonte B torna os Argissolos menos permeáveis e mais propensos à erosão. Em regiões montanhosas é comum a presença de Argissolo com cascalhos. A presença desse tipo de solo é pequena nas bacias, sendo 3,98% da área na bacia do rio Santa Maria do Doce e 1,70% da área na bacia do Santa Joana. A microbacia do córrego Santa Júlia não possui esse tipo de solo e a microbacia do Sossego apresenta apenas 0,38% da área.

De acordo com a Embrapa (2014), os Nitossolos Vermelhos apresentam alto risco de erosão devido aos relevos acidentados a que estes solos estão associados. Abstraindo-se o relevo, são aptos a todos os usos agropastoris e florestais adaptados às condições climáticas. A bacia do rio Santa Maria do Doce apresenta percentual de área com solo do tipo Nitossolo Vermelho superior com relação a bacia do Santa Joana, respectivamente, 17,22% e 2,33%. As microbacias Santa Júlia e Sossego apresentaram, 16,17% e 10,46% das suas áreas com esse tipo de solo.

Os Neossolos Litólicos são solos minerais desenvolvidos sobre gnaisses, rasos, desenvolvem-se em relevo forte ondulado a montanhoso e em muitos casos, com rochas expostas. Possuem alta suscetibilidade à erosão, visto a sua textura e relevo (OLIVEIRA, 2011). As bacias Santa Maria do Doce e Santa Joana apresentam 8,69% e 7,94%, respectivamente, e as microbacias Santa Júlia e Sossego apresentaram 13,10% e 8,34% das suas áreas com solo do tipo Neossolo Litólico.

4.1.3 Uso e Cobertura do Solo

A Figura 5 mostra os principais tipos de uso do solo da região de estudo, de acordo com Dalla (2011).

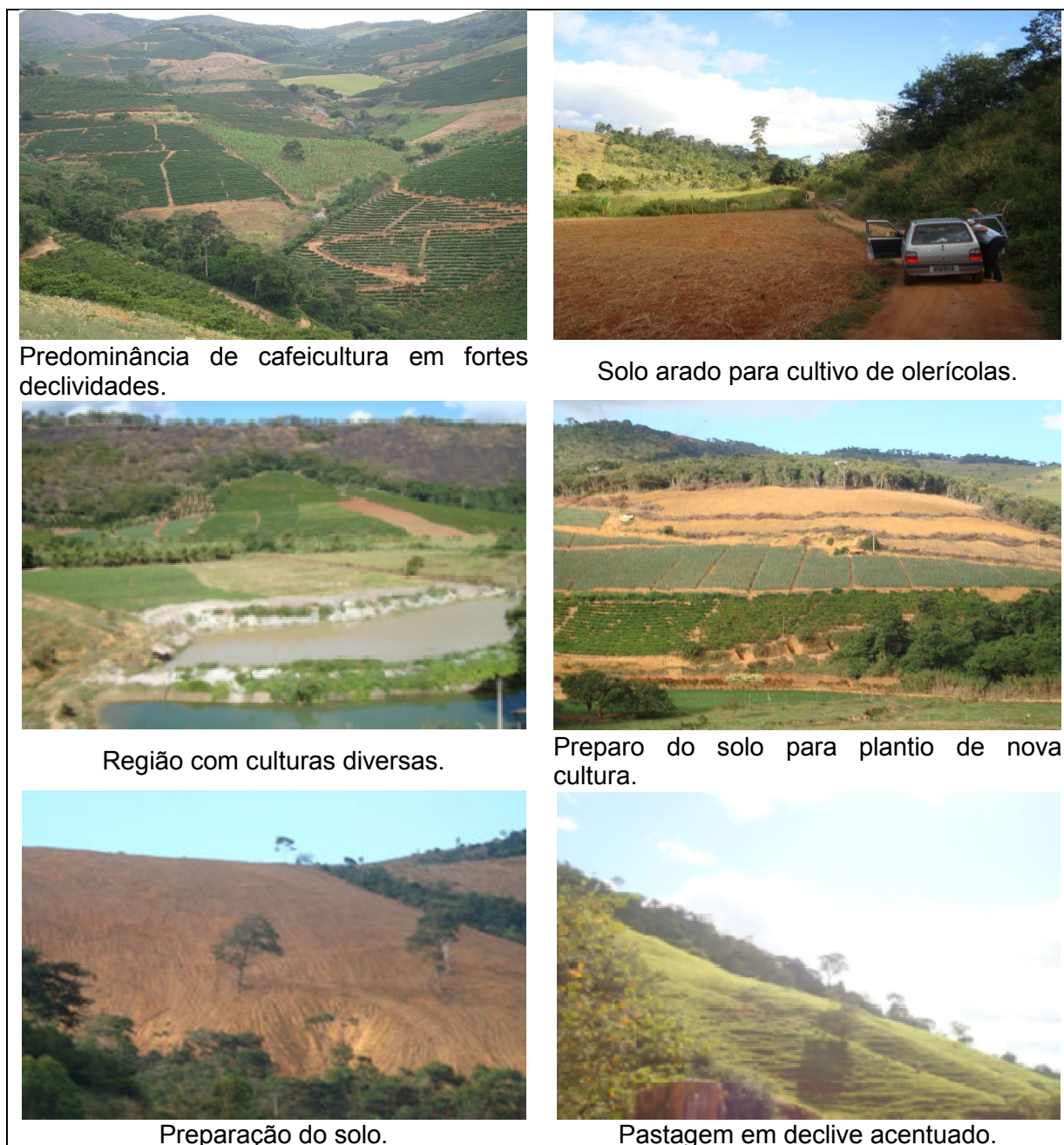


Figura 5 - Alguns tipos de uso do solo das bacias em estudo.

Fonte: Dalla (2011).

De acordo com Mendonça *et al.* (2013), a Tabela 2 apresenta os percentuais correspondentes a cada classe de uso e ocupação para as bacias dos rios Santa Maria do Rio Doce e Santa Joana e microbacias dos córregos Santa Júlia e Sossego.

Tabela 2 - Percentuais de uso e ocupação do solo nas bacias e microbacias hidrográficas.

Uso e ocupação do solo (%)	Santa Maria do Doce	Santa Joana	Santa Júlia	Sossego
	% área	% área	% área	% área
Área urbana	1,00	0,50	0,00	0,00
Cafeicultura	12,10	7,30	24,70	6,74
Agricultura	8,00	10,30	8,58	10,53
Cobertura florestal	22,60	24,00	3,53	17,96
Eucalipto	3,90	1,20	9,13	0,99
Floresta regeneração	8,70	8,90	20,39	0,19
Pastagem	36,10	42,30	24,37	46,25
Afloramento rochoso	5,90	4,80	4,48	6,34
Solo exposto	1,80	0,70	9,73	10,48

Fonte: Mendonça *et al.* (2013).

A classe correspondente à agricultura considera todas as áreas ocupadas por culturas não permanentes, fruticultura, olericultura e outros. Nas áreas onde se desenvolvem culturas agrícolas diversas e nas áreas onde predomina a cafeicultura, as práticas de manejo do solo possuem influência significativa sobre as perdas de solo. Com relação às áreas de agricultura e cafeicultura, somadas, a bacia do rio Santa Maria do Doce apresenta percentual 20,10% e a bacia do rio Santa Joana 17,60%. A microbacia do córrego Santa Júlia apresenta percentual 33,28% e o córrego Sossego 17,27%

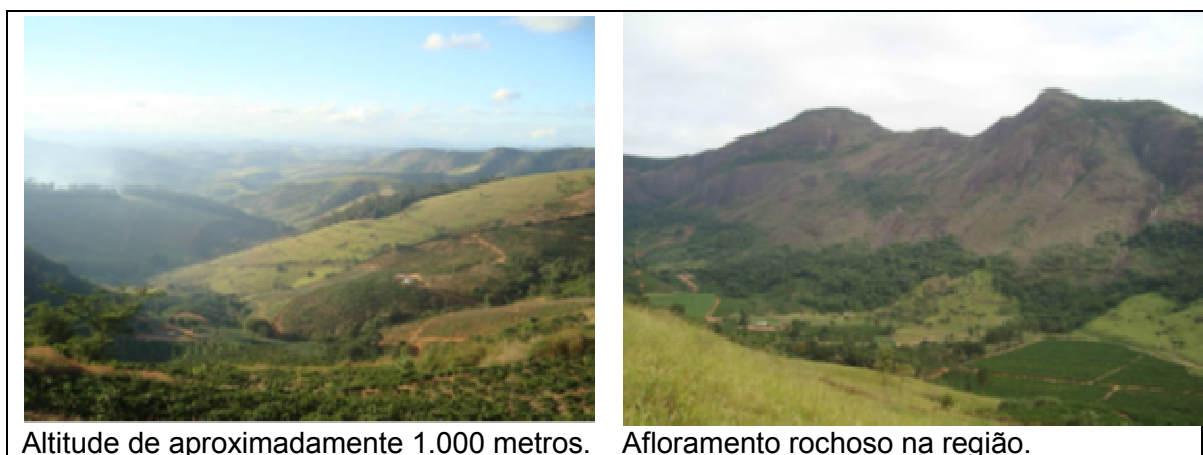
A microbacia do córrego Santa Júlia caracterizou-se por grande área de cultivo de café (24,70%), pastagem (24,37%) e florestas em regeneração (20,39%). A microbacia do córrego Sossego apresentou quase 50% de sua área classificada como pastagem e 0,19% classificada como florestas em regeneração.

Observa-se que se somadas as áreas de pastagem e solo exposto, a bacia do Santa Joana apresenta maior área (43,00%) com relação a bacia do Santa Maria do Doce (37,90), e a microbacia do córrego Sossego (56,73%) é superior a área da microbacia do córrego Santa Júlia.

As áreas de cobertura florestal e florestas em regeneração, somadas, as bacias dos rios Santa Joana e Santa Maria do Doce apresentam áreas próximas (32,90% e 31,30%, respectivamente). Essas áreas somadas, na microbacia do córrego Santa Júlia, apresentam maior área (23,92%) com relação a microbacia do córrego sossego (18,15%).

4.1.4 Relevo e Declividade

A Figura 6 mostra um panorama do relevo comum na região de estudo. O mapa do relevo da região de estudo foi elaborado por Dalla (2011), conforme mostrado na Figura 7.



Altitude de aproximadamente 1.000 metros. Afloramento rochoso na região.

Figura 6 - Panorama do relevo da região de estudo.

Fonte: Dalla (2011).

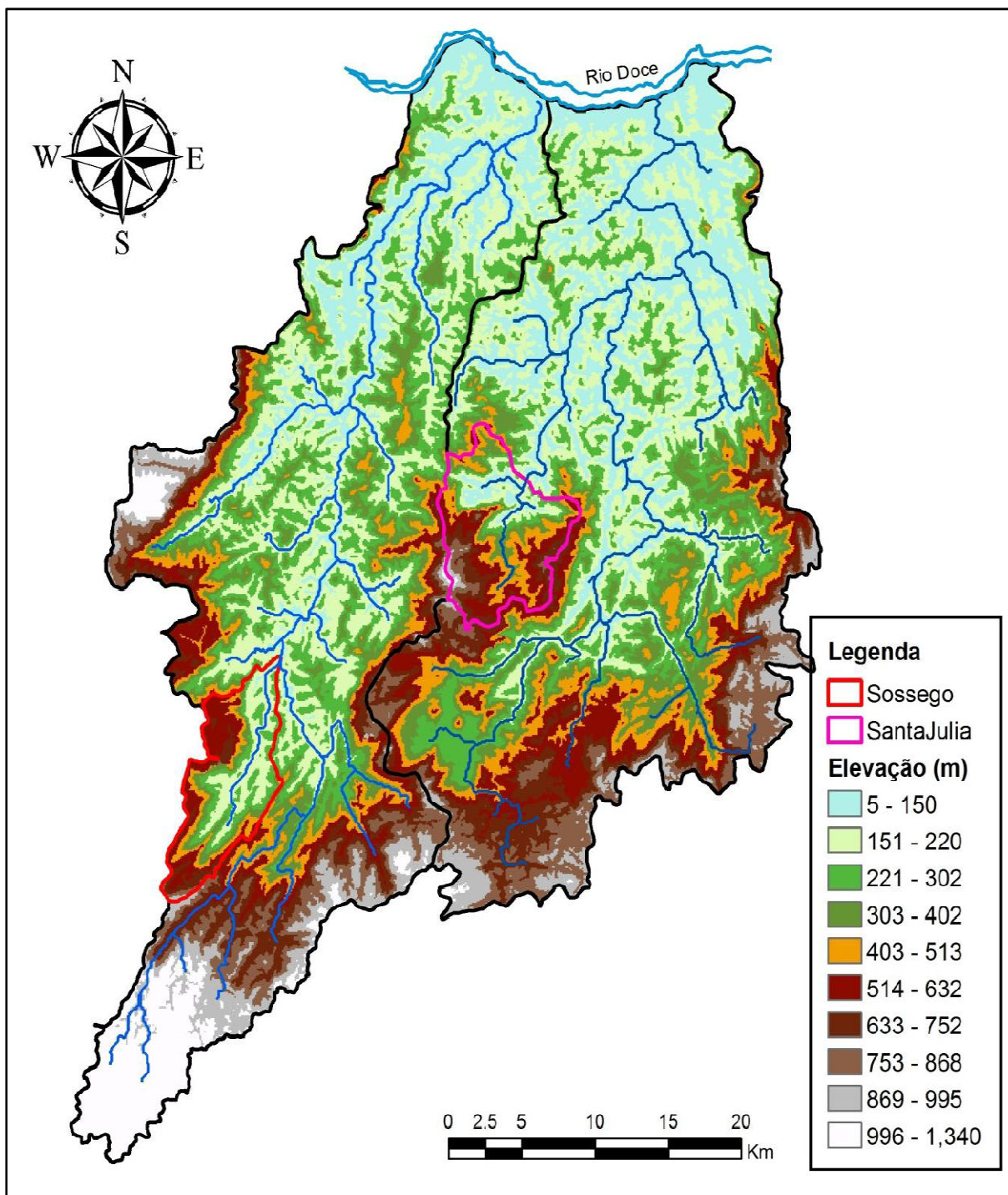


Figura 7 - Relevo da região de estudo.
Fonte: Dalla (2011).

O mapa de declividades, extraído a partir do mapa de altitudes, foi sumarizado em classes, de acordo com a classificação da EMBRAPA (2006), a fim de se obter uma comparação entre as declividades para cada bacia hidrográfica. O resultado dessa classificação é mostrado na Tabela 3.

Tabela 3 - Classes de declividades e percentuais das áreas correspondentes.

Declividade (%)	Santa Maria do Doce	Santa Joana	Santa Júlia	Sossego
	% área	% área	% área	% área
0 - 3 (plano)	2,35	5,27	1,43	3,54
3 - 8 (suavemente ondulado)	7,16	8,90	4,43	8,78
8 - 20 (ondulado)	27,31	23,55	18,33	24,95
20 - 45 (fortemente ondulado)	52,70	52,55	59,31	46,83
45 - 75 (montanhoso)	9,52	9,33	13,71	14,12
> 75 (escarpado)	0,96	0,91	2,80	1,79
Total	100	100	100	100

Fonte: Dalla (2011).

O procedimento metodológico classificação quanto a fragilidade à erosão está embasado na proposta de Ross (1994), que sistematizou uma hierarquia que expressa o grau de fragilidade do ambiente em relação aos processos erosivos fluvial e pluvial representada pelas categorias: muito baixa, baixa, média, alta e muito alta, de acordo com a Tabela 4.

Tabela 4 - Categorias hierárquicas de declividade do relevo, quanto a fragilidade à erosão.

Classificação	Declividade
Muito Fraca	até 6%
Fraca	de 6 a 12%
Média	de 12 a 20%
Forte	de 20 a 30%
Muito Forte	acima de 30%

Fonte: Ross (1994).

Mais de 50% da área das bacias dos rios Santa Maria do Doce e Santa Joana e das microbacias dos córregos Santa Júlia e Sossego apresentam declividade superior a 20%, faixa classificada como relevo fortemente ondulado, montanhoso e escarpado. As bacias dos rios Santa Maria do Doce e Santa Joana apresentam, respectivamente, 63,18% e 62,79% de sua área nessas classes e as microbacias dos córregos Santa Júlia e Sossego apresentam 75,82% e 62,74%, respectivamente. De acordo com a Tabela 4, essas áreas são classificadas como forte e muito forte, quanto a fragilidade à erosão.

4.2 Coleta de Dados

Foram escolhidos pontos de monitoramento, localizados nos rios Doce (na seção da balsa de Itapina), Santa Maria do Doce e Santa Joana e córregos Santa Júlia e Sossego. A Tabela 5 apresenta as coordenadas UTM das seções transversais monitoradas e as áreas das bacias.

Tabela 5 - Coordenadas UTM e áreas das bacias.

Local	Coordenadas UTM (datum WGS84)		Área da Bacia Hidrográfica (km ²)
	Leste	Norte	
Rio Doce - Itapina	309649	7839830	74.329,40
Rio Santa Maria do Doce	329605	7836145	910,76
Rio Santa Joana	318258	7836389	883,41
Córrego Santa Júlia	317689	7811789	72,20
Córrego Sossego	302372	7804031	62,82

Os dados de precipitação foram obtidos no banco de dados Hidroweb, disponibilizado pela Agência Nacional de Águas (ANA). As estações foram selecionadas conforme a localização em relação à área de estudo e a disponibilidade dos dados de chuva nas datas que ocorreram as campanhas de monitoramento hidrossedimentológico. Foram calculadas médias das precipitações registradas em estações pluviométricas em períodos de 3 (três) dias consecutivos até a data das campanhas.

A estimativa da pluviosidade ocorrida nos períodos de monitoramento hidrossedimentológico foi realizada a partir de dados de chuva em 2 (duas) estações pluviométricas na bacia hidrográfica do rio Doce, 3 (três) estações pluviométricas na bacia hidrográfica do rio Santa Maria do Doce, 3 (três) na bacia hidrográfica do rio Santa Joana, 1 (uma) estação na bacia hidrográfica do córrego Santa Júlia e 1 (uma) estação na bacia hidrográfica do córrego Sossego, conforme apresentado na Tabela 6.

Tabela 6 - Estações pluviométricas consideradas.

Local	Nome da estação	Código da estação
Rio Doce - Itapina	Estação de Colatina	1940006
	Estação Baixo Guandu	1941003
Bacia Santa Maria do Doce	Estação Caldeirão	1940020
	Estação São João de Petrópolis	1940001
	Estação de Colatina	1940006
Bacia Santa Joana	Estação Garrafão	2040008
	Estação Itarana	1940000
	Estação Itaimbé	1940012
Bacia Santa Júlia	Estação São João de Petrópolis	1940001
Bacia Sossego	Estação Garrafão	2040008

4.3 MEDIDAS HIDRÁULICAS

4.3.1 Cálculo da Declividade da linha d'água

Neste trabalho, o parâmetro número de Manning serviu de base no processo de cálculo para análise da variação do valor da descarga sólida de material de leito nas bacias estudadas. Foi feita comparação entre diferentes equações para obtenção do coeficiente de rugosidade, n , com o intuito de obter a melhor aproximação do valor real da descarga sólida de material de leito das bacias estudadas.

Considerando a inexistência de valores de declividades da linha d'água (S) obtidos em campo, utilizou-se a fórmula de Manning para estimativa, de acordo com a equação 10:

$$S = \left(\frac{Q \cdot n}{A \cdot R h^{2/3}} \right)^2 \quad (10)$$

Onde:

S : declividade da linha d'água, em $m \cdot m^{-1}$;

Q : vazão, em $m^3 \cdot s^{-1}$;

n : coeficiente de rugosidade de Manning;

A : área da seção transversal, em m²;

Rh : raio hidráulico da seção, em m.

Para aplicação da fórmula de Manning, foi necessária a determinação dos coeficientes de rugosidade das seções. Para isso foram utilizadas as equações de Strickler (1923), Meyer-Peter & Muller (1948) e Limerinos (1970), respectivamente, equações (11), (12) e (13). O emprego de três (3) diferentes equações objetivou a comparação entre resultados.

$$n_1 = \frac{D_m^{1/6}}{21,1} \quad (11)$$

$$n_2 = \frac{D_{90}^{1/6}}{26} \quad (12)$$

$$n_3 = 0,039 \cdot D_{50}^{1/6} \quad (13)$$

4.3.2 Medição da velocidade e descarga líquida

No estudo desenvolvido por Mendonça *et al.* (2013), os dados de velocidade e descarga líquida do rio Doce considerados no presente estudo foram obtidos através da utilização de Perfilador Acústico de Correntes por efeito Doppler (ADCP). Nos demais cursos d'água foram utilizados molinetes fluviométricos.

4.4 Amostragem de sedimentos em suspensão e de material de leito

Nas campanhas realizadas por Mendonça *et al.* (2013), para obtenção dos dados utilizados no presente estudo, foram coletadas amostras de sedimentos de material de leito e em suspensão. As amostragens de sedimentos objetivaram a determinação das descargas sólidas suspensas e de material de leito.

As amostragens de sedimentos em suspensão objetivaram a determinação da concentração, distribuição granulométrica e descarga sólida em suspensão que passava nas seções transversais por unidade de tempo. Foram coletadas amostras em diferentes pontos ao longo da seção escolhida. O número de posições foi definido em função da velocidade média em cada vertical amostrada. Os pontos de amostragem de dados foram coincidentes com verticais de medição de velocidades.

Na amostragem por integração vertical, a mistura água sedimento foi acumulada continuamente em recipiente, com amostrador movendo-se verticalmente em uma velocidade de trânsito constante entre a superfície e um ponto a poucos centímetros do leito.

Foram utilizados equipamentos constituídos por um recipiente com uma abertura para a entrada de água-sedimento e outra para saída de ar, no caso amostradores USDH-59 (AMS-3), com bico de 3/16", apresentado na Figura 8.

As amostras foram acondicionadas em garrafas plásticas identificadas e levadas para o LABHIDRO/UFES para processamento e determinação das concentrações, distribuições granulométricas e descargas sólidas dos sedimentos em suspensão.



Figura 8 - Amostrador de sedimento em suspensão USDH-59 (AMS-3).

As amostragens de material de leito objetivaram a determinação da distribuição granulométrica dos sedimentos. Nas seções foram realizadas coletas do material do leito com auxílio da draga de Petersen (Figura 9). Amostras com aproximadamente 500g foram retiradas e levadas até uma bandeja, sendo a draga aberta com cuidado para que o sedimento não fosse perdido. Em seguida, as amostras foram acondicionadas em sacos plásticos, identificadas e encaminhadas para o LABHIDRO/UFES.

Foram coletadas amostras em diversos pontos, ao longo das seções transversais, escolhidas. Após coletadas, as amostras foram acondicionadas em sacos plásticos e levadas para o LABHIDRO/UFES, para determinações granulométricas.

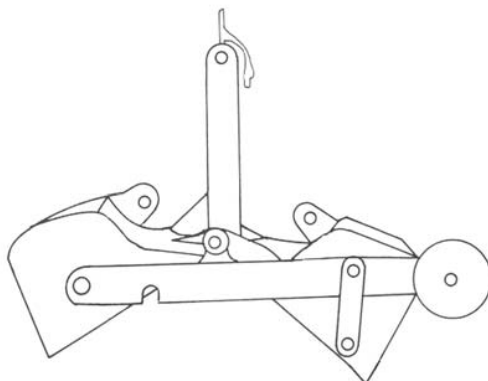


Figura 9 - Amostrador tipo draga de Petersen para coleta de material do leito.

4.5 Análises de laboratório

As amostras coletadas, ao chegarem ao laboratório, foram verificadas quanto às condições de transporte, armazenagem e identificação. Posteriormente, as mesmas seguiram para o processamento de acordo com suas tipologias, pois, segundo Carvalho (2008), a determinação da granulometria do sedimento em suspensão e a do leito e concentração dos sedimentos em suspensão são feitas por métodos distintos, principalmente devido à quantidade de sedimento disponível em cada um dos tipos de amostra e à granulometria do sedimento.

Para determinação da concentração e granulometria das amostras de sedimentos em suspensão utilizou-se o Método de Filtração e o Método de Retirada pelo Fundo, respectivamente. Para determinação da granulometria do material de leito foi utilizado o Método de Peneiramento. Os métodos de análise estão destacados no esquema a seguir (Figura 10).

As amostras foram conservadas ao abrigo da luz, com temperatura amena para evitar a proliferação de algas, bem como a floculação de partículas finas, o que causa alteração na análise granulométrica.

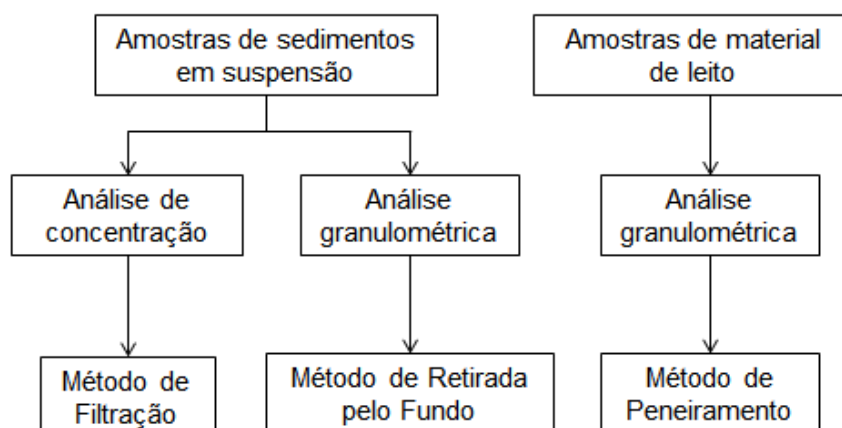


Figura 10 - Métodos de análise do sedimento em suspensão e de leito.

Para realização da análise da concentração pelo Método de Filtração foi necessário utilizar toda a amostra coletada, fazendo-se redução com retirada da água sobrenadante. A amostra reduzida passou por processo de filtragem. Essa operação foi acelerada com o uso de bombas de vácuo, adaptadas aos recipientes coletores do material filtrado. As estimativas de descarga sólida em suspensão foram feitas com uso da Equação 14, apresentada a seguir:

$$Q_{SS} = 0,0864. Q. C_{SS} \quad (14)$$

Onde:

Q_{SS} : descarga sólida em suspensão, em $t.d^{-1}$;

Q : descarga líquida, em $m^3.s^{-1}$;

C_{SS} : concentração de sedimentos suspensos, em $mg.L^{-1}$.

As produções específicas diárias de sedimentos em suspensão (P_{SS}) por unidade de área ($t/dia/km^2$) foram calculadas com o uso da equação 15.

$$P_{SS} = \frac{Q_{SS}}{A} \quad (15)$$

Sendo:

P_{SS} : produção específica da produção de sedimentos em suspensão, em $t/km^2/dia$;

Q_{SS} : descarga sólida dos sedimentos em suspensão, em t/dia ;

A : área da bacia contribuinte, em km^2 .

Para realização da análise granulométrica dos sedimentos em suspensão pelo Método do Tubo de Retirada pelo Fundo (Figura11) foram utilizados 5 litros das amostras coletadas em cada seção estudada. A classificação granulométrica dos sedimentos suspensos para elaboração da curva granulométrica foi feita segundo a *American Geophysical Union* (DNAEE, 1970 *apud* CARVALHO, 2008).

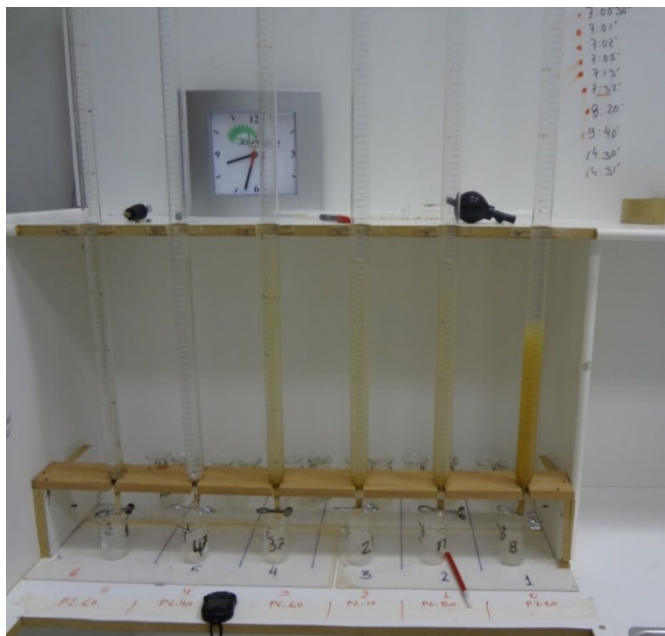


Figura11 - Tubo de retirada pelo fundo para análise granulométrica de material fino.

O Método de Peneiramento foi realizado para determinação das características granulométricas das amostras de material de leito. Em cada seção foi realizada amostragem do material do leito para análise em laboratório e determinação da distribuição granulométrica. Neste processo, foi utilizado o método convencional de secagem, pesagem e peneiramento das amostras.

As curvas granulométricas foram obtidas a partir dos resultados das análises dos sedimentos, pelo Método de Peneiramento. A classificação granulométrica dos sedimentos de leito foi feita segundo metodologia indicada pela *American Geophysical Union* (DNAEE, 1970 *apud* CARVALHO, 2008). A Figura 12 apresenta as peneiras utilizadas para obtenção das granulometrias dos sedimentos pelo Método de Peneiramento.



Figura 12 - Peneiras para análise granulométrica pelo Método de Peneiramento.

Especificamente para o presente estudo foi realizado ensaio para determinação do peso específico do sedimento. Foram realizados ensaios das amostras de sedimento por meio do frasco de Chapman (Figura 13), de acordo com a NBR 9776 (1987). A massa específica do sedimento foi calculada mediante a equação (16):

$$\gamma_s = \frac{500}{L - 200} \quad (16)$$

Onde:

γ_s : peso específico do sedimento, deve ser expresso em kg/m^3 ;

L: leitura do frasco (volume ocupado pelo conjunto água-sedimento) em cm^3 .



Figura 13 - Tubo de Chapman para determinação do peso específico do sedimento.

O valor do peso específico estimado para o material de fundo de cada seção monitorada foi obtido através de média dos resultados de várias repetições. Para cálculo da diferença percentual entre os pesos específicos estimados e oscitados da literatura, foi utilizada a Equação (16).

$$DIF (\%) = \frac{X_2 - X_1}{X_1} \times 100 \quad (16)$$

Onde:

DIF: diferença percentual relativa, em %;

X_1 : peso específico do sedimento considerado da literatura, em Kg/m^3 ;

X_2 : peso específico do sedimento estimado, em Kg/m^3 .

Os valores do diâmetro médio, D_m , das partículas do sedimento foram calculados pela Equação (17):

$$D_m = \sum D_{si} \cdot i_f \quad (17)$$

Onde:

D_m : diâmetro médio das partículas (mm);

D_{si} : diâmetro médio geométrico entre dois diâmetros de uma faixa;

i_f : fração granulométrica entre dois diâmetros, apresentados em %.

4.6 Cálculo da Descarga Sólida dos Sedimentos Através de Fórmulas

4.6.1 Método de Einstein Modificado por Colby e Hembree (1955)

É apresentado, em síntese, o método de Einstein Modificado por Colby e Hembree (1955) para estimativa da descarga sólida total, com uso do sistema métrico, conforme Carvalho (2008). A descrição segue um roteiro para cálculo manual. Porém, já existem modelos computacionais desenvolvidos para este fim, podendo ser citado o modelo matemático “EINSTEIN.xls”, desenvolvido por MENDES (2002) e o Software WinTSR, desenvolvido por Paiva *et al.* (2002).

O resultado de análise das amostras de sedimento em suspensão fornece as seguintes informações:

- a) Concentração média do sedimento em suspensão (C_{ss}), em ppm ou mg.l^{-1} ;
- b) Distribuição granulométrica das amostras de sedimento em suspensão (seguindo a classificação da American Geophysical Union - AGU);
- c) Descarga medida de sedimento em suspensão transportado (Q_{sm}), em t.d^{-1} , calculado a partir da equação (18):

$$Q_{sm} = 0,0864 \cdot Q \cdot C_{ss} \quad (18)$$

É necessário o conhecimento da viscosidade cinemática (ν), obtida no gráfico da Figura 14, a partir do valor da temperatura da água na ocasião da amostragem.

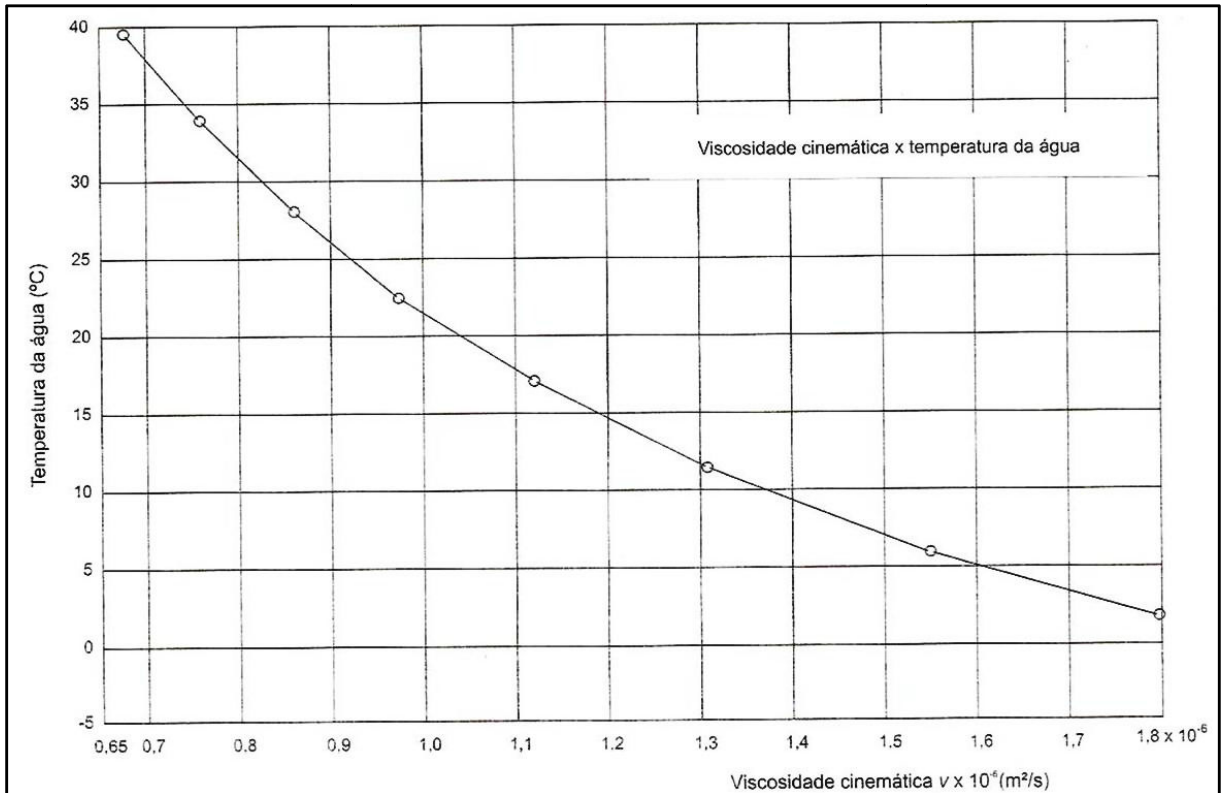


Figura 14 - Viscosidade cinemática em função da temperatura da água.
Fonte: Carvalho (2008).

De posse destes dados, o processo de cálculo consiste nas seguintes etapas:

a) Determinação do fator $R.S$ (Raio hidráulico x Declividade do Gradiente Energético), a partir da equação (19), sendo feito por tentativas, arbitrando-se o valor de x , segundo a variação da Figura 15.

$$\sqrt{R.S} = \frac{U}{18,01 \cdot \log_{10}\left[\frac{12,27 \cdot (x) \cdot (p)}{K_s}\right]} = \frac{U}{7,822 \cdot \ln\left[\frac{12,27 \cdot (x) \cdot (p)}{K_s}\right]} \quad (19)$$

Onde: U é a velocidade média ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), p é a profundidade média (m) e K_s o diâmetro D_{65} .

O valor de x é arbitrado de acordo com resultados de experimentos anteriores e pode ser verificado pelas equações (20), (21) e (22):

$$u'_x = \sqrt{R.S} \cdot \sqrt{g} \quad (20)$$

$$\delta = 11,6 \frac{\nu}{u'_x} \quad (21)$$

$$x = f\left(\frac{K_s}{\delta}\right) \quad (22)$$

Sendo, u'_x - velocidade de cisalhamento; g - aceleração da gravidade, igual a $9,815 \text{ m.s}^{-2}$; δ - espessura da camada laminar; ν - viscosidade cinemática.

O processo de obtenção do valor de $\sqrt{R.S}$ começa por se arbitrar um valor de x na equação (19) compatível com o que é apresentado na Figura 15.

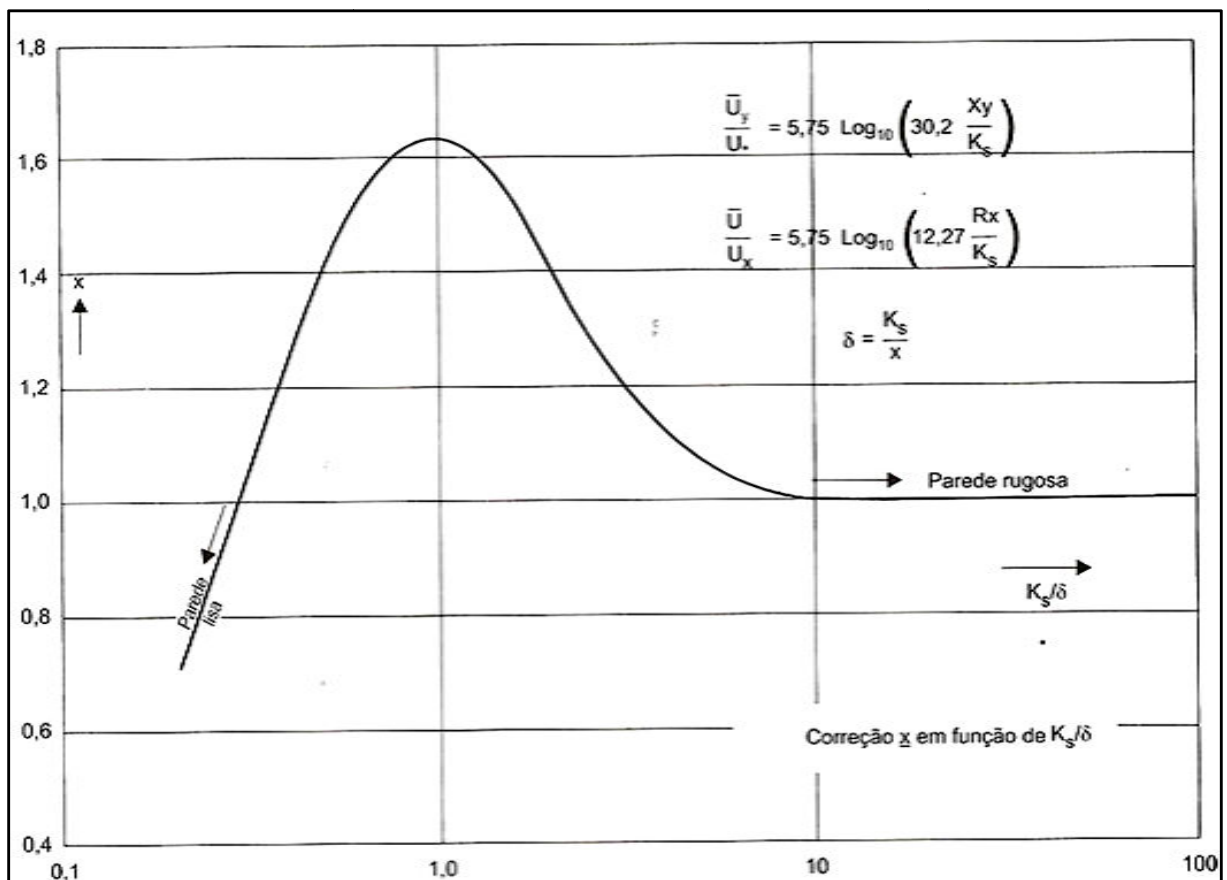


Figura 15 - Valores de x em função de K_s (ou $D65$).
 Fonte: USBR (1955) *apud* Carvalho (2008).

b) Cálculo do valor de P que, por definição, é expresso pela equação (23):

$$P = 2,303 \cdot \log \left[\frac{30,2 \cdot (x) \cdot (p)}{K_s} \right] = \text{Ln} \left[\frac{30,2 \cdot (x) \cdot (p)}{K_s} \right] \quad (23)$$

O valor de P é usado para determinação da descarga em suspensão na zona amostrada, com auxílio do valor A' (Equação 24) e da Figura 16, sendo:

$$A' = \frac{p_n}{p_s} \quad (24)$$

Onde: A' é a fração de profundidade não amostrada; p_n é a distância vertical não amostrada (em metros), isto é, a distância entre o fundo da zona amostrada e o leito do rio, que depende do tipo de amostrador usado; e p_s é a profundidade média da seção nas verticais amostradas.

Com o valor de P calculado, obtém-se na Figura 16, a fração da profundidade não-amostrada Q_{nm} que, multiplicada pela descarga sólida medida Q_{sm} , fornecendo a descarga de sedimento em suspensão através da zona amostrada Q'_s .

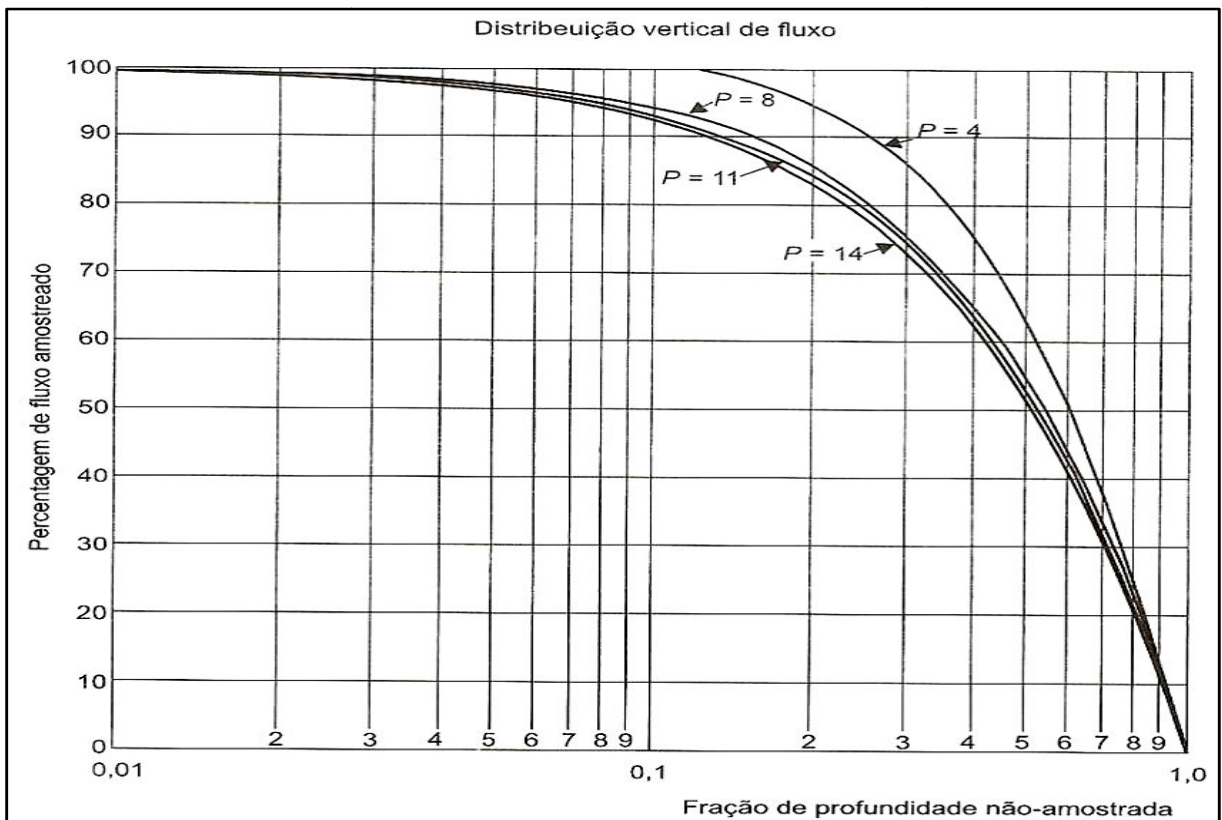


Figura 16 - Gráficos de determinação da porcentagem de fluxo amostrado A' .
Fonte: USBR (1955) *apud* Carvalho (2008).

c) Cálculo de ψ a partir das equações (25) e (26):

$$\psi = \frac{1,65 \cdot D_{35}}{(R \cdot S)} \quad (25)$$

$$\psi = \frac{0,66 \cdot D}{(R \cdot S)} \quad (26)$$

Onde: D_{35} é o diâmetro da partícula, para o qual 35% do material do leito, são mais finos; D é a média geométrica do diâmetro das partículas de cada faixa granulométrica. O número 1,65 é o peso específico das partículas de sedimento menos o peso específico da água. É adotado o maior valor de ψ dado pelas equações anteriores. Da Figura 17 obtém-se a intensidade do transporte de fundo Φ_x para cada ψ .

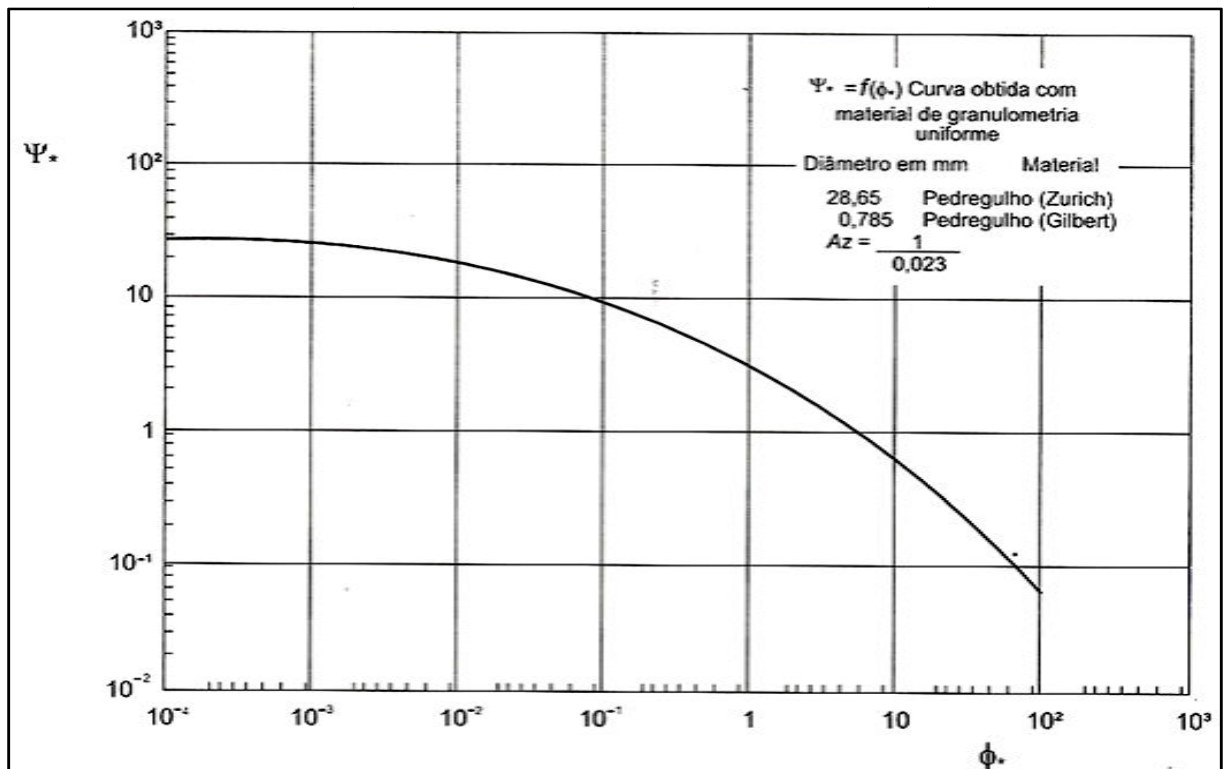


Figura 17 - Gráfico de obtenção de Φ_x em função de ψ .
Fonte: USBR (1955) *apud* Carvalho (2008).

O valor da descarga de fundo corresponde à soma dos valores de $i_f Q_f$ de cada uma das classes granulométricas, calculados pelas equações (27) e (28):

$$i_f q_f = 5,33 \cdot D^{\frac{3}{2}} \cdot i_f \cdot \Phi_x \quad (27)$$

$$i_f Q_f = i_f \cdot q_f \cdot 86400 \cdot L \quad (28)$$

Sendo: i_f a fração do material de fundo em cada classe, L a largura da seção, em metros.

d) Cálculo da descarga sólida total. São separadas as frações i_s do material suspenso correspondente à carga sólida medida Q'_s conforme análise granulométrica.

É calculado, portanto, o valor de Z' , que é o expoente da distribuição vertical de sedimentos. Teoricamente, tem-se um expoente Z que pode ser calculado em função da velocidade de queda das partículas, $Z = w_s / 0,4 \cdot u'_x$. E o fator Z' corresponde a uma correção deste valor, já que na natureza o comportamento da distribuição vertical depende de diversos fatores (forma irregular do sedimento, turbulência da corrente, etc.). Em seu cálculo utiliza-se o valor de A'' , que é obtido a partir da equação (29).

$$A'' = 2 \cdot \frac{D}{p} \quad (29)$$

Onde: D é o diâmetro médio geométrico (em m), e p a profundidade média da seção transversal do canal (em m).

O cálculo de Z' é feito por tentativas, ou seja, por aproximações sucessivas para o diâmetro de referência escolhido, através da equação (30):

$$\frac{Q'_s}{i_f \cdot Q_f} = \frac{I''_1}{J''_1} \cdot (P \cdot J'_1 + J'_2) \quad (30)$$

A solução da equação acima utiliza um ábaco (Figura B.1) (Anexo B) de onde se extrai o valor de Z' em função de $Q'_s / i_f \cdot Q_f$. Para uso da Figura B.1 (Anexo B), calcula-se a equação (31).

$$p' = p \cdot \frac{0,000177}{D_1} \quad (31)$$

Onde: p é a profundidade média e D_1 o diâmetro do grão de sedimento dominante selecionado, escolhido como referência no cálculo de Z' .

Com os valores de Z' e A'' , são obtidos I''_1 e J''_2 , utilizados nas Figuras B.2 e B.3 (Anexo B), e com Z' e A' obtém-se J'_1 e $-J'_2$ das Figuras B.3 e B.4 (Anexo B).

Com os valores de A' , A'' e Z' conhecidos para todos os diâmetros, os diversos valores numéricos de I e J podem ser obtidos das Figuras B.2 a B.5 (Anexo B). Os valores de: I''_2 , J'_2 e J''_2 são sempre negativos, e são usados para o cálculo do fator de correção da porção de sedimento não amostrada, através das relações para cada uma das classes granulométricas:

$$\frac{P \cdot J''_1 + J''_2}{P \cdot J'_1 + J'_2} \quad (32)$$

$$P \cdot I''_1 + I''_2 + 1 \quad (33)$$

A primeira fórmula é limitada aos diâmetros determinados com razoável precisão, ou seja, para os valores de Z' menores que 0,8; a segunda expressão, para as partículas maiores, calculada para Z' igual ou superior a 0,8. Em cálculos com os dois métodos, para valor de Z' próximo de 0,8, adota-se o maior valor, se derem resultados diferentes.

A descarga total de sedimentos através da seção transversal é calculada multiplicando-se Q'_s pela Equação (32) para as classes granulométricas menores e o valor de $i_f \cdot Q_f$ pela Equação (33) para as maiores. A soma desses valores resulta na descarga sólida total.

4.7.2 Método Simplificado de Colby (1957)

A seguir é apresentado o método simplificado de Colby (1957), descrito por Carvalho (2008), para estimativa da descarga sólida total.

A descarga sólida total é calculada pelas equações (34), (35) e (36):

$$Q_{st} = Q_{sm} + Q_{nm} \quad (34)$$

$$Q_{sm} = 0,0864 \cdot Q \cdot C_{ss} \quad (35)$$

$$Q_{nm} = q'_{nm} \cdot L \cdot K \quad (36)$$

Onde:

Q_{st} : descarga sólida total, em t.dia⁻¹;

Q_{sm} : descarga sólida medida, em t.dia⁻¹;

Q_{nm} : descarga sólida não medida, em t.dia⁻¹;

Q : descarga líquida ou vazão, em m³.s⁻¹;

C_{ss} : concentração de sedimentos em suspensão medida, em ppm;

L : largura do rio, em m;

K : fator de correção.

O valor de Q_{nm} corresponde à descarga de arrasto somada à descarga não medida, sendo obtida com auxílio de ábacos, a partir do conhecimento da velocidade média (m.s⁻¹), da profundidade média (m), da concentração medida (ppm) e da largura da seção (m). O procedimento de uso dos ábacos e cálculo é descrito a seguir.

- a) Utilizando o ábaco 1 (Figura C.1) (Anexo C), a partir da velocidade média, obtém-se a descarga sólida não medida, q'_{nm} , aproximada por unidade de largura;
- b) Utilizando o ábaco 2 (Figura C.2) (Anexo C), a partir da velocidade média e da profundidade média, obtém-se a concentração relativa, C_r ;
- c) Calcula-se a razão de eficiência, $e = C'_s/C_r$
- d) A partir de C'_s/C_r , obtém-se, no ábaco 3 (Figura C.3) (Anexo C), o fator de correção K ;
- e) Calcula-se a descarga sólida não medida pelo produto de q'_{nm} , pelo fator de correção K e pela largura da seção, equação (36).

4.6.3 Método de Engelund & Hansen (1967)

A seguir, são apresentados os dados e as equações necessárias para estimativa da descarga sólida de material de leito pelo método de Engelund & Hansen (1967).

γ_s : peso específico do sedimento, em ton.m^{-3} ;

γ : peso específico da água, em ton.m^{-3} ;

U : velocidade média do escoamento, em m.s^{-1} ;

p : profundidade média, em m;

B : largura da superfície do canal, em m;

S : declividade da linha d'água, em m.m^{-1} ;

D_{50} : diâmetro da partícula, para qual 50% do material do leito, são mais finos, em m;

g : aceleração da gravidade, igual a $9,815 \text{ m.s}^{-2}$;

q_{sml} : descarga de material de leito, em $\text{ton} \cdot (\text{m.s})^{-1}$;

Q_{sml} : descarga sólida de material do leito por unidade de largura do canal (ton.d^{-1}).

a) Obtém-se a tensão de cisalhamento de fundo pela equação (37):

$$\tau_0 = \gamma \cdot p \cdot S \quad (37)$$

b) Calcula-se a descarga sólida do material de leito transportado pela equação (38):

$$q_{sml} = 0,05 \cdot \gamma_s \cdot U^2 \cdot \left[\frac{D_{50}}{g \cdot \left(\frac{\gamma_s}{\gamma} - 1 \right)} \right]^{\frac{1}{2}} \cdot \left[\frac{\tau_0}{(\gamma_s - \gamma) \cdot D_{50}} \right]^{\frac{3}{2}} \quad (38)$$

c) A descarga sólida total do material de leito em ton.d^{-1} é dada pela equação (39):

$$Q_{sml} = q_{sml} \cdot B \cdot 86400 \quad (39)$$

4.6.4 Método de Yang (1973)

A seguir, são apresentados os dados de entrada e a metodologia adotada no cálculo de estimativa da descarga sólida de material de leito pelo método de Yang (1973).

W : velocidade média de queda de partículas de diâmetro D_{50} , em m.s^{-1} ;

D_{50} : diâmetro de partículas nos quais 50% do material do leito por peso são mais finos, em m;

γ_s : peso específico do sedimento, em ton.m^{-3} ;

- γ : peso específico da água, em $\text{ton}\cdot\text{m}^{-3}$;
 ν : viscosidade cinemática da água, em $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$;
 U^* : velocidade de cisalhamento, em $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$;
 U : velocidade média da corrente, em $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$;
 U_{cr} : velocidade crítica do escoamento no movimento incipiente, em $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$;
 p : profundidade média, em m;
 S : declividade da linha d'água, em $\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$;
 g : aceleração da gravidade, igual a $9,815 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$;
 C : concentração da descarga do material de leito, em ppm;
 Q_{smi} : descarga sólida de material de leito, em $\text{ton}\cdot\text{dia}^{-1}$.

a) Cálculo da velocidade de cisalhamento relativa aos grãos pela equação 40:

$$U^* = \sqrt{g \cdot p \cdot S} \quad (40)$$

b) Cálculo das velocidades de queda das partículas, usando a equação proposta por Rubey (1933) (Equação 41) para partículas maiores ou iguais a 0,1 mm, e a equação de Stokes (Equação 42) para partículas menores.

$$W = \frac{\left[\frac{2}{3} \cdot g \cdot \left(\frac{\gamma_s}{\gamma} - 1 \right) \cdot D_{50}^3 + 36 \cdot \nu^2 \right]^{\frac{1}{2}} - 6 \cdot \nu}{D_{50}} \quad (41)$$

$$W = \frac{1}{18} \cdot \frac{(S - 1) \cdot g \cdot D_{50}^2}{\nu} \quad (42)$$

c) Cálculo da velocidade crítica adimensional do escoamento no movimento incipiente, pelas equações 43 e 44:

$$\frac{U_{cr}}{W} = \frac{2,5}{\log\left(\frac{U_* \cdot D_{50}}{\nu}\right) - 0,06} + 0,66 \text{ para } 1,2 \leq \frac{U_* \cdot D_{50}}{\nu} < 70 \quad (43)$$

$$\frac{U_{cr}}{W_s} = 2,05 \text{ para } 70 < \frac{U_* \cdot D_{50}}{\nu} \quad (44)$$

d) Cálculo da concentração total de material de leito no escoamento, para grãos de diâmetro até 2 mm, pela equação 45, em ppm:

$$\log C = 5,435 - 0,286 \cdot \log \left(\frac{W \cdot D_{50}}{\nu} \right) - 0,457 \cdot \log \left(\frac{U_*}{W} \right) \\ + \left(1,799 - 0,409 \cdot \log \left(\frac{W \cdot D_{50}}{\nu} \right) - 0,314 \cdot \log \frac{U_*}{W} \right) \cdot \log \left(\frac{U \cdot S}{W} - \frac{U_{cr} \cdot S}{W} \right) \quad (45)$$

e) Após obtenção da concentração da descarga sólida do material de leito, em ppm, calcula-se a descarga sólida de material de leito, pela equação 46, em ton/dia:

$$Q_{sml} = 0,0864 \cdot Q \cdot C \quad (46)$$

Quando os dados das medições utilizadas no método de Yang (1973) geraram um valor para $\frac{U}{W}$ inferior ao determinado pela divisão $\frac{U_{cr}}{W}$, a marcha de cálculo foi interrompida e atribuído o valor zero à descarga sólida do leito. Tal medida foi adotada para evitar erros na Equação (45), uma vez que o valor de $\log C$ se tornaria negativo, o que seria matematicamente impossível.

4.6.5 Método de Ackers & White (1973)

A seguir, serão apresentados dados e equações necessárias para estimativa da descarga sólida de material de leito pelo método de Ackers & White (1973).

D_{gr}: diâmetro adimensional do grão;

F_{gr}: grandeza adimensional de mobilidade;

G_{gr}: descarga sólida adimensional;

Fr: número de Froude, adimensional;

D₃₅: diâmetro do grão, para o qual 35% do material do leito, por peso, são mais finos, em m;

g: aceleração da gravidade, igual a 9,815m.s⁻²;

S_g: gravidade específica do sedimento, igual a γ_s/γ ;

ν: viscosidade cinemática da água, em m².s⁻¹;

p: profundidade hidráulica, em m;

U^* : velocidade de cisalhamento do leito, em $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$;

U : velocidade média do escoamento, em m ;

n : expoente de transição que depende da granulometria do sedimento;

m : expoente da função de transporte de sedimento;

A : valor do número de Froude em movimento inicial;

C_A : coeficiente da função de transporte de sedimento;

S : declividade da linha d'água, em $\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$;

α : coeficiente que no regime turbulento devido à rugosidade tem valor igual a 10;

C : concentração de descarga sólida do material de leito, em ppm;

Q_{smi} : descarga sólida de material de leito, em $\text{ton}\cdot\text{d}^{-1}$;

a) Cálculo da velocidade de cisalhamento do leito, pela equação 47:

$$U_* = \sqrt{g \cdot p \cdot S} \quad (47)$$

b) Cálculo do diâmetro adimensional do grão, pela equação 48:

$$D_{gr} = D_{35} \left[\frac{g \cdot (S_g - 1)}{\nu^2} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (48)$$

c) Cálculo da grandeza adimensional de mobilidade, pela equação 49:

$$F_{gr} = \frac{U_*^n}{\sqrt{g \cdot D_{35} \cdot (S_g - 1)}} \cdot \left[\frac{U}{\sqrt{32} \cdot \log\left(\frac{\alpha \cdot p}{D_{35}}\right)} \right]^{1-n} \quad (49)$$

d) Cálculo da descarga sólida adimensional, baseada no conceito de potência do escoamento (CARVALHO, 2008) pela equação 50:

$$G_{gr} = C_A \cdot \left(\frac{F_{gr}}{A} - 1 \right)^m \quad (50)$$

e) Cálculo da concentração de descarga sólida de material de leito, em ppm, pela equação 51:

$$C = 10^6 \cdot \left(\frac{G_{gr} \cdot S_g \cdot D_{35} \cdot \left(\frac{U}{U_*}\right)^n}{p} \right) \quad (51)$$

f) Cálculo da descarga sólida total do material de leito, em ton.d^{-1} , pela equação 52:

$$Q_{sml} = 0,0864. Q. C \quad (52)$$

Os valores das constantes n , A , m e G_{gr} foram avaliados para dois diâmetros médios de material do leito, resultando nos valores apresentados na Tabela 7. Para material fino, com $D_{gr} < 1$, por apresentar propriedades coesivas, não se aplica (CARVALHO, 2008).

Tabela 7 - Valores das constantes da fórmula de Ackers & White.

Coeficientes	$D_{gr} > 60$	$1,0 < D_{gr} \leq 60$
C_A	0,025	$2,86. \log D_{gr} - (\log D_{gr})^2 - 3,53$
n	0,00	$1,00 - 0,56. \log D_{gr}$
A	0,17	$\frac{0,23}{\sqrt{D_{gr}}} + 0,14$
m	1,5	$\frac{9,66}{D_{gr}} + 1,34$

4.6.6 Método de Karim (1998)

A seguir são apresentados dados e equações necessárias para estimativa da descarga sólida de material de leito pelo método de Karim (1998).

B : largura da superfície do canal, em m;

D_{50} : diâmetro da partícula, para o qual 50% do material do leito, são mais finos (m);

ρ : profundidade hidráulica, em m;

S : declividade da linha d'água, em m.m^{-1} ;

g : aceleração da gravidade, igual a $9,815 \text{m.s}^{-2}$;

U : velocidade média, em m;

U^* : velocidade de cisalhamento do leito, em m.s^{-1} ;

W : velocidade de queda das partículas, em m.s^{-1} ;

ν : viscosidade cinemática da água, em $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$;

γ_s : peso específico do sedimento, em ton.m^{-3} ;

γ : peso específico da água, em ton.m^{-3} ;

S_g : gravidade específica das partículas do sedimento, igual a γ_s/γ ;

q_{sml} : descarga sólida do material de leito por unidade de largura;

Q_{sml} : descarga sólida de material de leito, em ton.d⁻¹.

a) Cálculo da velocidade de cisalhamento do leito, de acordo com a equação 53:

$$U^* = \sqrt{g \cdot p \cdot S} \quad (53)$$

b) As velocidades de queda das partículas foram calculadas, para partículas maiores ou iguais a 0,1 mm, usando-se a equação proposta por Rubey (1933) (Equação 54).

Para partículas menores foi utilizada a equação de Stokes (Equação 55):

$$W = \frac{\left[\frac{2}{3} \cdot g \cdot \left(\frac{\gamma_s}{\gamma} - 1 \right) \cdot D_{50}^3 + 36 \cdot \nu^2 \right]^{\frac{1}{2}} - 6 \cdot \nu}{D_{50}} \quad (54)$$

$$W = \frac{1}{18} \cdot \frac{(S - 1) \cdot g \cdot D_{50}^2}{\nu} \quad (55)$$

c) A descarga sólida do material de leito por unidade de largura (q_{sml}) foi calculada pela equação 56:

$$\frac{q_{sml}}{\sqrt{g \cdot (S_g - 1) \cdot D_{50}^3}} = 0,00139 \cdot \left(\frac{U}{\sqrt{g \cdot (S_g - 1) \cdot D_{50}}} \right)^{2,97} \cdot \left(\frac{U^*}{W} \right)^{1,47} \quad (56)$$

d) A descarga sólida de material de leito, em ton.d⁻¹, foi calculada com o emprego da equação 57:

$$Q_{sml} = q_{sml} \cdot \gamma_s \cdot B \cdot 86400 \quad (57)$$

4.6.7 Método de Cheng (2002)

A seguir são apresentados dados e equações necessárias para estimativa da descarga sólida de material de leito pelo método de Cheng (2002).

p : profundidade hidráulica, em m;

S : declividade da linha d'água ($m.m^{-1}$);

g : aceleração da gravidade, igual a $9,815m.s^{-2}$;

D_{50} : diâmetro da partícula, para o qual 50% do material do leito, são mais finos, em m ;

B : largura da superfície do canal, em m ;

U^* : velocidade de cisalhamento do leito, em $m.s^{-1}$;

γ_s : peso específico do sedimento, em $ton.m^{-3}$;

γ : peso específico da água, em $ton.m^{-3}$;

S_g : gravidade específica das partículas do sedimento, igual a γ_s/γ .

q_b : descarga sólida do material de leito por unidade de largura;

Q_{sml} : descarga sólida de material de leito, em $ton.dia^{-1}$.

a) Cálculo da velocidade de cisalhamento do leito, pela equação 58:

$$U^* = \sqrt{g \cdot p \cdot S} \quad (58)$$

b) Cálculo do parâmetro adimensional da tensão de atrito, dado pela equação 59:

$$\theta = \frac{U_*^2}{(Sg - 1) \cdot g \cdot D_{50}} \quad (59)$$

c) Cálculo do parâmetro adimensional de transporte de Einstein, dado pela equação 60:

$$\Phi = 13\theta^{1,5} \exp\left(-\frac{0,05}{\theta^{1,5}}\right) \quad (60)$$

d) Cálculo da descarga sólida do material de leito por unidade de largura (q_b), pela equação 61:

$$\Phi = \frac{q_{sml}}{D_{50} \sqrt{(Sg - 1) \cdot g \cdot D_{50}}} \quad (61)$$

e) Cálculo da descarga sólida de material de leito, em $ton.dia^{-1}$, dada pela equação 62:

$$Q_{sml} = q_{sml} \cdot B \cdot \gamma_s \cdot 86400 \quad (62)$$

Alguns programas computacionais auxiliaram os cálculos realizados neste estudo. O cálculo da descarga sólida total pelo método de Einstein Modificado foi processado através do programa computacional “EINSTEIN.xls”, desenvolvido por Mendes (2002). O programa foi desenvolvido em ambiente Windows, através do uso de planilha eletrônica do Microsoft Excel. O ANEXO D apresenta a interface do Programa “EINSTEIN.xls”

Para cálculo da descarga sólida total pelo método Simplificado de Colby utilizou-se o programa computacional: “COLBY”, software de Furnas Centrais Elétricas – versão 0, desenvolvido por Jorge Henrique Alves Prodanoff em 1996. Este programa torna mais prático o procedimento de cálculo, eliminando consultas à ábacos utilizados no método. No ANEXO E é apresentada interface do Programa “COLBY”.

Os métodos de descarga sólida de material de leito foram calculados pelo software WinTSR, desenvolvido por Paiva, Beling e Rosa (2002). Os métodos de descarga sólida de material de leito também foram calculados manualmente, utilizando a planilha eletrônica do Microsoft Excel para observação das variações dos resultados em função dos pesos específicos de sedimentos.

No ANEXO F é apresentada interface do Programa WinTSR. Para estimativa da descarga sólida de material de leito foram necessários dados das seções transversais, tais como: velocidades médias, declividades da linha d'água, viscosidades cinemática da água, vazões líquidas do rio, profundidades hidráulicas do rio, além das faixas granulométricas dos sedimentos.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Comparação entre características das bacias e microbacias

O tipo de solo predominante nas bacias Santa Maria do Doce e Santa Joana é o Latossolo Vermelho Amarelo, que apresenta baixa erodibilidade, e corresponde a 67,97% e 85,13% das áreas totais, respectivamente. Na microbacia do córrego Santa Júlia e Sossego, mais de 70% da área é ocupado por Latossolo Vermelho Amarelo. Segundo PARH-SANTA MARIA (2010), os Latossolos Vermelho Amarelo, que são acentuadamente drenados, estão presentes principalmente nos planaltos dissecados e em locais de relevo suave.

A bacia do rio Santa Maria do Doce apresenta percentual de área com solo do tipo Nitossolo Vermelho muito superior com relação a bacia do Santa Joana, respectivamente, 17,22% e 2,33%. As microbacias Santa Júlia e Sossego apresentaram 16,17% e 10,46% das suas áreas com esse tipo de solo. Esse tipo de solo apresenta alto risco de erosão devido aos relevos acidentados a que estes solos estão associados (EMBRAPA, 2014).

Os Neossolos Litólicos são solos minerais desenvolvidos sobre gnaisses, rasos, desenvolvem-se em relevo forte ondulado a montanhoso e em muitos casos, com rochas expostas. Possuem alta suscetibilidade à erosão, visto a sua textura e relevo (OLIVEIRA, 2011). As bacias Santa Maria do Doce e Santa Joana apresentam 8,69% e 7,94%, respectivamente, e as microbacias Santa Júlia e Sossego apresentaram 13,10% e 8,34% das suas áreas com solo do tipo Neossolo Litólico.

As bacias dos rios Santa Maria do Doce e Santa Joana apresentam, respectivamente, 63,18% e 62,79% de suas áreas com declividades superiores a 20%, desta forma classificadas apresentando relevo fortemente ondulado, montanhoso e escarpado. As microbacias dos córregos Santa Júlia e Sossego apresentam 75,82% e 62,74%, respectivamente, nesta mesma classificação. De

acordo com a classificação do relevo, apresentada por Ross (1994), essas áreas são classificadas como forte e muito forte, quanto a fragilidade à erosão.

Os tipos de uso do solo, pastagem e cafeicultura, somadas, correspondem a 48,20% da área na bacia do rio Santa Maria do Doce e 49,60% da área na bacia Santa Joana. Os mesmos tipos de solos, somados, compreende 49,07% área da microbacia Santa Júlia e 52,99% da microbacia Sossego.

Na bacia do rio Santa Joana e na microbacia do córrego Sossego os tipos de uso do solo floresta em regeneração e cobertura florestal, somados, compreendem nas bacias dos rios Santa Maria do Doce e Santa Joana a 31,30% e 32,90% da área, respectivamente. Nas microbacias, 23,92% da área no córrego Santa Júlia e 18,15% da área na microbacia Sossego compreendem esse tipo de uso do solo.

Dalla (2011), ao aplicar a Equação de EUPS na mesma área do presente estudo, conclui que os valores para o fator de erosividade nas bacias dos rios Santa Maria do Doce e Santa Joana se enquadram completamente na classe média-forte. A bacia do rio Santa Maria do rio Doce apresentou maior percentual de sua área com valores mais altos de fatores de erosividade, quando comparada com a bacia do rio Santa Joana. Os maiores valores para o fator de erosividade foram obtidos para as cabeceiras das bacias.

5.2 Variáveis utilizadas na aplicação dos métodos de determinação da descarga sólida

A Tabela 8 apresenta valores obtidos nas 5 (cinco) campanhas fluviométricas e sedimentométricas para cada seção transversal realizadas no estudo desenvolvido por Mendonça *et al.* (2013).

Tabela 8 - Características hidráulicas e geométricas da seção transversal da área em estudo.

Local	Data da coleta	L (m)	p (m)	A (m ²)	Rh (m)	U (m/s)	Q (m ³ /s)	Css (mg/l)
Rio Doce	22/03/2011	395,00	4,07	1.605,75	3,93	0,74	1.194,12	55,92
Rio Doce	10/08/2011	335,54	1,52	509,87	1,35	0,58	297,92	3,70
Rio Doce	02/12/2011	394,05	6,58	2.591,53	6,24	0,96	2.494,53	109,17
Rio Doce	10/02/2012	504,19	3,50	1.764,42	3,34	0,71	1.250,31	39,50
Rio Doce	17/05/2012	400,00	2,72	1.086,06	2,93	0,79	854,41	25,30
Rio Santa Maria do Doce	19/03/2011	14,30	2,00	28,77	1,93	0,86	24,75	108,60
Rio Santa Maria do Doce	24/08/2011	9,41	0,30	2,80	0,29	0,11	0,30	4,60
Rio Santa Maria do Doce	19/11/2011	14,15	0,66	9,36	0,65	0,49	4,55	40,00
Rio Santa Maria do Doce	13/01/2012	15,00	1,87	28,12	1,62	1,25	35,19	124,00
Rio Santa Maria do Doce	26/04/2012	12,30	0,36	4,38	0,35	0,34	1,48	2,20
Rio Santa Joana	19/03/2011	21,00	1,55	32,52	1,48	0,47	15,38	70,26
Rio Santa Joana	12/08/2011	19,45	0,56	10,84	0,55	0,19	2,07	12,06
Rio Santa Joana	19/11/2011	19,31	1,08	20,90	1,06	0,33	6,97	67,46
Rio Santa Joana	13/01/2012	25,20	1,80	45,24	1,82	0,67	30,30	63,06
Rio Santa Joana	27/04/2012	20,25	0,55	11,21	0,54	0,19	2,11	6,56
Córrego Santa Júlia	25/08/2011	4,54	0,07	0,30	0,08	0,26	0,08	2,30
Córrego Santa Júlia	18/11/2011	3,20	0,10	0,32	0,10	0,34	0,11	14,30
Córrego Santa Júlia	30/11/2011	5,40	0,37	2,05	0,36	0,59	1,21	66,40
Córrego Santa Júlia	12/01/2012	5,00	0,64	3,21	0,63	0,42	1,36	99,25
Córrego Santa Júlia	26/04/2012	4,74	0,12	0,55	0,12	0,13	0,07	20,2
Córrego Sossego	18/03/2011	5,50	0,52	2,88	0,48	0,51	1,48	44,80
Córrego Sossego	19/11/2011	2,58	0,25	0,65	0,24	0,23	0,15	-
Córrego Sossego	29/11/2011	5,00	0,49	2,46	0,48	0,50	1,23	53,30
Córrego Sossego	11/01/2012	6,20	1,32	8,16	1,23	0,43	3,49	84,40
Córrego Sossego	25/04/2012	4,27	0,55	2,36	0,41	0,03	0,07	10,40

Onde: L= largura da seção transversal; p= profundidade média; A= área da seção transversal; Rh= raio hidráulico; U= velocidade média do escoamento; Q= vazão; Css= concentração de sólidos em suspensão.

Na Tabela 8 observa-se grandes diferenças entre os valores das variáveis analisadas para cada seção transversal, em cada bacia e microbacia. Estas diferenças podem ser explicadas principalmente pelo fato das campanhas terem sido realizadas em períodos apresentando diferentes condições meteorológicas.

As viscosidades cinemáticas da água (m²/s) foram estimadas a partir das temperaturas da água (°C) nos momentos das coletas de amostra de sedimentos, com o uso do ábaco apresentado por Carvalho (2008). Para aceleração da gravidade adotou-se o valor 9,815 m/s².

De acordo com Spejelberg (2010) a configuração de fundo do rio pode ser relacionada ao número de Froude (Fr). O leito do rio com número de Froude menor que 0,15, é classificado como plano. Para número de Froude entre 0,15 e 0,30, o leito é classificado com rugas e número de Froude entre 0,30 e 0,60 é classificado com dunas. O número de Froude foi calculado a partir da equação (63):

$$F = \frac{U}{\sqrt{g \cdot p}} \quad (63)$$

Onde: U = velocidade média da água; g = aceleração da gravidade; p = profundidade hidráulica.

Aplicando a Equação (63), o rio Doce apresentou leito plano, os rios Santa Maria do Doce e Santa Joana e córrego Sossego apresentaram leito plano e com rugas, que variou de acordo com cada campanha. A seção monitorada no córrego Santa Júlia apresentou leito com rugas e com dunas, que também variou de acordo com a campanha realizada.

As Tabelas 9, 10, 11, 12 e 13 apresentam os resultados das análises granulométricas do material do leito nas seções transversais nas ocasiões das campanhas. A Tabela 9 mostra que na seção transversal do rio Doce, o sedimento coletado foi basicamente areia, com predominância de areia com tamanho médio (0,25-0,50 mm) em todas as campanhas.

Tabela 9 - Distribuição granulométrica do sedimento de fundo na seção do rio Doce, em %.

Classificação	Faixa Φ (mm)	22/03/11	10/08/11	02/12/11	10/02/12	17/05/12
Cascalho médio acima	> 8	0,250	2,380	0,000	0,000	0,520
Cascalho fino	8 a 4	0,946	4,167	0,000	0,000	0,968
Cascalho muito fino	4 a 2	1,965	7,980	4,700	0,218	4,498
Areia muito grossa	2 a 1	6,264	12,400	7,324	1,449	11,829
Areia grossa	1 a 0,5	12,374	15,947	8,269	5,863	26,801
Areia média	0,5 a 0,25	58,844	44,047	65,873	75,464	49,216
Areia fina	0,25 a 0,125	17,732	11,906	13,253	16,201	5,900
Areia muito fina	0,125 a 0,062	1,367	1,087	0,522	0,748	0,235
Finos	<0,062	0,256	0,086	0,059	0,056	0,033

Na seção transversal do rio Santa Maria do Doce, o sedimento coletado foi basicamente areia, com predominância marcada de areia com tamanho grosso (0,50-1,00 mm). Exceções ocorreram nas campanhas do dia 24/08/2011, na qual predominou cascalho com tamanho muito fino (2,00-4,00 mm) e do dia 26/04/2012, na qual predominou areia com tamanho muito grosso (1,00-2,00 mm), conforme apresentado na Tabela 10.

Tabela 10 - Distribuição granulométrica do sedimento de fundo na seção do rio Santa Maria do Doce, em %.

Classificação	Faixa Φ (mm)	19/03/11	24/08/11	19/11/11	13/01/12	26/04/12
Cascalho médio acima	> 8	0,000	0,820	0,000	0,000	3,130
Cascalho fino	8 a 4	0,000	9,087	0,825	0,000	9,772
Cascalho muito fino	4 a 2	2,865	35,484	15,781	2,042	19,896
Areia muito grossa	2 a 1	19,713	25,997	22,098	22,690	24,067
Areia grossa	1 a 0,5	54,224	20,709	31,778	44,062	23,822
Areia média	0,5 a 0,25	22,127	7,105	26,742	24,356	16,576
Areia fina	0,25 a 0,125	0,952	0,715	2,054	5,437	1,986
Areia muito fina	0,125 a 0,062	0,092	0,059	0,354	1,185	0,583
Finos	<0,062	0,026	0,023	0,368	0,228	0,169

A Tabela 11 mostra que na seção transversal do rio Santa Joana o sedimento coletado foi basicamente areia, com predominância de areia com tamanho grosso e muito grosso (0,50-2,00 mm).

Tabela 11 - Distribuição granulométrica do sedimento de fundo na seção do rio Santa Joana, em %.

Classificação	Faixa Φ (mm)	19/03/11	12/08/11	19/11/11	13/01/12	27/04/12
Cascalho médio acima	> 8	0,740	3,700	0,700	0,000	2,400
Cascalho fino	8 a 4	2,031	6,757	2,618	0,000	4,693
Cascalho muito fino	4 a 2	16,683	16,211	16,638	19,376	13,272
Areia muito grossa	2 a 1	35,596	21,942	19,022	41,759	27,731
Areia grossa	1 a 0,5	31,497	22,858	28,918	23,571	25,724
Areia média	0,5 a 0,25	12,397	17,410	22,184	8,848	12,375
Areia fina	0,25 a 0,125	0,682	9,076	7,428	5,087	9,469
Areia muito fina	0,125 a 0,062	0,312	1,819	1,737	0,912	3,306
Finos	< 0,062	0,062	0,227	0,756	0,449	1,030

A Tabela 12 mostra que na seção transversal do córrego Santa Júlia, o sedimento coletado foi basicamente areia, com predominância de areia com tamanho médio a grosso (0,25-1,00 mm).

Tabela 12 - Distribuição granulométrica do sedimento de fundo na seção do córrego Santa Júlia, em %.

Classificação	Faixa Φ (mm)	23/08/11	18/11/11	29/11/11	11/01/12	25/04/12
Cascalho médio acima	> 8	0,000	3,440	2,470	1,200	3,400
Cascalho fino	8 a 4	0,468	7,294	2,937	2,938	9,598
Cascalho muito fino	4 a 2	11,017	14,405	9,799	11,647	15,388
Areia muito grossa	2 a 1	28,551	18,701	12,970	24,783	15,741
Areia grossa	1 a 0,5	39,604	22,889	16,690	27,783	23,478
Areia média	0,5 a 0,25	17,787	17,136	26,572	21,762	27,967
Areia fina	0,25 a 0,125	2,091	11,265	17,335	7,705	3,575
Areia muito fina	0,125 a 0,062	0,191	4,118	8,079	1,747	0,528
Finos	<0,062	0,290	0,751	3,148	0,434	0,323

A Tabela 13 mostra que na seção transversal do córrego Sossego, o sedimento coletado foi basicamente areia, com predominância de areia com tamanho médio, grosso e muito grosso (0,25-2,00 mm).

Tabela 13 - Distribuição granulométrica do sedimento de fundo na seção do córrego Sossego, em %.

Classificação	Faixa Φ (mm)	18/03/11	18/11/11	29/11/11	11/01/12	25/04/12
Cascalho médio acima	> 8	0,520	3,440	2,470	1,200	3,400
Cascalho fino	8 a 4	7,368	7,294	2,937	2,938	9,598
Cascalho muito fino	4 a 2	22,116	14,405	9,799	11,647	15,388
Areia muito grossa	2 a 1	38,809	18,701	12,970	24,783	15,741
Areia grossa	1 a 0,5	25,764	22,889	16,690	27,783	23,478
Areia média	0,5 a 0,25	4,960	17,136	26,572	21,762	27,967
Areia fina	0,25 a 0,125	0,365	11,265	17,335	7,705	3,575
Areia muito fina	0,125 a 0,062	0,049	4,118	8,079	1,747	0,528
Finos	<0,062	0,049	0,751	3,148	0,434	0,323

O rio Doce apresentou mais de 50% dos sedimentos coletados em 3 (três) das 5 (cinco) campanhas na faixa granulométrica correspondente a areia média. Nas demais campanhas apresentaram mais de 40% na mesma faixa.

Para os rios Santa Maria do Doce e Santa Joana mais de 50% dos sedimentos se apresentaram nas faixas granulométricas correspondentes a areia grossa, areia muito grossa e cascalho muito fino em todas as campanhas.

Nos córregos Santa Júlia e Sossego mais de 50% dos sedimentos se apresentaram nas faixas granulométricas correspondentes a areia média, areia grossa e areia muito grossa.

O ANEXO A apresenta as Figuras A.1, A.2, A.3, A.4 e A.5 que ilustram as distribuições granulométricas de material de leito. Nos eixos das abscissas são representados os diâmetros equivalentes e nos eixos das ordenadas estão representadas as porcentagens passantes.

Distribuições granulométricas de sedimentos serviram para conhecimento das distribuições e tipos de sedimento transportados nas seções transversais dos cursos d'água. A Tabela 14 apresenta os valores dos diâmetros característicos D_{35} , D_{50} , D_{65} e D_{90} e D_m .

Tabela 14 - Diâmetros do material de leito, em mm.

Localização	Data da coleta	Q (m ³ /s)	V (m/s)	D _m	D ₃₅	D ₅₀	D ₆₅	D ₉₀
Rio Doce	22/03/2011	1.194,12	0,74	0,558	0,302	0,362	0,428	0,967
	10/08/2011	297,92	0,58	0,984	0,353	0,446	0,706	2,957
	02/12/2011	2.494,53	0,96	0,585	0,314	0,365	0,428	1,212
	10/02/2012	1.250,31	0,71	0,386	0,295	0,34	0,388	0,489
	17/05/2012	854,41	0,79	0,767	0,376	0,467	0,643	1,588
Rio Santa Maria do Doce	19/03/2011	24,75	0,86	0,873	0,584	0,705	0,853	1,551
	24/08/2011	0,3	0,11	2,183	1,185	1,766	2,448	3,999
	19/11/2011	4,55	0,49	1,197	0,565	0,784	1,125	2,677
	13/01/2012	35,19	1,25	0,835	0,532	0,671	0,853	1,576
	26/04/2012	1,48	0,34	1,789	0,792	1,215	1,87	4,718
Rio Santa Joana	19/03/2011	15,38	0,47	1,441	0,803	1,105	1,475	2,961
	12/08/2011	2,07	0,19	1,476	0,605	0,97	1,542	4,188
	19/11/2011	6,97	0,33	1,257	0,536	0,768	1,161	3,019
	13/01/2012	30,3	0,67	1,428	0,895	1,206	1,542	2,79
	27/04/2012	2,11	0,19	1,356	0,635	0,952	1,389	3,451
Córrego Santa Júlia	25/08/2011	0,08	0,26	1,021	0,539	0,733	1,004	1,928
	18/11/2011	0,11	0,34	1,09	0,539	0,76	1,071	2,052
	30/11/2011	1,21	0,59	1,095	0,632	0,819	1,081	1,991
	12/01/2012	1,36	0,42	0,906	0,384	0,494	0,734	1,856
	26/04/2012	0,07	0,13	0,839	0,505	0,647	0,827	1,591
Córrego Sossego	18/03/2011	1,48	0,51	1,9	1,074	1,402	1,836	3,734
	19/11/2011	0,15	0,23	1,411	0,526	0,827	1,395	4,333
	29/11/2011	1,23	0,50	0,93	0,297	0,437	0,756	2,905
	11/01/2012	3,49	0,43	1,203	0,549	0,792	1,168	2,824
	25/04/2012	0,07	0,03	1,562	0,541	0,844	1,501	4,933

Observa-se na Tabela 14 que o rio Doce apresenta os menores diâmetros, em relação aos demais cursos d'água. Para as seções dos rios Doce e Santa Maria do Doce observa-se que quanto maiores as vazões, menores os diâmetros dos sedimentos. No rio Santa Joana e nos córregos Santa Júlia e Sossego, quanto maiores às vazões, maiores os diâmetros dos sedimentos.

A Tabela 15 apresenta os valores das declividades da linha d'água S1, S2 e S3 obtidas a partir dos coeficientes de rugosidade n_1 , n_2 e n_3 .

Tabela 15 - Valores dos coeficientes de rugosidade e dos números de Manning.

Local	Data da coleta	<i>n1</i>	<i>n2</i>	<i>n3</i>	<i>S1</i>	<i>S2</i>	<i>S3</i>
Rio Doce	22/3/2011	0,0136	0,0121	0,0104	0,000017	0,000013	0,000010
Rio Doce	10/8/2011	0,0149	0,0146	0,0108	0,000051	0,000049	0,000027
Rio Doce	2/12/2011	0,0137	0,0126	0,0104	0,000015	0,000013	0,000009
Rio Doce	10/2/2012	0,0128	0,0108	0,0103	0,000016	0,000012	0,000011
Rio Doce	17/5/2012	0,0143	0,0131	0,0109	0,000030	0,000025	0,000017
Rio Santa Maria do Doce	19/3/2011	0,0147	0,0131	0,0116	0,000066	0,000053	0,000042
Rio Santa Maria do Doce	24/8/2011	0,0171	0,0153	0,0136	0,000017	0,000014	0,000011
Rio Santa Maria do Doce	19/11/2011	0,0154	0,0143	0,0118	0,000101	0,000087	0,000059
Rio Santa Maria do Doce	13/1/2012	0,0145	0,0131	0,0115	0,000174	0,000141	0,000109
Rio Santa Maria do Doce	26/4/2012	0,0165	0,0158	0,0127	0,000125	0,000114	0,000075
Rio Santa Joana	19/3/2011	0,0159	0,0146	0,0125	0,000034	0,000028	0,000021
Rio Santa Joana	12/8/2011	0,0160	0,0154	0,0123	0,000021	0,000019	0,000012
Rio Santa Joana	19/11/2011	0,0156	0,0146	0,0118	0,000025	0,000022	0,000014
Rio Santa Joana	13/1/2012	0,0159	0,0144	0,0127	0,000051	0,000042	0,000033
Rio Santa Joana	27/4/2012	0,0158	0,0150	0,0122	0,000020	0,000018	0,000012
Córrego Santa Júlia	25/8/2011	0,0150	0,0136	0,0117	0,000445	0,000362	0,000270
Córrego Santa Júlia	18/11/2011	0,0152	0,0137	0,0118	0,000579	0,000471	0,000348
Córrego Santa Júlia	30/11/2011	0,0152	0,0136	0,0119	0,000313	0,000252	0,000192
Córrego Santa Júlia	12/1/2012	0,0147	0,0135	0,0110	0,000072	0,000060	0,000040
Córrego Santa Júlia	26/4/2012	0,0146	0,0131	0,0115	0,000061	0,000050	0,000038
Córrego Sossego	18/3/2011	0,0167	0,0151	0,0130	0,000196	0,000162	0,000120
Córrego Sossego	19/11/2011	0,0159	0,0155	0,0119	0,000091	0,000087	0,000052
Córrego Sossego	29/11/2011	0,0148	0,0145	0,0107	0,000145	0,000139	0,000076
Córrego Sossego	11/1/2012	0,0155	0,0145	0,0119	0,000033	0,000029	0,000020
Córrego Sossego	25/4/2012	0,0161	0,0159	0,0120	0,000001	0,000001	0,000000

Legenda: *n1* = Equação de Strickler (1923); *n2* = Meyer-Peter & Muller (1948) e *n3* = Equação de Limerinos (1970).

O coeficiente de rugosidade *n1* foi calculado pela Equação de Strickler (1923), obtida em experimentos em canal de laboratório, de fundo fixo, formado por grãos de areia uniforme colado na parede e no leito, utilizando o diâmetro médio do sedimento (D_m).

O coeficiente de rugosidade *n2* foi calculado pela nova equação alterada por Meyer-Peter & Muller (1948). A nova equação contempla leitos constituídos por misturas de areia e utiliza o diâmetro do sedimento D_{90} . Os resultados estimados de *S2* a partir desta equação é o que pode ser aplicado com maior confiabilidade, pois está de acordo com os resultados da granulometria das amostras de leito nas seções monitoradas.

O coeficiente de rugosidade, n_3 , foi calculado pela Equação de Limerinos (1970). Esta equação utiliza diâmetro do sedimento, D_{50} , para leitos compostos por pedras e pequenos pedregulhos.

Cabe observar que as características granulométricas dos sedimentos de fundo das seções transversais consideradas se apresentaram mais próximas daquelas correspondentes ao método de Meyer-Peter & Muller (1948). Cálculos realizados com as demais equações foram feitos apenas para, através de comparações de resultados, mostrar a importância da equação adequada na estimativa das declividades de linha d'água.

Na Tabela 16 são apresentadas vazões (Q) e concentrações de sólidos em suspensão (C_{ss}). A partir desses dados foram calculadas as descargas sólidas em suspensão (Q_{ss}) e as produções específicas de sedimentos em suspensão ($P_{ss_{dia}}$) correspondentes às cinco campanhas de campo nas seções monitoradas. Cabe observar que as precipitações ocorridas nos períodos de monitoramento foram calculadas a partir das médias de dados de chuva registrado sem estações pluviométricas localizadas próximas às seções monitoradas.

De acordo com a Tabela 16, os maiores valores de Q , C_{ss} , Q_{ss} e $P_{ss_{dia}}$ na seção considerada do rio Doce ocorreram na terceira campanha (dezembro de 2011), em período chuvoso. Nas bacias dos rios Santa Maria do Doce e Santa Joana e córregos Santa Júlia e Sossego, os maiores valores de Q , C_{ss} , Q_{ss} e P_{ss} foram registrados na quarta campanha (janeiro de 2012), também em período chuvoso.

Quanto as análises de precipitações pluviométricas, cabe observar que foram pontuais, em pontos situados nas bacias e microbacias e foram considerados três dias de precipitações, que podem ter variado significativamente espacial e temporalmente na data e nos dias anteriores às campanhas.

Tabela 16 - Parâmetros hidrossedimentológicos.

Local	Data da coleta	Campanhas	Q (m ³ /s)	Css (mg/l)	Qss (t/dia)	Pss _{dia} (t/dia/km ²)	Precipitação (mm)
Rio Doce	22/03/2011	1*	1.194,12	55,9	5.769,38	0,08	0,00
	10/08/2011	2	297,92	3,7	95,24	0,001	0,00
	2/12/2011	3*	2.494,53	109,2	23.529,13	0,32	16,18
	10/02/2012	4*	1.250,31	39,5	4.267,06	0,06	0,00
	17/05/2012	5	854,41	25,3	1.867,67	0,03	2,57
		Média ps	576,17	14,50	981,46	0,02	1,29
		Média pc	1.646,32	68,20	11.188,52	0,15	5,39
Rio Santa Maria do Doce	19/03/2011	1*	24,75	108,6	232,23	0,25	13,04
	24/08/2011	2	0,30	4,6	0,12	0,0001	0,56
	19/11/2011	3*	4,55	40,0	15,72	0,02	7,32
	13/01/2012	4*	35,19	124,0	377,04	0,41	14,93
	26/04/2012	5	1,48	2,2	0,28	0,0003	0,03
		Média ps	0,89	3,40	0,20	0,0002	0,30
		Média pc	21,50	90,87	208,33	0,23	11,76
Rio Santa Joana	19/03/2011	1*	15,38	70,2	93,28	0,11	11,99
	12/08/2011	2	2,07	12,0	2,15	0,002	1,27
	19/11/2011	3*	6,97	67,4	40,59	0,05	7,12
	13/01/2012	4*	30,30	63,0	164,92	0,19	7,73
	27/04/2012	5	2,11	6,5	1,18	0,001	0,00
		Média ps	2,09	9,25	1,67	0,0015	0,64
		Média pc	17,55	66,87	99,60	0,12	8,95
Córrego Santa Júlia	25/08/2011	1	0,08	2,3	0,02	0,0002	0,00
	18/11/2011	2	0,11	14,3	0,13	0,002	12,23
	30/11/2011	3*	1,21	66,4	6,94	0,10	18,53
	12/01/2012	4*	1,36	99,3	11,63	0,16	12,37
	26/04/2012	5	0,07	20,2	0,12	0,002	0,00
		Média ps	0,08	12,26	0,09	0,00	4,08
		Média pc	1,28	82,83	9,28	0,13	15,45
Córrego Sossego	18/03/2011	1*	1,48	44,8	5,73	0,09	18,70
	19/11/2011	2	0,15	—	2,17	0,03	9,77
	29/11/2011	3*	1,23	53,3	5,66	0,09	17,53
	11/01/2012	4*	3,49	84,4	25,47	0,41	7,80
	25/04/2012	5	0,07	10,4	0,06	0,001	12,33
		Média ps	0,11	10,40	1,12	0,02	11,05
		Média pc	2,07	60,83	12,29	0,20	14,68

* Campanhas consideradas em período chuvoso;

Média ps = valor médio no período seco;

Média pc = valor médio no período chuvoso.

A Tabela 17 apresenta as médias da produção específica de sedimentos em suspensão anualmente ($P_{ss_{ano}}$), entre os períodos seco e chuvoso.

Tabela 17 - Média da Produção Específica de Sedimentos em Suspensão.

Local	Período	Pss ($t.km^{-2}.ano^{-1}$)
Rio Doce	Período seco	4,82
	Período chuvoso	54,94
Rio Santa Maria do Doce	Período seco	0,08
	Período chuvoso	83,49
Rio Santa Joana	Período seco	0,69
	Período chuvoso	41,15
Córrego Santa Júlia	Período seco	0,46
	Período chuvoso	46,93
Córrego Sossego	Período seco	6,50
	Período chuvoso	71,38

As médias das produções específicas de sedimento em suspensão, representada pela relação entre descarga sólida em suspensão e área de drenagem contribuinte, em período chuvoso, nas bacias dos rios Doce, Santa Maria do Doce e Santa Joana foram 54,94, 83,49 e 41,15 $t.km^{-2}.ano^{-1}$, respectivamente. As microbacias Santa Júlia e Sossego apresentaram, 46,93 e 71,38 $t.km^{-2}.ano^{-1}$.

A média da produção de sedimentos em suspensão por unidade de área na bacia do rio Santa Maria do Rio Doce, correspondente aos períodos chuvosos, equivaleu, em média, a aproximadamente o dobro da correspondente à bacia do rio Santa Joana. Mendonça (2013) mapeou as áreas de fragilidade à erosão nas bacias dos rios Santa Maria do Doce e Santa Joana. Concluiu que a fragilidade à erosão da bacia do rio Santa Maria do Rio Doce foi 6% superior à da bacia do rio Santa Joana.

A microbacia hidrográfica do córrego Sossego apresentou produção de sedimentos em suspensão por unidade de área média, correspondente a períodos chuvosos, maior do que a relativa à microbacia do córrego Santa Júlia. De acordo com o mapa de uso do solo, a microbacia do córrego Sossego apresentou 56,73% da sua área ocupada por pastagens e solo exposto a microbacia do córrego Santa Júlia apresentou menor área, 34,10%.

5.3 Características, formas e limites relativos ao desenvolvimento e aplicação dos métodos de descarga sólida de material de leito

A Tabela 18 apresenta resumidamente as condições e limites utilizados nos experimentos de desenvolvimento, segundo a literatura, de diferentes métodos de estimativa de descargas sólidas de material de leito.

Tabela 18 - Limites para aplicação de métodos de estimativa de descarga sólida de material de leito.

Métodos	Condições das pesquisas e respectivas abordagens
Engelund & Hansen (1967)	<ul style="list-style-type: none"> - É semiempírico, baseado na abordagem da tensão de cisalhamento, potência da corrente e princípio de similaridade; - Experimentos desenvolvidos em calhas com D_{50} entre 0,19 a 0,93 mm e profundidade média até 0,34 m; - Equação pode ser usada, com precisão razoável, tendo o material de leito diâmetro médio superior a 0,15 mm. - Leitões formados por dunas e com areias médias e grossas.
Ackers & White (1973)	<ul style="list-style-type: none"> - Experimentos desenvolvidos em canais com profundidades de até 0,40 m e D_{35} que variaram de 0,04 mm a 4,94 mm; - Número de Froude inferior a 0,8.
Yang (1973)	<ul style="list-style-type: none"> - Desenvolvido em experimentos em cursos d'água com leito de areia; - D_{50} variando entre 0,137 a 1,35mm. - Precisão e aplicabilidade do método verificado experimentalmente com dados de laboratório e dados de rios.
Karim (1998)	<ul style="list-style-type: none"> - D_{50} variando entre 0,137 a 28,65 mm; - Concentrações de sólidos em suspensão entre 20 a 49,3 ppm; - Profundidades entre 0,03 e 5,29 m; - Velocidades entre 0,32 e 2,88 m.s⁻¹; - Declividades entre 0,00005 e 0,00732 m.m⁻¹; - Temperaturas entre 0,6 e 38 °C. - Número de Froude entre 0,09 a 2,08. - Estimativas de descargas de sedimentos, tanto para granulometria uniforme como não-uniforme.
Cheng (2002)	<ul style="list-style-type: none"> - Não envolve o conceito de tensão crítica de cisalhamento; - Calcula as taxas de transporte de leito de forma a considerar as condições de baixas a altas tensões de atrito.

A Tabela 19 apresenta dados de entrada para aplicação dos métodos de estimativa de descarga de sedimentos, obtidos nas campanhas de monitoramento realizadas dentro do estudo desenvolvido por Mendonça *et al.* (2013). Em destaque, estão os valores fora dos limites utilizados nos experimentos de desenvolvimento de cada método.

Cabe observar que o método de Engelund & Hansen (1967) considera os parâmetros profundidades médias e D_{50} ; o método de Ackers & White (1973) considera profundidades médias, D_{35} e números de Froude; o método de Yang (1973) considera D_{50} e o método de Karim (1998) considera D_{50} , profundidades médias, declividades da linha d'água, velocidades médias, número de Froude, concentrações de sólidos em suspensão e temperaturas.

As relações propostas nos métodos de Engelund & Hansen (1967), Ackers & White (1973) e Cheng (2002) foram obtidas com base em experiências em calhas laboratoriais. Os métodos de Yang (1973) e Karim (1998) foram testados para diversos grupos de dados de escoamentos com superfície livre, incluindo ensaios de laboratório e dados de levantamentos de correntes naturais.

De acordo com as características granulométricas dos sedimentos de fundo nas seções transversais dos rios e córregos, foram consideradas as declividades da linha d'água S2, estimadas pela equação de Meyer-Peter & Muller (1948).

De acordo com os limites estabelecidos no desenvolvimento do método de Engelund & Hansen (1967), o mesmo não poderia ser aplicado nos rios Doce, de maior porte e Santa Joana, visto que as profundidades nas seções monitoradas foram superiores a 0,34 m, que é o limite máximo estabelecido para o método nas calhas de laboratório. No rio Santa Maria do Doce e córregos Santa Júlia e Sossego, apenas uma campanha no rio Santa Maria do Doce e uma campanha no córrego Sossego, o valor de profundidade média apresentou menor que 0,34 m. No córrego Santa Júlia, apenas 3 campanhas apresentaram-se dentro dos limites de aplicação do método. Em todas as campanhas realizadas nas diferentes bacias e microbacias, os diâmetros D_{50} foram superiores ao limite 0,15 mm, segundo Carvalho (2008) pode ser aplicado com precisão razoável.

Tabela 19 - Dados de entrada para métodos de estimativa de descarga de leite nas diferentes campanhas.

Local	Data	Método de Engelund & Hansen (1967)		Método de Ackers & White (1973)			Método de Yang (1973)	Método de Karim (1998)						
		p (m)	D ₅₀ (mm)	p (m)	D ₃₅ (mm)	Fr	D ₅₀ (mm)	D ₅₀ (mm)	p (m)	S2	U (m/s)	Fr	C _{ss} (mg/l)	Tem.
Rio Doce	22/03/2011	4,07	0,362	4,07	0,302	0,12	0,362	0,362	4,07	0,000013	0,74	0,12	55,90	27,0
Rio Doce	10/08/2011	1,52	0,446	1,52	0,353	0,15	0,446	0,446	1,52	0,000049	0,58	0,15	3,70	24,4
Rio Doce	02/12/2011	6,58	0,365	6,58	0,314	0,12	0,365	0,365	6,58	0,000013	0,96	0,12	109,20	25,0
Rio Doce	10/02/2012	3,50	0,340	3,5	0,295	0,12	0,340	0,340	3,5	0,000012	0,71	0,12	39,50	29,2
Rio Doce	17/05/2012	2,72	0,467	2,72	0,376	0,15	0,467	0,467	2,72	0,000025	0,79	0,15	25,30	24,7
Rio Santa Maria do Doce	19/03/2011	2,00	0,705	2,00	0,584	0,19	0,705	0,705	2,00	0,000053	0,86	0,19	108,60	25,0
Rio Santa Maria do Doce	24/08/2011	0,30	1,766	0,30	1,185	0,06	1,766	1,766	0,3	0,000014	0,11	0,06	4,60	23,0
Rio Santa Maria do Doce	19/11/2011	0,66	0,784	0,66	0,565	0,19	0,784	0,784	0,66	0,000087	0,49	0,19	40,00	24,9
Rio Santa Maria do Doce	13/01/2012	1,87	0,671	1,87	0,531	0,29	0,671	0,671	1,87	0,000141	1,25	0,29	124,00	24,2
Rio Santa Maria do Doce	26/04/2012	0,36	1,215	0,36	0,792	0,18	1,215	1,215	0,36	0,000114	0,34	0,18	2,20	27,2
Rio Santa Joana	19/03/2011	1,55	1,105	1,55	0,803	0,12	1,105	1,105	1,55	0,000028	0,47	0,12	70,20	21,0
Rio Santa Joana	12/08/2011	0,56	0,970	0,56	0,605	0,08	0,970	0,970	0,56	0,000019	0,19	0,08	12,00	23,0
Rio Santa Joana	19/11/2011	1,08	0,768	1,08	0,536	0,1	0,768	0,768	1,08	0,000022	0,33	0,10	67,40	24,0
Rio Santa Joana	13/01/2012	1,80	1,206	1,8	0,895	0,16	1,206	1,206	1,80	0,000042	0,67	0,16	63,00	26,0
Rio Santa Joana	27/04/2012	0,55	0,952	0,55	0,635	0,08	0,952	0,952	0,55	0,000018	0,19	0,08	6,50	25,4
Córrego Santa Júlia	25/08/2011	0,07	0,733	0,07	0,538	0,33	0,733	0,733	0,07	0,000362	0,26	0,33	2,30	21,5
Córrego Santa Júlia	18/11/2011	0,10	0,759	0,10	0,539	0,34	0,759	0,759	0,10	0,000471	0,34	0,34	14,30	22,7
Córrego Santa Júlia	30/11/2011	0,37	0,819	0,37	0,632	0,31	0,819	0,819	0,37	0,000252	0,59	0,31	66,40	23,8
Córrego Santa Júlia	12/01/2012	0,64	0,494	0,64	0,384	0,17	0,494	0,494	0,64	0,000060	0,42	0,17	99,30	22,6
Córrego Santa Júlia	26/04/2012	0,12	0,647	0,12	0,505	0,12	0,647	0,647	0,12	0,000050	0,13	0,12	20,20	24,8
Córrego Sossego	18/03/2011	0,52	1,402	0,52	1,074	0,22	1,402	1,402	0,52	0,000162	0,51	0,22	44,80	21,0
Córrego Sossego	19/11/2011	0,25	0,827	0,25	0,526	0,15	0,827	0,827	0,25	0,000087	0,23	0,15	167,70	23,4
Córrego Sossego	29/11/2011	0,49	0,437	0,49	0,297	0,23	0,437	0,437	0,49	0,000139	0,50	0,23	53,30	24,0
Córrego Sossego	11/01/2012	1,32	0,792	1,32	0,549	0,12	0,792	0,792	1,32	0,000029	0,43	0,12	84,40	24,2
Córrego Sossego	25/04/2012	0,55	0,844	0,55	0,540	0,01	0,844	0,844	0,55	0,000001	0,03	0,01	10,40	25,2

Destaque em vermelho: valores fora dos limites utilizados nos experimentos de desenvolvimento de cada método.

A aplicação do método de Ackers & White (1973) é limitado devido ao valor de profundidade estabelecido no desenvolvimento do método ser inferior a 0,40 m. De acordo com campanhas de monitoramento, todos os valores de profundidades médias nos rios Doce e Santa Joana foram superiores a 0,40. No rio Santa Maria do Doce 3 campanhas apresentaram valores superiores ao limite. No córrego Santa Júlia apenas em 1 campanha as profundidades médias foram superiores ao limite utilizado. No córrego Sossego apenas uma campanha apresentou profundidades médias dentro dos limites utilizados nos experimentos de desenvolvimento do método. Os valores dos diâmetros dos sedimentos, D_{35} , se apresentaram entre 0,04 mm a 4,94 mm e os números de Froude foram inferiores a 0,8 em todas as campanhas realizadas nas diferentes bacias e microbacias.

No método de Yang (1973), desenvolvido a partir de dados de laboratório, o D_{50} devem variar entre 0,137 e 1,35 mm. Apenas em 1 campanha do rio Santa Maria do Doce e 1 campanha do córrego Sossego apresentaram valor de D_{50} foi superior a 1,35 mm. Mostrando que este método pode ser aplicado nas bacias e microbacias sem grandes restrições.

De acordo com as limitações de aplicação do método de Karim (1998), seria possível sua aplicação apenas no rio Santa Maria do Doce, na campanha realizada dia 19/11/2011, visto que apenas essa campanha apresentou o valor de profundidade média, D_{50} , velocidade média, C_{ss} , número de Froude e declividade dentro de limites utilizados nos experimentos de desenvolvimento do referido método.

De acordo com as características geométricas e hidráulicas obtidas nas seções das bacias e microbacias monitoradas, o método de Yang (1973) foi o que melhor se adaptou, de acordo com as condições que o método foi desenvolvido.

Pujol *et al.* (2004) explicitam que, no decorrer da utilização dos métodos de descargas de sedimentos, é imprescindível verificar com mais atenção as hipóteses básicas em que os métodos foram deduzidos, averiguando se as condições hidrodinâmicas do rio onde o método será aplicado condizem com aquelas para as quais este foi desenvolvido.

A Tabela 20 apresenta os parâmetros fora dos limites de aplicação dos métodos de Engelund & Hansen (1967), Ackers & White (1973), Yang (1973) e Karim (1998).

Tabela 20 - Parâmetros fora dos limites de aplicação dos métodos.

Local	Campanhas	Engelund & Hansen (1967)	Ackers & White (1973)	Yang (1973)	Karim (1998)
Rio Doce	1	p	p	-	S e Css
	2	p	p	-	S e Css
	3	p	p	-	S e Css
	4	p	p	-	S
	5	p	p	-	S
Santa Maria do Doce	1	p	p	-	S e Css
	2	-	-	D ₅₀	S, U e Css
	3	p	p	-	-
	4	p	p	-	Css
	5	p	-	-	Css
Santa Joana	1	p	p	-	S e Css
	2	p	p	-	S, U e Css
	3	p	p	-	S e Css
	4	p	p	-	S e Css
	5	p	p	-	S e Css
Santa Júlia	1	-	-	-	Css
	2	-	-	-	Css
	3	p	-	-	Css
	4	p	p	-	S e Css
	5	-	-	-	S
Sossego	1	p	p	-	Css
	2	-	-	-	U e Css
	3	p	P	-	Css
	4	p	P	-	S e Css
	5	p	P	-	S, U e Css

Onde: p = profundidade; D₃₅ e D₅₀ = diâmetro dos sedimentos; U = velocidade média; S = declividade da linha d'água; Css = concentração dos sedimentos em suspensão.

5.4 Análise comparativa entre os resultados dos métodos de descarga sólida de material de leito

A Tabela 21 apresenta os resultados das aplicações dos diferentes métodos de estimativa de descarga sólida de material de leito (Q_{sml}) considerando diferentes valores de declividade da linha d'água, nas campanhas de monitoramento realizadas.

Cabe observar que o principal objetivo da consideração de valores de declividade da linha d'água obtidos por diferentes equações é verificar as consequências da adoção de metodologias inadequadas, pois, de acordo com as características de leito observadas nas campanhas de campo, a melhor opção é a adoção da declividade S2, obtida pela equação de Meyer-Peter & Muller (1948). Assim, as equações de Strickler (1923) e Limerinos (1970) só foram utilizadas neste estudo para demonstração da possibilidade de grandes erros de estimativas quando utilizadas equações inadequadas.

Com exceção do rio Doce, algumas campanhas realizadas nas bacias e microbacias em períodos secos, apresentaram estimativas de vazões líquidas próximas à zero. Nessas campanhas, as estimativas de Qsml foram muito baixas ou nulas a partir de alguns dos métodos de estimativa empregados. A inexistência de Qsml, nesses casos, pode ser explicada pelo fato de a tensão tangencial aplicada pelo fluído na partícula não ter superado a tensão tangencial crítica das mesmas. Nesses casos, não são apresentados, nas tabelas e gráficos a seguir, os valores de Qsml correspondentes a essas campanhas.

Os valores apresentados na Tabela 21 mostram a grande importância de corretos valores de declividade para adequadas estimativas de descargas sólidas de material de leito.

Tabela 21 - Descarga sólida de material de leite estimada, em ton/dia*.

Local	Data	Engelund & Hansen (1967)			Yang (1973)			Ackers & White (1973)			Karim (1998)			Cheng (2002)		
		Qsml			Qsml			Qsml			Qsml			Qsml		
		S1	S2	S3	S1	S2	S3	S1	S2	S3	S1	S2	S3	S1	S2	S3
Rio Doce	22/03/2011	419,51	293,38	188,22	184,77	122,26	72,20	659,64	445,36	300,93	1179,65	990,03	796,51	362,21	129,38	35,04
Rio Doce	10/08/2011	196,30	182,98	73,60	171,97	159,59	58,39	250,59	237,66	81,69	420,60	406,36	260,08	300,24	258,33	11,24
Rio Doce	02/12/2011	1227,33	975,57	540,56	596,13	462,39	236,50	2691,05	2318,28	1523,36	3363,91	3006,00	2250,84	1026,69	691,49	200,18
Rio Doce	10/02/2012	408,54	254,54	213,72	144,48	81,46	65,60	624,40	390,93	321,71	1288,60	1021,96	938,07	244,17	67,36	42,05
Rio Doce	17/05/2012	591,27	449,80	321,85	389,08	289,88	200,68	1163,77	964,68	751,56	1229,35	1075,17	912,53	389,97	187,90	23,63
Rio Santa Maria do Doce	19/03/2011	29,18	19,11	14,61	40,83	29,22	20,33	83,51	72,93	62,85	53,13	45,07	37,86	33,16	14,34	4,74
Rio Santa Maria do Doce	24/08/2011	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**
Rio Santa Maria do Doce	19/11/2011	3,08	2,47	1,39	3,90	3,07	1,61	2,49	1,80	0,57	5,39	4,84	3,65	0,60	0,165	0,001
Rio Santa Maria do Doce	13/01/2012	221,44	161,93	110,62	350,93	266,39	188,84	580,51	533,34	480,49	342,44	293,74	243,72	363,39	235,96	130,95
Rio Santa Maria do Doce	26/04/2012	0,48	0,40	0,19	0,32	0,24	0,08	**	**	**	0,84	0,76	0,59	**	**	**
Rio Santa Joana	19/03/2011	1,98	1,50	0,97	2,29	1,63	0,93	**	**	**	4,40	3,84	3,10	**	**	**
Rio Santa Joana	12/08/2011	0,04	0,03	0,02	**	**	**	**	**	**	0,10	0,10	0,07	**	**	**
Rio Santa Joana	19/11/2011	0,50	0,41	0,22	0,10	0,07	0,01	**	**	**	1,20	1,09	0,80	**	**	**
Rio Santa Joana	13/01/2012	11,25	8,42	5,76	30,38	22,68	15,35	19,69	16,12	12,63	21,31	18,49	15,35	0,81	0,11	0,004
Rio Santa Joana	27/04/2012	0,04	0,03	0,01	**	**	**	**	**	**	0,15	0,10	0,09	**	**	**
Córrego Santa Júlia	25/08/2011	0,12	0,09	0,06	**	**	**	**	**	**	0,16	0,14	0,11	**	**	**
Córrego Santa Júlia	18/11/2011	0,29	0,21	0,13	0,19	0,13	0,07	0,04	0,01	0,00	0,38	0,33	0,26	**	**	**
Córrego Santa Júlia	30/11/2011	3,68	2,66	1,78	6,28	4,58	3,07	8,42	7,17	5,51	5,17	4,41	3,61	5,18	1,74	0,29
Córrego Santa Júlia	12/01/2012	0,72	0,56	0,30	0,35	0,26	0,11	0,14	0,07	**	1,45	1,27	0,94	0,21	0,05	**
Córrego Santa Júlia	26/04/2012	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**
Córrego Sossego	18/03/2011	1,25	0,94	0,60	3,15	2,35	1,47	0,27	0,19	0,03	1,98	1,72	1,38	0,14	0,02	**
Córrego Sossego	19/11/2011	0,02	0,02	0,01	**	**	**	**	**	**	0,05	0,04	0,03	**	**	**
Córrego Sossego	29/11/2011	2,22	2,09	0,85	1,58	1,48	0,55	2,35	2,27	0,64	3,84	3,73	2,40	3,35	2,83	0,09
Córrego Sossego	11/01/2012	0,51	0,41	0,23	0,46	0,36	0,17	**	**	**	1,17	1,06	0,79	**	**	**
Córrego Sossego	25/04/2012	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**

* Estimativas realizadas com uso do Programa WinTSR, desenvolvido por Paiva, Beling e Rosa (2002).

**Valores estimados de Qsml muito próximos a zero.

Considerando a equação de Meyer-Peter & Muller (1948) a mais adequada às condições do leito nas seções monitoradas, esta foi utilizada na elaboração de gráficos comparativos (Figuras 18, 19, 20, 21 e 22), para as diferentes seções de monitoramento.

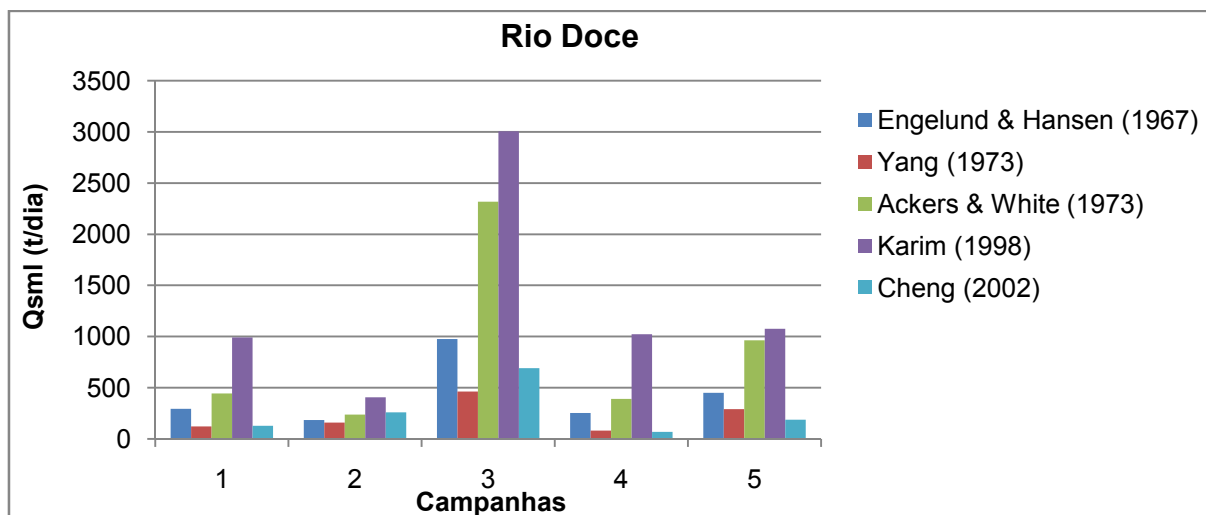


Figura 18 - Comparação entre os resultados da Qsml estimada para o rio Doce.

Observa-se na Figura 18 que os maiores resultados de estimativa de Qsml na seção monitorada no rio Doce ocorreram na campanha 3 (02/12/2011), em período chuvoso. Ainda na Figura 18, observa-se que o método de Karim (1998) seguido pelo método de Ackers & White (1973) apresentaram as maiores estimativas de Qsml nas 5 campanhas de monitoramento. O método de Yang (1973) apresentou a menor estimativa de Qsml nas 5 campanhas de monitoramento.

Os dados da seção transversal do rio Doce, obtidos nas campanhas 2, 3 e 4 (10/08/2011, 02/12/2011 e 10/02/2012, respectivamente) também foram apresentados no estudo de Almeida (2012), como mostra a Tabela 22. Almeida (2012) aplicou métodos de estimativas de Engelund & Hansen (1967), Yang (1973) e Ackers & White (1973), que também foram aplicados no presente estudo.

Tabela 22 - Comparação entre métodos de estimativa.

	Local	Data	U (m/s)	Q (m ³ /s)	n	S (m/m)	Engelund & Hansen (1967)	Yang (1973)	Ackers & White (1973)
Almeida (2012)	Rio Doce	10/08/2011	0,58	297,92	0,055	0,000700	393,78	5.397,68	2.258,30
		02/12/2011	0,96	2.494,53	0,055	0,000260	778,13	32.803,57	20.782,34
		10/02/2012	0,71	1.250,31	0,055	0,000290	471,53	13.005,52	8.288,00
Presente estudo	Rio Doce	10/08/2011	0,58	297,92	0,015	0,000049	182,98	159,59	237,66
		02/12/2011	0,96	2.494,53	0,013	0,000013	975,57	462,39	2.318,28
		10/02/2012	0,71	1.250,31	0,011	0,000012	254,54	81,46	390,93

Conforme apresentado na Tabela 22, os métodos de estimativas apresentaram resultados significativamente diferentes. As diferenças entre os resultados obtidos possivelmente ocorreram devido ao uso de diferentes valores de coeficientes de rugosidade. O valor do coeficiente de rugosidade de Manning adotado por Almeida (2012) foi 0,055 para as três campanhas, e a declividade da linha d'água obtida a partir da fórmula de Manning. No presente estudo, o coeficiente de rugosidade de Manning foi calculado para cada campanha, de acordo com a granulometria do sedimento de fundo, utilizando a equação de Meyer-Peter & Muller (1948), e a declividade da linha d'água também foi obtida a partir da fórmula de Manning. De acordo com Lee e Mays (1986), o coeficiente de rugosidade e a declividade são responsáveis por 95% das incertezas hidráulicas e não existe método exato para determinar os seus valores.

Almeida (2012) obteve a descarga de sedimentos de fundo medida, na seção do rio Doce, a partir do amostrador Helley Smith. Em dezembro de 2011, a descarga medida foi igual a 112,63 ton/dia e em fevereiro de 2012, 153,85 ton/dia. Segundo o mesmo autor, as taxas de transporte de sedimentos de fundo medidas com o amostrador não se mostraram coerentes com as condições hidráulicas da seção, devido à alta velocidade da água na seção que, possivelmente, fez com que o amostrador se movimentasse sobre o leito, interferindo nas amostragens. Considerando as incertezas a respeito do posicionamento do amostrador no leito, é possível que a medição realizada com este equipamento tenha conduzido a subestimativa da taxa de transporte de sedimentos do leito.

De acordo com a Tabela 22, caso as estimativas obtidas por Almeida (2012) estivessem exatas, o método de Engelund & Hansen (1967) apresentou a melhor estimativa e os métodos de Ackers & White (1973) e Yang (1973) superestimaram os valores de descarga de sedimentos de fundo, sendo que o método de Yang (1973) apresentou as maiores estimativas. No presente estudo, o método de Ackers & White (1973), seguido pelo método de Engelund & Hansen (1967), apresentou as maiores estimativas de Q_{sml} . O método de Yang (1973) apresentou as menores estimativas de Q_{sml} nas 3 campanhas de monitoramento.

Scapin (2005) ao analisar a descarga sólida direta e a descarga sólida indireta estimada a partir de métodos de estimativas, e dados de uma seção que drena uma área de apenas 4,92 km², observou-se que os métodos de Ackers & White (1973) apresentou bons resultados, mas subestimou os resultados da descarga sólida indireta, e o método de Engelund & Hansen (1967) superestimou os resultados. O método de Yang (1973) foi o método que apresentou o melhor resultado, em relação aos demais, quando comparado com dados medidos.

Sobrinho *et al.* (2013) compararam resultados de descarga sólida direta do córrego Guariroba, município de Campo Grande/MS. Os dados relativos ao monitoramento na seção foram: vazão entre 4,44 e 5,09 m³/s; velocidade entre 0,55 e 0,61 m/s; profundidade entre 0,94 e 0,96 m e diâmetro médio igual a D_{35} igual a 0,732 mm e diâmetro médio D_{50} 1,03 mm. Nestas condições, os autores concluíram que o método de Ackers & White (1973), Yang (1973) e Karim (1998), superestimaram a descarga sólida obtida por medição direta, sendo o método de Yang (1973) responsável pelas maiores estimativas.

A Figura 19 mostra os resultados estimados de Q_{sml} para o rio Santa Maria do Doce.

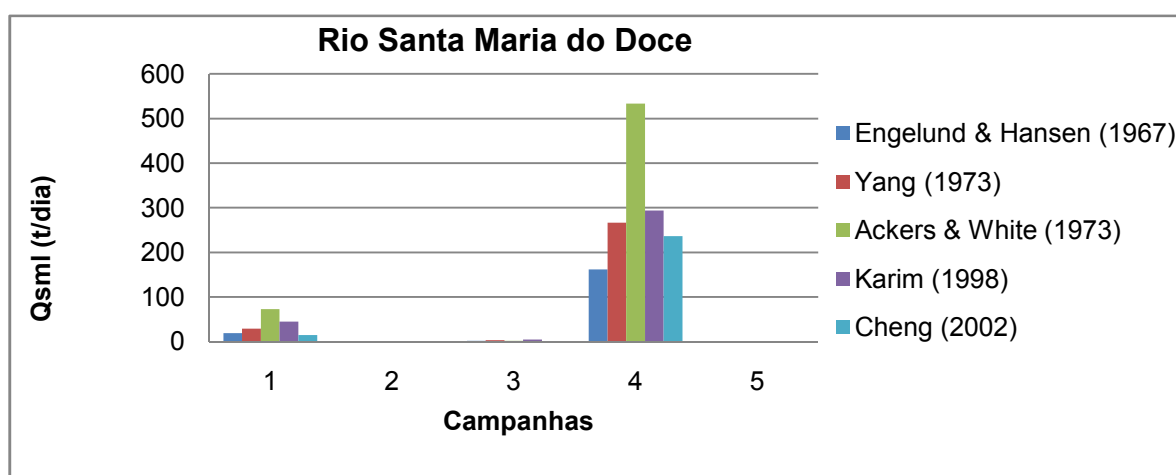


Figura 19 - Comparação entre os resultados da Qsml estimada para o rio Santa Maria do Doce.

Nas 5 (cinco) campanhas de monitoramento realizados no rio Santa Maria do Doce, os valores de vazão variaram entre 0,30 e 35,19 m³/s, profundidade entre 1,52 e 6,58 m e velocidade entre 0,11 e 0,86 m/s. A média dos diâmetros D₃₅ foi igual a 0,731 mm, enquanto que a média do diâmetro D₅₀ igual a 1,028 mm.

Pode ser observado na Tabela 21 e na Figura 19 que os maiores resultados de estimativa de Qsml na seção monitorada do rio Santa Maria do Doce, ocorreram nas campanhas 1 e 4 (19/03/2011 e 13/01/2012, respectivamente), em período chuvoso. As campanhas 2, 3 e 5 foram realizadas em período seco, apresentando baixos valores de vazão e estimativas de Qsml baixas ou nulas. O método de Ackers & White (1973), seguido do método de Karim (1998) apresentaram para as campanhas 1 e 4 as maiores estimativa de Qsml. Os menores valores de Qsml foram estimados pelos métodos de Cheng (2002) e Engelund & Hansen (1967).

A Figura 20 mostra os resultados estimados de Qsml para o rio Santa Joana.

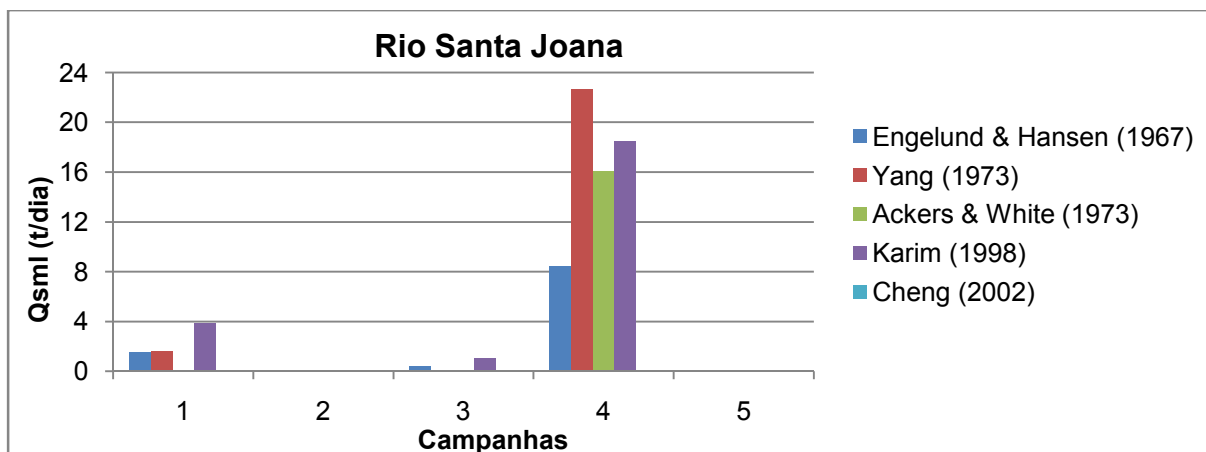


Figura 20 - Comparação entre os resultados da Qsml estimada para o rio Santa Joana.

Nas 5 (cinco) campanhas de monitoramento no rio Santa Joana, os valores de vazão variaram entre 2,07 e 30,30 m³/s, profundidade entre 0,55 e 1,80 m e velocidade entre 0,19 e 0,67 m/s. A média dos diâmetros D₃₅ foi igual a 0,695 mm, enquanto que a média do diâmetro D₅₀ foi igual a 1,00 mm.

Pode ser observado na Tabela 21e na Figura 20 que as maiores estimativas de Qsml no rio Santa Joana ocorreram nas campanhas 1 e 4 (19/03/2011 e 13/01/2012, respectivamente), em período chuvoso. As demais campanhas ocorreram em períodos secos, apresentando baixos valores de vazão e estimativas de Qsml baixas ou nulas. O método de Yang (1973) e Karim (1998) apresentaram as maiores estimativas de Qsml para as campanhas 1 e 4. Os menores valores de Qsml foram estimados pelos métodos de Cheng (2002) e Engelund & Hansen (1967).

A Figura 21 mostra os resultados estimados de Qsml para o córrego Santa Júlia.

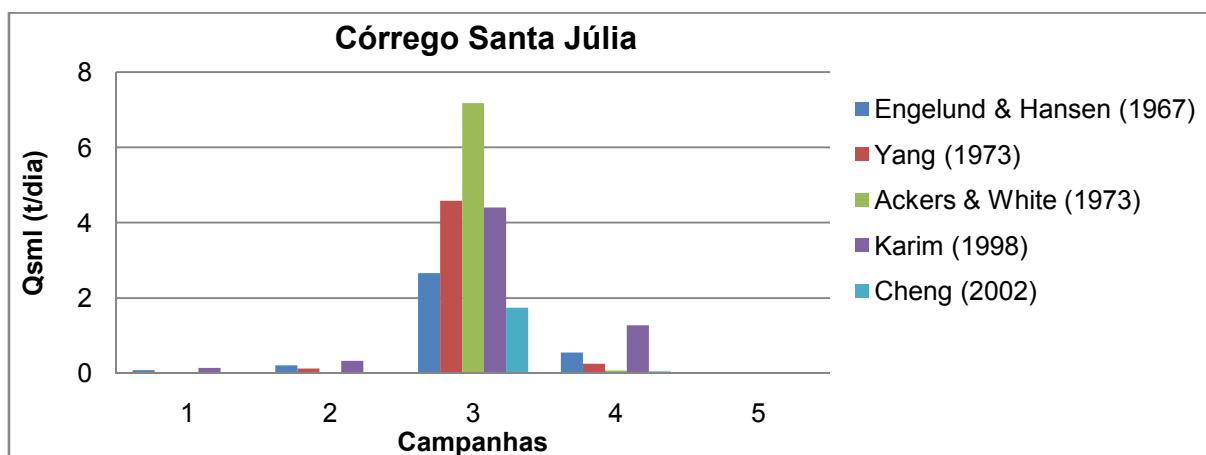


Figura 21 - Comparação entre os resultados da Qsml estimada para o córrego Santa Júlia.

Nas 5 (cinco) campanhas de monitoramento no córrego Santa Júlia, os valores de vazão variaram entre 0,07 e 1,36 m³/s, profundidade entre 0,07 e 0,64 m e velocidade entre 0,13 e 0,59 m/s. A média dos diâmetros D₃₅ igual a 0,520 mm e o diâmetro médio D₅₀ igual a 0,691 mm.

Pode ser observado na Tabela 21 e na Figura 21, o córrego Santa Júlia apresentou as maiores estimativas de Qsml nas campanhas 3 e 4, respectivamente, dias 30/11/2011 e 12/01/2012, em período chuvoso. O método de Ackers & White (1973) apresentou as maiores estimativas de Qsml, seguido do método de Karim (1998). Os menores valores de Qsml foram estimados pelos métodos de Cheng (2002) e Engelund & Hansen (1967).

A Figura 22 mostra os resultados estimados de Qsml para o córrego Sossego.

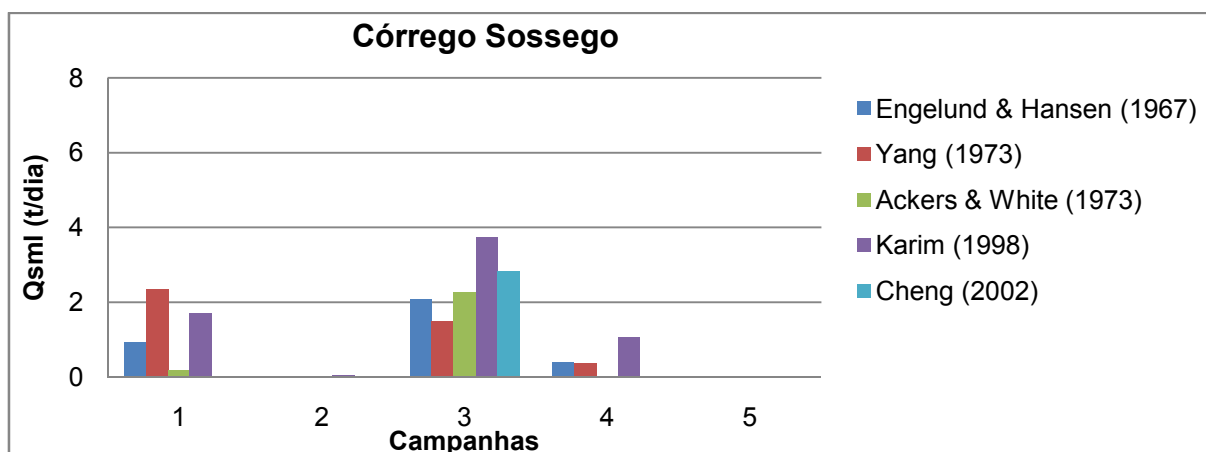


Figura 22 - Comparação entre os resultados da Qsml estimada para o córrego Sossego.

Pode ser observado na Tabela 21 e na Figura 22, o córrego Sossego apresentou as maiores estimativas de Qsml nas campanhas 1 e 3, dias 18/03/2011 e 29/11/2011, em período chuvoso. Nas 5 (cinco) campanhas de monitoramento no córrego Sossego, os valores de vazão variaram entre 0,07 e 3,49 m³/s, profundidade entre 0,25 e 1,32 m e velocidade entre 0,03 e 0,51 m/s. A média dos diâmetros D₃₅ foi igual a 0,597 mm e o diâmetro médio D₅₀ 0,860 mm. Para o córrego Sossego, o método de Karim (1998), seguido do método de Yang (1973), apresentou a maior estimativa de Qsml. Os menores valores de Qsml foram estimados pelos métodos de Cheng (2002) e Engelund & Hansen (1967).

A Tabela 23 apresenta as médias das estimativas de Qsml, entre os períodos seco e chuvoso, a partir de diferentes métodos utilizando a declividade da linha d'água S2. Não foi possível obter médias das Qsml estimadas no período seco para alguns métodos de cálculo, possivelmente, devido às baixas vazões durante as campanhas.

Tabela 23 - Média da descarga sólida de material de leito estimada, para períodos seco e chuvoso, em t/dia.

Local	Médias	Q(m ³ /s)	Engelund & Hansen (1967)	Yang (1973)	Ackers & White (1973)	Karim (1998)	Cheng (2002)
Rio Doce	Média ps	576,17	316,39	224,74	601,17	740,77	223,12
	Média pc	1844,33	507,83	222,04	1051,52	1672,66	296,08
Rio Santa Maria do Doce	Média ps	2,11	0,20	0,24	*	0,38	*
	Média pc	29,97	61,17	99,56	202,69	114,55	83,49
Rio Santa Joana	Média ps	3,72	0,03	*	*	0,10	*
	Média pc	22,84	3,44	8,13	16,12	7,81	0,04
Córrego Santa Júlia	Média ps	0,08	0,10	0,13	0,01	0,16	*
	Média pc	1,28	1,61	2,42	3,62	2,84	0,90
Córrego Sossego	Média ps	0,48	0,01	*	*	0,02	*
	Média pc	2,49	1,15	1,40	1,23	2,17	0,95

ps = período seco;

pc = período chuvoso;

*Não foi possível calcular a média da Qsml.

Para o rio Doce, de maior porte, a média entre as campanhas realizadas em período chuvoso, mostrou que o método de Karim (1998) seguido pelo método de Ackers & White (1973) apresentaram as maiores estimativas de Qsml. O método de Yang (1973) apresentou a menor estimativa.

Nos rios Santa Maria do Doce e Santa Joana, a média entre as campanhas realizadas em período chuvoso, mostrou que o método de Ackers & White (1973), seguido de Karim (1998) e Yang (1973) apresentaram as maiores estimativas de Qsml.

Considerando médias para as campanhas realizadas em período chuvoso nos córregos Santa Júlia e Sossego as maiores estimativas de Qsml também corresponderam ao método de Ackers & White (1973), seguido de Karim (1998) e Yang (1973).

Os métodos de Engelund & Hansen (1967) e Cheng (2002) apresentaram as menores estimativas de Q_{sml} , com exceção do rio Doce. Ambos os métodos não consideram o efeito da viscosidade cinemática do fluido.

As baixas estimativas de Q_{sml} pelo método de Engelund & Hansen (1967) pode ter ocorrido devido ao fato que, nas seções monitoradas nas bacias e microbacias, o leito do rio não é formado por dunas, visto que o método é indicado para aplicação em fundo com dunas.

De acordo com Santos *et al.* (2012), os valores de vazão variaram entre 1,40 e 6,68 m^3/s , velocidade entre 0,44 e 0,66 m/s e profundidade entre 0,59 e 0,88 m, em três seções (cabeceira, médio curso e foz) do rio Guariroba, município de Campo Grande/MS, a partir de valores de descarga sólida medida e estimada, observou-se que entre os métodos aplicados, o método de Cheng (2002) superestimou os resultados quando comparado com os valores de descarga medidos.

Vestena (2008), em estudo na bacia do rio Caeté, Alfredo Wagner/SC, com área de 163,95 km^2 , largura entre 17,1 a 23,0 m e profundidade entre 0,15 a 1,12 m, o método que melhor se ajustou aos dados medidos em ocasiões de vazões baixas, inferiores a 15,78 m^3/s , foram Ackers & White (1973) e Karim (1998). Os métodos de Cheng (2002), Yang (1973) superestimaram os valores.

Rivas *et al.* (2004), a partir de dados de vazão líquida e descarga sólida medida, aplicou os métodos de Engelund & Hansen (1967); Ackers & White (1973) e Yang (1973), com o objetivo de verificar os que melhor se ajustariam para o rio Orinoco (terceiro maior rio em vazão do mundo). Segundo os autores, os resultados da aplicação dos referidos métodos de estimativa de descarga sólida não forneceram bons resultados quando comparados com as descargas sólidas medida diretamente. Os autores afirmam que estes resultados inadequados podem ter advindo do fato que os referidos métodos de estimativa foram desenvolvidos a partir de dados de laboratório e de pequenos rios.

Discrepâncias entre as Q_{sml} estimadas por diferentes métodos, para as mesmas características hidráulicas e de material do leito, foram relatadas por diversos autores (NAKATO, 1990; STRASSER, 2002; MARTINS, 2004; RECKING *et al.*,

2012). Em geral, as diferenças apresentadas estão relacionadas às diferentes abordagens, e grandezas predominantes utilizadas em cada fórmula (CARVALHO, 2008).

Em estudo sobre a aplicação de métodos de descarga de sedimentos, que incluiu dados de diversos rios, entre eles o Amazonas, Orinoco, Mississippi e alguns de seus afluentes, Molinas e Wu (2001) concluíram que os métodos de Engelund & Hansen (1967), Ackers & White (1973) e Yang (1973), desenvolvidos principalmente a partir de experimentosem calhas, com fluxos rasos (profundidade < 0,5m) não são aplicáveis aos grandes rios (profundidade maior que 4m).

Segundo Nakato (1990), uma fórmula que fornece bons resultados de descarga de sedimentos de fundo para um determinado rio pode não ser adequada para outros cursos d'água. Strasser (2002); Martins (2004) afirmam que é comum chegar a resultados completamente diferentes em estimativas de descarga de fundo em um mesmo curso d'água feitas através da aplicação de diferentes fórmulas.

De acordo com Almeida (2012), se forem consideradas todas as dificuldades no desenvolvimento e aplicação de métodos de descarga de sedimentos, percebe-se facilmente que os diversos métodos citados na literatura para aplicação em rios naturais podem fornecer resultados totalmente irrealistas. Portanto, afirmações e decisões tomadas a partir de resultados obtidos com esses métodos devem ser feitas com cautela, pois dificilmente podem ser considerados confiáveis.

De acordo com Nakato (1990); Benjankar e Yager (2012) diferentes métodos estão disponíveis para estimar o transporte de sedimentos e todos foram desenvolvidos para sistemas específicos e estão limitados a um conjunto de dados de laboratório ou de campo. Não existe um método universal que é validado para todos os casos, pois muitos parâmetros influenciam o transporte de sedimentos. Todavia, o fato de um método se adaptar bem a uma série de rios diferentes, a torna uma boa opção a ser testada, desde que as características do local sejam comparáveis às condições para as quais o método foi desenvolvido.

5.5 Análise comparativa entre os resultados dos métodos de descarga sólida total

A Tabela 24 apresenta os resultados de estimativas da descarga sólida total (Qst) pelo método de Einstein Modificado (1955), convencional e adaptado por Lara (1966), e pelo método Simplificado de Colby (1957).

Tabela 24 - Comparação da estimativa da descarga sólida total pelo método de Einstein Modificado (1955) e Simplificado de Colby (1957), em ton/dia.

Local	Data da coleta	Qss medida	Einstein Modificado (1955)		Simplificado de Colby (1957)
			Qst Convencional	Qst Adaptado por Lara	Qst
Rio Doce	22/03/2011	5.769,38	5.695,64	*	9.496,45
Rio Doce	10/08/2011	95,24	172,40	177,57	440,26
Rio Doce	2/12/2011	23.529,13	24.892,37	*	34.196,81
Rio Doce	10/02/2012	4.267,06	6.574,75	*	7.750,10
Rio Doce	17/05/2012	1.867,67	1.427,31	*	4.469,67
Rio Santa Maria do Doce	19/03/2011	232,23	89,82	*	437,49
Rio Santa Maria do Doce	24/08/2011	0,12	*	*	0,21
Rio Santa Maria do Doce	19/11/2011	15,72	6,89	*	38,48
Rio Santa Maria do Doce	13/01/2012	377,04	1.225,81	742,76	915,02
Rio Santa Maria do Doce	26/04/2012	0,28	*	*	1,89
Rio Santa Joana	19/03/2011	93,28	*	*	147,55
Rio Santa Joana	12/08/2011	2,15	2,01	*	3,76
Rio Santa Joana	19/11/2011	40,59	*	*	58,75
Rio Santa Joana	13/01/2012	164,92	76,02	*	315,23
Rio Santa Joana	27/04/2012	1,18	*	*	2,43
Córrego Santa Júlia	25/08/2011	0,02	*	*	*
Córrego Santa Júlia	18/11/2011	0,13	*	*	*
Córrego Santa Júlia	30/11/2011	6,94	4,73	*	21,47
Córrego Santa Júlia	12/01/2012	11,63	2,75	*	20,10
Córrego Santa Júlia	26/04/2012	0,12	*	*	*
Córrego Sossego	18/03/2011	5,73	*	*	15,27
Córrego Sossego	19/11/2011	2,17	*	*	3,04
Córrego Sossego	29/11/2011	5,66	8,18	9,55	14,47
Córrego Sossego	11/01/2012	25,47	4,63	*	38,75
Córrego Sossego	25/04/2012	0,06	0,05	*	0,07

* Não foi possível estimar a Qst com uso da metodologia.

A sobreposição de faixas granulométricas de material em suspensão e de leito é indispensável para a aplicação do método de Einstein Modificado (1955), seja

convencional (1955) ou adaptado por Lara (1966). O método de Einstein Modificado convencional requer, no mínimo, 1 faixa sobreposta; o método adaptado por Lara, 3 faixas (MENDES, 2002). Como pode ser observado na Tabela 24, não foi possível estimar valores para a Qst através da aplicação do método de Einstein Modificado para diversas campanhas, devido à falta de sobreposição de faixas granulométricas para material em suspensão e do leito.

O método de Einstein Modificado (1955) é resultado de vários anos de pesquisa de campo conduzido pelo USBR e USGS em rios aluvionais largos e rasos no estado de Nebraska. No presente estudo, o método de Einstein Modificado (1955) apresentou resultados de Qst nas cinco campanhas, apenas no rio Doce, de maior porte, com largura entre 335,54 e 504,19 e profundidade 1,52 a 4,07 m. Nos rios Santa Maria do Doce e Santa Joana e córregos Santa Júlia e Sossego, com menores larguras médias, principalmente nos períodos secos, não foi possível estimar a Qst nas cinco campanhas.

O método Simplificado de Colby (1957) possibilitou estimativas da Qst na maioria nas seções monitoradas nas 5 (cinco) campanhas. As exceções ocorreram na seção do córrego Santa Júlia, nas campanhas dos dias 25/08/2011, 18/11/2011 e 26/04/2012, com vazões respectivamente, 0,08, 0,11 e 0,07 m³/s. Os baixos valores de vazão medidos nesta seção podem estar relacionados com fato.

Os valores de Qst estimados a partir dos métodos de Einstein Modificado (1955) e Simplificado de Colby (1957) apresentaram diferenças significativas, conforme apresentado na Tabela 24. O método Simplificado de Colby (1957) apresentou os maiores valores de estimativas de Qst, em comparação com os obtidos pelo método de Einstein Modificado (1955), em todas as seções monitoradas.

De acordo com Vestena (2008) em estudo na bacia do rio Caeté, Alfredo Wagner/SC, com área de 163,95 km², largura entre 17,1 a 23,0 m e profundidade entre 0,15 a 1,12 m, concluiu que entre os métodos empregados para estimativa da Qst, o método de Einstein Modificado (1955) foi o que melhor se ajustou aos dados medidos nas vazões baixas (menor que 15,78 m³/s). O método de Colby (1957) superestimou os resultados quando comparado com a descarga sólida obtida por

medição direta, segundo o mesmo autor, o método não deve ser utilizado na estimativa da Qst da seção do Rio Caeté.

Costa (2012) calculou a Qst para identificar o tempo de assoreamento de reservatórios. Para tal, foram utilizados dados dos estudos realizados para os aproveitamentos hidrelétricos Itaocara (pertencente ao Complexo Itaocara, está prevista para ser implantada no trecho médio inferior do rio Paraíba do Sul), Teles Pires (está prevista para ser implantada na divisa dos municípios de Jacareacanga, no estado do Pará, e Paranaíta, no estado do Mato Grosso), Batalha (situa-se no rio São Marcos, este rio tem a sua maior extensão no estado de Goiás e forma o limite entre este estado e Minas Gerais a partir do km 190 para montante e é um dos principais tributários da margem direita do rio Paranaíba.) e Ferreira Gomes (localizado no rio Araguari cuja bacia situa-se na região norte do Brasil, inserida na região hidrográfica do Atlântico no trecho Norte/Nordeste e está totalmente contida no estado do Amapá). Concluiu que o método de Colby (1957) apresentou estimativas muito superiores com relação ao método de Einstein Modificado (1955). As diferenças pontuais entre as Qst calculadas e as Qst estimadas pelo método de Colby (1957) chegaram a 98%.

Scapin (2005) realizou no rio Arroio Cancela, Santa Maria, RS, treze campanhas de medições de descarga sólida e de parâmetros para a aplicação de métodos indiretos de estimativa de descarga sólida através de medições na seção transversal monitorada, com largura da seção entre 4,30 e 6,00 e profundidade média entre 0,37 e 2,22 m. Os métodos de Einstein Modificado por Colby e Hembree (1955) e Colby (1957) obtiveram os melhores resultados.

Segundo Sobrinho *et al.* (2013), embora a estimativa direta apresente maior confiabilidade, a indireta utilizando o método de Colby (1957) tem ajuste satisfatório em relação aos outros métodos de cálculo, sendo método indicado para corpos hídricos em que não se pode medir a descarga de fundo diretamente com equipamento.

Os valores de Qst estimados pelo método de Einstein Modificado Convencional (1955) apresentaram-se inferiores aos de Qss, com exceção das campanhas

realizadas dias 10/08/2011, 02/12/2011 e 10/02/2012, no rio Doce, dia 29/11/2011 no córrego Sossego e dia 13/01/2012, no rio Santa Maria do Doce.

Valores de Q_{sml} estimados através das diferenças entre valores de Q_{st} e Q_{ss} obtidos pelo método Simplificado de Colby (1957) foram muito superiores aos obtidos pelos métodos de Engelund & Hansen (1967), Yang (1973), Ackers & White (1973), Karim (1998) e Cheng (2002), independentemente dos tamanhos das bacias.

- **Peso específico do sedimento**

A Tabela 25 apresenta os valores estimados dos pesos específicos médios obtidos a partir de amostras coletadas nos leitos dos diferentes cursos d'água e a diferença percentual relativa entre os valores dos pesos específicos do sedimento adotado pela literatura ($2,65 \text{ kg/m}^3$) e o estimado.

Os pesos específicos do sedimento estimados ficaram muito próximos do valor apresentado na literatura ($2,65 \text{ kg/m}^3$). De acordo com Nino e Tamburrino (2009), quando as partículas são consideradas em conjunto, as variações do peso específico do sedimento são muito pequenas, por este motivo, geralmente é adotado o valor de $2,65 \text{ kg/m}^3$ em estudos de transporte de sedimentos. Vários autores, entre eles: Scapin (2005); Mendes (2005); Carvalho (2008); Spiegelberg (2010); Almeida (2012); Souto (2013) adotaram em seus estudos, peso específico do sedimento igual $2,65 \text{ kg/m}^3$.

Tabela 25 - Valores médios dos pesos específicos estimados e diferenças percentuais relativas à cada bacia.

Local	Peso específico estimado (kg/m^3)	DIF (%)
Rio Doce	2,62	1,13
Rio Santa Maria do Doce	2,62	1,13
Rio Santa Joana	2,62	1,13
Córrego Santa Júlia	2,57	3,02
Córrego Sossego	2,60	1,89

Os rios Doce, Santa Maria do Doce e Santa Joana apresentaram o valor do peso específico do sedimento médio estimado igual a $2,62 \text{ kg/m}^3$ e diferença percentual relativa de 1,13%. As microbacias apresentaram os menores valores de peso específico médio estimado, o córrego Sossego apresentou valor médio estimado igual a $2,60 \text{ kg/m}^3$ e diferença percentual relativa de 1,89% e o córrego Santa Júlia valor médio estimado igual a $2,57 \text{ kg/m}^3$ e diferença percentual relativa de 3,02%. A Tabela 26 apresenta resultados estimados da Qsml utilizando o peso específico do sedimento estimado em laboratório, a partir de amostragens no leito dos rios nas seções monitoradas e o peso específico adotado na literatura, utilizando declividade S2.

Tabela 26 - Descargas sólidas de material de leito estimadas, considerando pesos específicos dos sedimentos estimados e obtidos com valor apresentado na literatura, em ton/dia.

Local	Data	Engelund & Hansen (1967)		Yang (1973)		Ackers & White (1973)		Karim (1998)		Cheng (2002)	
		γ estimado	$\gamma = 2,65$	γ estimado	$\gamma = 2,65$	γ estimado	$\gamma = 2,65$	γ estimado	$\gamma = 2,65$	γ estimado	$\gamma = 2,65$
Rio Doce	22/03/2011	318,37	310,41	99,26	97,88	503,62	484,99	963,95	941,78	138,92	131,08
Rio Doce	10/08/2011	222,65	217,08	108,40	106,79	246,45	235,98	404,17	395,14	266,98	254,13
Rio Doce	02/12/2011	1054,23	1027,88	362,91	358,48	2374,67	2309,61	2940,87	2873,01	670,35	648,46
Rio Doce	10/02/2012	269,44	262,70	76,52	75,41	394,83	378,49	949,57	927,62	64,25	59,57
Rio Doce	17/05/2012	422,38	411,82	229,23	226,35	1025,37	992,98	1084,07	1060,04	213,27	201,34
Rio Santa Maria do Doce	19/03/2011	22,48	21,92	27,09	26,81	75,75	73,68	45,28	44,32	15,05	14,22
Rio Santa Maria do Doce	24/08/2011	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Rio Santa Maria do Doce	19/11/2011	2,59	2,53	2,68	2,63	2,06	1,86	4,88	4,78	0,19	0,16
Rio Santa Maria do Doce	13/01/2012	207,22	202,04	257,35	255,01	549,83	539,42	297,92	291,58	241,91	237,45
Rio Santa Maria do Doce	26/04/2012	0,42	0,41	0,35	0,33	*	*	0,77	0,75	*	*
Rio Santa Joana	19/03/2011	1,67	1,63	1,51	1,47	*	*	3,98	3,89	*	*
Rio Santa Joana	12/08/2011	0,04	0,03	*	*	*	*	0,10	0,10	*	*
Rio Santa Joana	19/11/2011	0,44	0,43	0,10	0,09	*	*	1,11	1,08	*	*
Rio Santa Joana	13/01/2012	8,47	8,26	21,15	20,90	17,95	16,76	18,67	18,29	0,13	0,11
Rio Santa Joana	27/04/2012	0,03	0,03	*	*	*	*	0,10	0,09	*	*
Córrego Santa Júlia	25/08/2011	0,07	0,07	*	*	*	*	0,14	0,13	*	*
Córrego Santa Júlia	18/11/2011	0,23	0,21	0,16	0,14	0,03	0,01	0,35	0,33	0,01	0,01
Córrego Santa Júlia	30/11/2011	2,97	2,78	4,49	4,32	8,01	7,19	4,64	4,38	2,14	1,72
Córrego Santa Júlia	12/01/2012	0,61	0,57	0,24	0,23	0,11	0,07	1,35	1,27	0,07	0,05
Córrego Santa Júlia	26/04/2012	*	*	*	*	*	*	0,01	0,01	*	*
Córrego Sossego	18/03/2011	1,12	1,07	2,20	2,14	0,21	0,11	1,80	1,74	0,03	0,02
Córrego Sossego	19/11/2011	0,02	0,02	*	*	*	*	0,05	0,04	*	*
Córrego Sossego	29/11/2011	2,27	2,18	1,29	1,26	2,40	2,23	3,80	3,66	3,17	2,90
Córrego Sossego	11/01/2012	0,48	0,46	0,30	0,29	*	*	1,07	1,04	*	*
Córrego Sossego	25/04/2012	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

* Não foi possível estimar a descarga sólida de material de leito.

6 SÍNTESE DOS RESULTADOS

Latossolos Vermelho Amarelo apresentam baixa erodibilidade, e é o tipo de solo predominante nas bacias dos rios Santa Maria do Rio Doce e Santa Joana é o Latossolo Vermelho Amarelo, respectivamente, 84,52% e 64,12%. Nas microbacias dos córregos Santa Júlia e Sossego, mais de 70% da área é ocupado por esse tipo de solo.

As bacias dos rios Santa Maria do Doce e Santa Joana apresentam, respectivamente, 63,18% e 62,79% de suas áreas com declividades superiores a 20%, que corresponde a faixa classificada como relevo fortemente ondulado, montanhoso e escarpado. As microbacias dos córregos Santa Júlia e Sossego apresentam 75,82% e 62,74%, respectivamente, nesta mesma faixa. Áreas nesta faixa de declividades são classificadas como apresentando forte e muito forte a fragilidades à erosão.

Quanto o uso e ocupação do solo, observa-se que se somadas as áreas de pastagem e solo exposto, a bacia do Santa Joana apresenta maior percentagem de área (43,00%), em comparação com a bacia do Santa Maria do Doce (37,90%). A microbacia do córrego Sossego (56,73%) apresenta percentagem superior correspondente à microbacia do córrego Santa Júlia (34,10%).

A análise dos dados coletados, nas seções monitoradas durante as campanhas de campo cujos resultados foram considerados no presente estudo, demonstrou que os sedimentos dos leitos das seções transversais de medições apresentaram predominância de sedimentos nas faixas granulométricas correspondentes a areias.

Considerando que os sedimentos de leitos apresentaram predominância da faixa de areias, dentre as equações analisadas, a equação de Meyer-Peter & Muller (1948) apresentou-se, segundo a literatura, como a mais adequada para estimativas dos coeficientes de rugosidade de Manning das seções transversais.

Os valores de coeficientes de Manning estimados considerando a equação de Meyer-Peter & Muller (1948) se apresentaram significativamente diferentes dos apresentados por Chow (1959), para a mesma seção transversal.

Os valores de descarga de sedimentos de material de leito estimados considerando os pesos específicos calculados, em laboratório, a partir das amostras de sedimento coletadas nas campanhas de campo, ficaram próximos daqueles obtidos com o uso do valor apresentado na literatura.

A média das produções específicas de sedimentos em suspensão estimadas, para as campanhas realizadas no rio Santa Maria do Rio Doce durante período chuvoso, foi ligeiramente superior à correspondente ao rio Santa Joana. Nas microbacias, a média das produções específicas de sedimentos em suspensão estimadas, para as campanhas realizadas no córrego Sossego foi superior ao valor estimado para o córrego Santa Júlia.

Cabe observar que as comparações entre estimativas feitas nas diferentes bacias e microbacias devem ser consideradas com cautela, pois os resultados hidrosedimentológicos analisados correspondem a eventos de chuvas ocorridos em datas distintas, estando o transporte sólido nas bacias muito relacionado com as características climáticas nas bacias nos períodos imediatamente anteriores às campanhas.

Deve ser considerado, também, que o período de monitoramento hidrossedimentológico da área de estudo com informações disponíveis para análise foi de apenas um ano, considerado curto para se obter caracterização geral do comportamento hidrossedimentológico das seções consideradas.

Considerando declividade, tipo e usos do solo, a bacia do rio Santa Maria Doce possui potencial de geração de sedimentos ligeiramente superior ao correspondente à bacia do rio Santa Joana, por unidade de área. A microbacia do córrego Sossego, por sua vez, possui potencial de geração de sedimentos ligeiramente superior à do córrego Santa Júlia.

Algumas campanhas realizadas em período seco apresentaram baixos valores de vazão e estimativas de Qsm baixas ou nulas nas bacias e microbacias.

De acordo com as características hidráulicas e geométricas obtidas durante as campanhas de campo nas diferentes seções de monitoramento nas bacias e microbacias, e baseando-se nas condições específicas em que os diferentes métodos de estimativa de descargas de sedimentos foram desenvolvidos, alguns métodos não poderiam ser aplicados com confiança.

Para o rio Doce, rio de maior porte, a média dos valores de Q_{sml} para as campanhas realizadas em período chuvoso, mostrou que o método de Karim (1998) seguido pelo método de Ackers & White (1973) apresentaram as maiores estimativas. O método de Yang (1973) apresentou a menor estimativa.

Considerando a média dos valores de Q_{sml} relativo às campanhas realizadas em período chuvoso, nos rios Santa Maria do Doce e Santa Joana e nos córregos Santa Júlia e Sossego, verificou-se que o método de Ackers & White (1973), seguido de Karim (1998) e Yang (1973) apresentaram as maiores estimativas e, os métodos de Cheng (2002) e Engelund & Hansen (1967), as menores estimativas.

Não foi possível calcular em todas as campanhas, a Q_{st} pelo método de Einstein Modificado por Lara, possivelmente devido à falta de sobreposição de três faixas de granulometria de sedimentos de fundo e em suspensão.

Os valores de Q_{st} estimados a partir dos métodos de Einstein Modificado (1955) e Simplificado de Colby (1957) apresentaram diferenças muito significativas para todas as bacias e microbacias. O método Simplificado de Colby (1957) apresentou as maiores estimativas.

As estimativas da Q_{st} a partir do método de Einstein Modificado (1955) aparentemente se mostraram incoerentes, se comparados com os valores de Q_{ss} . Os valores de Q_{ss} foram superiores as estimativas de Q_{st} para todas as campanhas realizadas no rio Santa Joana e nos córregos Santa Júlia e Sossego. Na bacia Santa Maria do Doce o mesmo ocorreu em 4 (quatro) das 5 (cinco) campanhas. Na bacia do rio Doce, na seção Itapina, a incoerência só ocorreu em 2 (duas) das 5 (cinco) campanhas.

7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Considerando declividades, tipos de solo e usos do solo, a bacia do rio Santa Maria Doce possui potencial de geração de sedimentos ligeiramente superior ao correspondente à bacia do rio Santa Joana, por unidade de área. A microbacia do córrego Sossego, por sua vez, possui potencial de geração de sedimentos ligeiramente superior à do córrego Santa Júlia.

Considerando a média dos valores de Q_{sml} relativo às campanhas realizadas em período chuvoso, nos rios Santa Maria do Doce e Santa Joana e nos córregos Santa Júlia e Sossego, verificou-se que o método de Ackers & White (1973), seguido de Karim (1998) e Yang (1973) apresentaram as maiores estimativas e os métodos de Cheng (2002) e Engelund & Hansen (1967), as menores estimativas de Q_{sml} .

O método de Einstein Modificado estimou valores de Q_{st} inferiores às Q_{ss} para a quase totalidade das campanhas realizadas em seções transversais correspondentes às bacias de pequeno e médio porte.

Diferentes métodos estão disponíveis para estimativas de descarga de sedimentos em rios. Os métodos de descarga de sedimentos foram desenvolvidos para condições específicas, geralmente em calhas de laboratório. De modo geral, verifica-se que nenhum dos métodos de cálculo da descarga de sedimento transportada em cursos fluviais pode ser aplicado com confiança em todos os casos. A escolha dos métodos deve levar em conta a necessidade de dados medidos em campo, as características hidrodinâmicas e sedimentológicas em que foram deduzidas e a facilidade de aplicação.

Estudos experimentais que permitam comparações entre descargas sólidas medidas em campo e estimadas por diferentes modelos de estimativa são fundamentais para escolha daqueles mais apropriados para bacias e condições específicas.

Para melhor entendimento do comportamento hidrossedimentológico dos rios Santa Maria do Doce e Santa Joana e córregos Santa Júlia e Sossego se faz necessário contínuo monitoramento em diferentes seções transversais dos cursos d'água.

Há uma necessidade de se testarem os métodos propostos na literatura sob uma variedade de condições, como as encontradas na prática da Engenharia.

Há necessidade de análise sistemática das condições requeridas e limites estabelecidos para cada método, para que os mesmos possam ser empregados. E também, em quais condições que cada método não deve ser aplicado.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, G. C. P. de. **Caracterização física e classificação dos solos**. Departamento de Transportes. Universidade Federal de Juiz de Fora. 2005.

ALMEIDA, L. M. **Análise de metodologias para o cálculo da descarga de fundo, aplicada ao rio doce, ES**. 2012. 152 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9776**: Agregados - Determinação da massa específica de agregados por meio do frasco de Chapman – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1987.

BATALLA, R. J. Evaluating bed-material transport equations using field measurements in a sandy gravel-bed stream, Arbúcies River, NE Spain. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 22, p. 121-130, 1997.

BENJANKAR, R.; YAGER, E. M. The impact of different sediment concentrations and sediment transport formulas on the simulated floodplain processes. **Journal of Hydrology**, 450–451, p. 230–243, 2012.

BOTELHO, R.G.M., SILVA, A.S., **Bacia Hidrográfica e Qualidade Ambiental** In: VITTE, A. C.; GUERRA, A. J. T. Reflexões sobre a Geografia Física no Brasil. Ed: Bertrand Brasil, Rio de Janeiro, 2007 *apud* MENDONÇA, P. R. **Características hidrogeomorfológicas das bacias hidrográficas dos rios Santa Maria do rio Doce e Santa Joana/ES**. 2013. 141 p. Dissertação (Mestre em Geografia) - Programa de Pós-Graduação em Geografia do Centro de Ciências Humanas e Naturais da Universidade Federal do Espírito, Vitória, 2013.

BURMESTER, C. L. **Uso do Perfilador a Laser na Estimativa da Rugosidade em planícies de inundação**. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Ambientais. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

BRANCO, N. **Avaliação da produção de sedimentos de eventos chuvosos em uma pequena bacia hidrográfica rural de encosta**. 1998. 119 f. Dissertação

(Mestrado em Engenharia Agrícola) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 1998.

BRUNNER, G. W. **HEC-RAS, River Analysis System Hydraulic**, Reference Manual, USACE. 2010.

CAMPOS, R.; FREITAS, P. R. B. Características granulométricas e descarga de sedimentos em uma bacia urbana: O rio Maranguapinho no Ceará. In: Simpósio de recursos hídricos do Norte e Centro-Oeste, Cuiabá, 2007.

CARVALHO, N. O. **Hidrossedimentologia prática**. 2 ed. Rio de Janeiro: Interciência, 600p. 2008.

CARVALHO, N. O.; FILIZOLA JR., N. P.; SANTOS, P. M. C.; LIMA, J. E. F. W. **Guia de Práticas Sedimentométricas**. Brasília: ANEEL, 154p, 2000a.

CHENG, N. S. Exponential Formula for Bedload Transport. **Journal of Hydraulic Engineering**, ASCE, v. 128, n.10, p. 942-946, Oct. 2002.

CHENG, N. S. Application of Incomplete Self-Similarity Argument for Predicting Bed-Material Load Discharge. **Journal of Hydraulic Engineering**, ASCE, v. 137, n. 9, p. 921-931, Sept. 2011.

CHOW, V.T. **Open Channel Hydraulics**. International student Edition. Ed. McGraw-Hill Kogakusha, LTD, p. 680. 1959.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia fluvial**. São Paulo: Blücher, p. 313, 1981.

COELHO A.L.N., **Alterações Hidrogeomorfológicas no Médio-Baixo Rio Doce/ES**. Tese (Doutorado em Geografia) - Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro, 2007.

COIADO, E. M.; PAIVA, J. B. D.; SIMÕES, S. J. C. Monitoramento da erosão e do transporte de sedimentos. In: PAIVA, J. B. D.; PAIVA, E. M. C. D. (Orgs.). **Hidrologia Aplicada a Gestão de Pequenas Bacias Hidrográficas**. Porto Alegre. ABRH, 2001. cap. 21, p. 587-625.

COSTA, L. F. **Análise de sensibilidade dos parâmetros utilizados na determinação de taxas de assoreamento de reservatórios**. 2012. 124 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

DALLA, L. F. R. **Estimativas da produção de sedimentos nas bacias hidrográficas dos rios Santa Maria do rio Doce e Santa Joana com utilização da EUPS**. 2011. 94 f. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental), Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2011.

EDWARDS, T. K.; GLYSSON, G. D. **Field Methods for Measurement of Fluvial sediment** In: Applications of hydraulics. USGS. Techniques of Water Resources 88 Investigations of the United States Geological Survey. TWRI 3 – C2. Arlington. VA. p. 89, 1999 *apud* LOUREIRO, D. D. T. **Métodos atuais e novas tecnologias para o monitoramento do transporte de sedimentos em rios: necessidade de dados e incertezas envolvidas**. 2008. 91 f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2 ed. 306 p. Rio de Janeiro. 2006.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Agência Embrapa de Informação Tecnológica. **Solos Tropicais: Nitossolos Vermelhos**. Disponível

em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/solos_tropicais/arvore/CONT000gn362ja102wx5ok0liq1mqelqj5hh.html>. Acesso em: 23 de julho de 2014.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Avaliação Ambiental Integrada Bacia do rio Doce**. 2006. Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/MeioAmbiente/Paginas/AAI/MeioAmbiente7.aspx?CategorialD=101>>.

FILIZOLA, N.; COUTINHO, P.; CARVALHO, N. O.; LIMA, J. W.; SCILEWSKI, L.; REGO, A. Informações Hidrossedimentométricas no Brasil. In: PAIVA, E. M. C. D.; PAIVA, J. B. D. (Org.). **Caracterização quali-quantitativa da produção de sedimentos**. Santa Maria: ABRH, 2001, p. 169-189.

HILU, A. **Erosão hídrica na bacia hidrográfica do rio Marumbi no estado do Paraná**. 2003. 107 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental da Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003.

HOLMES, R. R. Measurement of Bedload Transport in Sand-Bed Rivers: A Look at Two Indirect Sampling Methods. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report, 5091. Washington D.C: U.S. Government Printing Office, 2010.

HOSSAIN, M. M.; RAHMAN, M. L. Sediment transport functions and their evaluation using data from large alluvial rivers of Bangladesh. **IAHS - AISH Publication**, v. 249, p. 375- 382, 1998.

KARIM, F. Bed Material Discharge Prediction for Nonuniform Bed Sediments. **Journal of Hydraulic Engineering**, ASCE, vol. 124, n. 6, p. 597-604. Jun. 1998.

LEE, H. L.; MAYS, L.W. Hydraulic Uncertainties in Flood Levee Capacity. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 112, n. 10, Oct. 1986.

LIMERINOS, J. T. Determination of the Manning coefficient from measured bed roughness in natural channels: US Geological Survey, **Water Supply Paper 1898-B**, 47 p. 1970.

LIMA, J. E. F. W.; SILVA, E. M. Seleção de modelos para o traçado de curvas granulométricas de sedimentos em suspensão em rios. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** v.11, n.1, p.101–107, 2007.

LOPES, A. V. **Aplicação de métodos de previsão de assoreamento de reservatórios**. Campinas, 1993. 127 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento da Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1993.

LOPES, M. A. G. **Reconstituição da rotura da barragem das minas da Fonte Santa: análise do transporte sólido no vale a jusante**. 2012. 83 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2012.

MARTINS, D. P. **Dinâmica das formas de leito e transporte de carga de fundo no alto rio Paraná**. 2004. 69 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2004.

MATOS, A. J. S.; PIOLTINE, A.; MAUAD, F. F.; BARBOSA, A. A. Metodologia para a Caracterização do Coeficiente de Manning Variando na Seção Transversal e ao Longo do Canal Estudo de Caso Bacia do Alto Sapucaí-MG. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 16, n.4, p. 21-28, 2011.

MENDES, A. B. **Einstein.xls**, Modelo matemático para cálculo da descarga sólida total pelo método modificado de Einstein. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

MENDES, A. B. **Análise Sinérgica da Vida Útil de um Complexo Hidrelétrico: Caso do Rio Araguaia, Brasil**. 2005, 98 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

MENDONÇA, P. R. **Características hidrogeomorfológicas das bacias hidrográficas dos rios Santa Maria do rio Doce e Santa Joana/ES**. 2013. 141 f. Dissertação (Mestre em Geografia) - Programa de Pós-Graduação em Geografia do Centro de Ciências Humanas e Naturais da Universidade Federal do Espírito, Vitória, 2013.

MENDONÇA, A. S. F.; RIGO, D.; CAMPOS, M; STANZANI, L.; CAIADO, M. A. C; REIS, J. A. T.; PEREIRA, F. Z. **Modelagem e Proposição de Alternativas para a Minimização de Produção, Transporte e Deposição de Sedimentos e Melhoria de Qualidade de Água no Sistema Integrado da Bacia Hidrográfica do Rio Doce**. Vitória, 2013. (Relatório Técnico Científico, 011/2009, FAPES).

MESELHE, E. A.; PEREIRA, J. F.; GEORGIU, I. Y.; ALLISON, M. A.; McCORQUODALE, J. A.; DAVIS, M. A. Numerical modeling of mobile-bed hydrodynamics of the lower Mississippi River. In: World Environmental and Water Resources Congress, 2010, Rhode Island. **Proceedings**. Reston: ASCE, 2010.

MOLINAS, A.; WU, B. Transport of Sediment in Large Sand-Bed Rivers. **Journal of Hydraulic Research**, vol. 39, n. 2, p. 135-146, Oct. 2001.

MORRIS, G. L.; FAN, J. **Reservoir sedimentation handbook: design and management of dams, reservoirs, and watercheds for sustainable use**. New York: McGraw-Hill, p. 5.1-12.55, 1997 *apud* VESTENA, L. R. **Análise da relação entre a dinâmica de áreas saturadas e o transporte de sedimentos em uma bacia hidrográfica por meio de monitoramento e modelagem**. 2008. 268 f. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

NAKATO, T. Tests of selected sediment-transport formulas. **Journal of Hydraulic Engineering**, ASCE, v. 116, n. 3, p. 362-379, 1990.

NASCIMENTO, A. P. **Estimativa da Carga de Lavagem Transportada pelo Rio Atibaia, SP**. 2001. 198 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2001.

NASCIMENTO, A. P.; COIADO, E. M. Análise sobre a representatividade da carga de lavagem em escoamento à superfície livre – Rio Atibaia/SP. In: PAIVA, E. M. C. D.; PAIVA, J. B. D. (Orgs.). **Caracterização Quali-Quantitativa da Produção de Sedimentos**. Santa Maria: ABRH, 2001, p. 207-218.

NIÑO, Y.; TAMBURRINO, A. **Transporte hidráulico de sólidos - propiedades de los sedimentos** (continuación). Division recursos hidricos y medio ambiente, Departamento de Ingenieria Civil, Universidad de Chile - notas de aula. 2009. Disponível em: <https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2009/2/CI61N/1/material_docente/objeto/239839>.

OLIVEIRA, J.B. **Pedologia Aplicada**, Piracicaba/SP. Ed. FEALQ, 2011.

PAIVA, L. E. D. **Aplicação de métodos macroscópicos na determinação da carga sólida total transportada em rios**. 1995. 199 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia civil) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1995.

PAIVA, J. B. D. Métodos de Cálculo do Transporte de Sedimentos em Rios. In: PAIVA, J. B. D.; PAIVA, E. M. C. D. (Orgs.). **Hidrologia Aplicada a Gestão de Pequenas Bacias Hidrográficas**. Porto Alegre. ABRH, 2001. cap. 12, p. 313-364.

PAIVA, J.B. D.; BELING, F. A.; ROSA, L.H. **WinTSR - Cálculo do Transporte de Sedimentos em Rios**. HDS-CT- UFSM. 2002. (Software não publicado).

PAIVA, L. E. D. **A influência do diâmetro representativo do material do leito nas fórmulas de cálculo do transporte de sedimentos em escoamentos com superfície livre**. 2007. 615 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.

PAIVA, J. B. D., 1988. **Avaliação dos modelos matemáticos de cálculo do transporte de sedimentos em rios**. 1988. 240 f. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) - Universidade de São Paulo, São Paulo, Campinas, 1988 *apud* PAIVA, L. E. D. **A influência do diâmetro representativo do material do leito nas fórmulas de cálculo do transporte de sedimentos em escoamentos com superfície livre**. 2007. 615 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.

PARH-SANTA MARIA. **Plano de Ação de Recursos Hídricos da Unidade de Análise Santa Maria do Doce – PARH Santa Maria do Doce**. Consórcio Ecoplan – Lume. 2010. Disponível em: <http://www.riodoce.cbh.gov.br/PlanoBacia_PARH-Doce.asp>. Acesso em: 12 agosto 2013.

PEREIRA, M. A. F. **Processos hidrossedimentológicos em diferentes escalas espaço temporais no Bioma Mata Atlântica**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2010.

PUJOL, A; PATERSON, A; CHARETTE, J. La Aproximación de Las Fórmulas de Transporte. Congresso Internacional. XXI Congresso Latino Americano de Hidráulica. Anais. São Pedro-SP. Brasil, 2004 *apud* PAIVA, L. E. D. **A influência do**

diâmetro representativo do material do leito nas fórmulas de cálculo do transporte de sedimentos em escoamentos com superfície livre. 2007. 615 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.

RECKING, A.; LIÉBAULT, F.; PETEUIL, C.; JOLIMET, T. **Testing bedload transport equations with consideration of time scales.** Earth Surface Processes and Landforms, v. 37, n. 7, pp.774-789, 2012.

RIVAS, S. A. M.; SÁNCHEZ, J. L. L. Transporte de Sedimentos en el Río Orinoco. **In: XXI CONGRESSO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA, IAHR, Oct., São Pedro, SP, p.7, 2004.**

ROSS, J. L. S. Análise Empírica da Fragilidade dos Ambientes Naturais e Antropizados. **Revista do Departamento de Geografia**, nº 8, FFLCH-USP, São Paulo, 1994.

RUSSELL, A. J.; TWEED, F. S.; ROBERTS, M. J.; HARRIS, T. D.; GUDMUNDSSON, M. T.; KNUDSEN, Ó.; MARREN, P. M. **An unusual jökulhlaup resulting from subglacial volcanism, Sólheimajökull, Iceland.** Quaternary Science Reviews 29, 1363 – 1381, 2010.

SANTOS, I., FILL, H.D., SUGAI, M.R.V.B., BUBA, H., KISHI, R.T., MARONE, E., LAUTERT, L.F. **Hidrometria aplicada.** Curitiba, Instituto de Tecnologia para o desenvolvimento, p. 372, 2001.

SANTOS, B. B.; ALVES SOBRINHO, T.; SOUZA, J. S.; CARVALHO, G. A.; POMPEU, R. M.; COUTO, C. B. Avaliação de métodos de estimativa de transporte de sedimentos em rios. **In: X Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos, 2012, Foz do Iguaçu/PR. Anais do X Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos, 2012.**

SANTOS, R. A. H. dos. **Reconstituição da ruptura da barragem das minas da Fonte Santa. Análise da propagação da onda de cheia no vale a jusante.** 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2012.

SCAPIN, J. **Caracterização do Transporte de Sedimentos em Pequeno Rio Urbano na Cidade de Santa Maria – RS**. 2005. 116 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

SCAPIN, J.; PAIVA, J. B. D.; BELING, F. A. Avaliação de métodos de cálculo do transporte de sedimentos em um pequeno rio urbano. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 12, n.4, p. 5-21, 2007.

SIMONS, D. B.; SENTÜRK, F. **Sediment Transport Technology**. Fort Collins, Water Resources Publications, p. 807, 1992 *apud* HILU, A. **Erosão hídrica na bacia hidrográfica do rio Marumbi no estado do Paraná**. 2003. 107 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental da Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003.

SIMONS, D. B.; SENTÜRK, F. **Sediment Transport Technology**. Fort Collins, Water Resources Publications, p. 807, 1992 *apud* PAIVA, L. E. D. **A influência do diâmetro representativo do material do leito nas fórmulas de cálculo do transporte de sedimentos em escoamentos com superfície livre**. 2007. 615 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.

SIMONS, D. B.; SENTÜRK, F. **Sediment Transport Technology**. Fort Collins, Water Resources Publications, p. 807, 1992 *apud* SOUTO, C. C. R. A. **Modelagem hidrossedimentológica em bacias semiáridas com diferentes fórmulas de transporte acopladas ao modelo Mosee**. 2013. 127 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2013.

SILVA, R. C. V.; MASCARENHAS, f. C. B.; MIGUEZ, M. G. **Hidráulica Fluvial**. V. 1, COPPE/UFRJ, 2003.

SILVA, A. M. da; SCHULZ, H. E.; CAMARGO, P. B. de. **Erosão e hidrossedimentologia em bacias hidrográficas**. São Carlos: Rima, 320 p. 2003.

SOBRINHO, T. A.; SONE, J. S.; ANACHE, J. A. A.; ALMEIDA, I. K. de; SOUZA, J. S. de; CARVALHO, G. A.; GODOY, M. T. R.; POMPEU, R. de M.; COUTO, C. B.; Avaliação de métodos para a estimativa da descarga sólida total em rios. In: XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. 2013.

SOUTO, C. C. R. A. **Modelagem hidrossedimentológica em bacias semiáridas com diferentes fórmulas de transporte acopladas ao modelo Mosee**. 2013. 127 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2013.

SPIEGELBERG, G. **Um modelo morfodinâmico: desenvolvimento e aplicação no reservatório da usina hidroelétrica de estreito no rio Tocantins**. 2010. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Oceânica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

STRASSER, M. A. **Estudo da geometria das formas de fundo no curso médio do rio Amazonas**. 2002. 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

SUGUIO, K.; BIGARELLA, J. J. **Ambientes fluviais**. Florianópolis: EdUFSC, 1990. 183p.

VANONI, V. A. **Sedimentation engineering**. New York: ASCE 1977 *apud* COSTAS, M. F. T. **Avaliação hidrossedimentológica de uma pequena bacia em urbanização**. 2003. 121 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.

VESTENA, L. R. **Análise da relação entre a dinâmica de áreas saturadas e o transporte de sedimentos em uma bacia hidrográfica por meio de monitoramento e modelagem**. 2008. 268 f. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

VIEIRA, Z. C. **Modelagem do escoamento e erosão sob diferentes condições de chuva e uso do solo em bacias do Cariri Paraibano com o modelo distribuído MOSEE**. 2011. 145 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2011.

YANG, TED C. **Sediment Transport Theory and Practice**. New York. McGraw-Hill Companies. ISBN 0-07-912265-5.p. 395.1996.

ANEXOS

ANEXO A - FAIXA GRANULOMÉTRICA DO MATERIAL DE LEITO

Tabela A.1 - Faixa granulométrica do material de leito, a partir do método de peneiramento – Rio Doce.

Diâmetro (Φ) (mm)	% < Φ				
	22/03/11	10/08/11	02/12/11	10/2/2012	17/5/2012
9,5	100,0	98,8	100,0	100,0	100,0
8	99,8	97,6	100,0	100,0	99,5
6,35	99,4	96,0	100,0	100,0	99,3
4	98,8	93,5	100,0	100,0	98,5
2	96,8	85,5	95,3	99,8	94,0
1	90,6	73,1	88,0	98,3	82,2
0,5	78,2	57,1	79,7	92,5	55,4
0,25	19,4	13,1	13,8	17,0	6,2
0,177	2,7	4,7	3,1	4,7	1,4
0,125	1,6	1,2	0,6	0,8	0,3
0,062	0,3	0,1	0,1	0,1	0,0

Fonte: Mendonça *et al.* (2013).

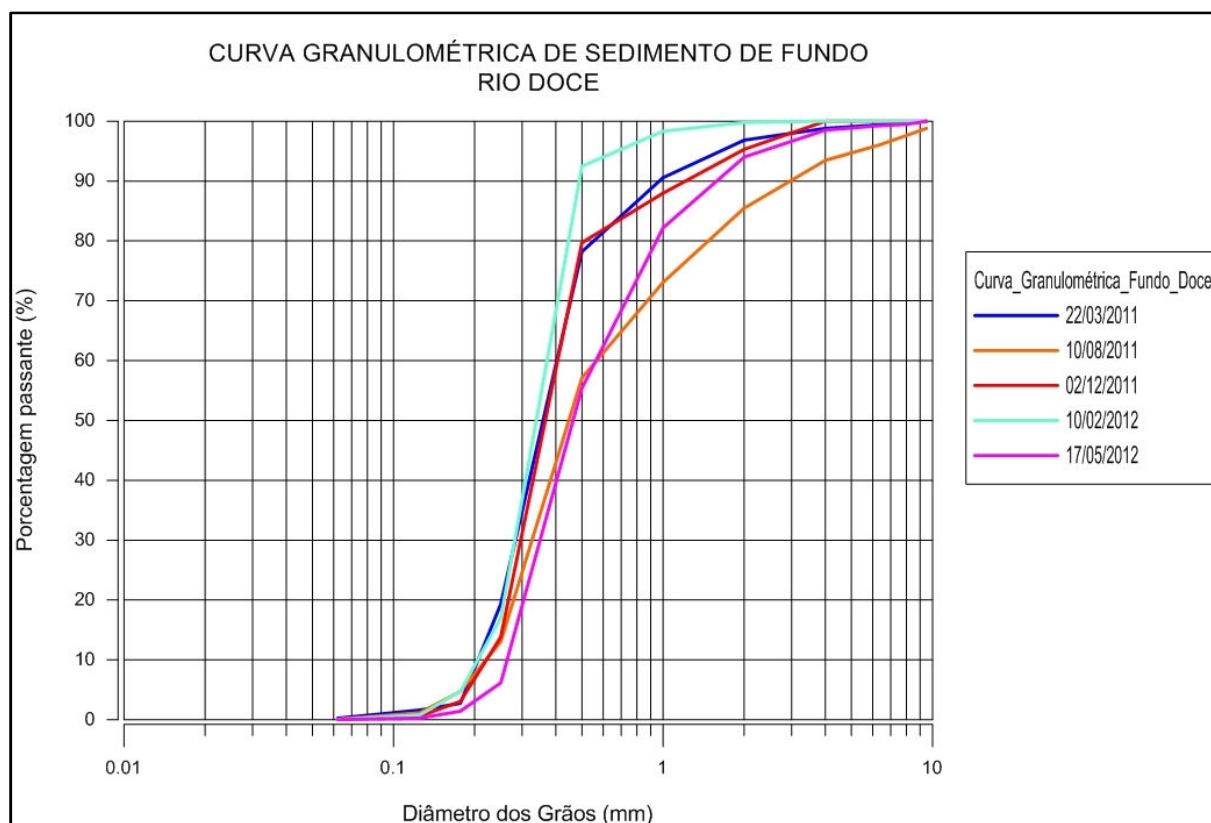


Figura A.1 - Curva Granulométrica do material do leito na seção do rio Doce, em todas as campanhas.

Tabela A.2 - Faixa granulométrica do material de leito, a partir do método de peneiramento - Rio Santa Maria do Doce.

Diâmetro (Φ) (mm)	% < Φ				
	19/3/2011	24/8/2011	19/11/2011	13/1/2012	26/4/2012
9,5	100,0	100,0	100,0	100,0	98,0
8	100,0	99,2	100,0	100,0	96,9
6,35	100,0	98,1	100,0	100,0	95,3
4	100,0	90,1	99,2	100,0	87,1
2	97,1	54,6	83,4	98,0	67,2
1	77,4	28,6	61,3	75,3	43,1
0,5	23,2	7,9	29,5	31,2	19,3
0,25	1,1	0,8	2,8	6,8	2,7
0,177	0,2	0,2	1,2	3,3	1,4
0,125	0,1	0,1	0,7	1,4	0,8
0,062	0,0	0,0	0,4	0,2	0,2

Fonte: Mendonça *et al.* (2013).

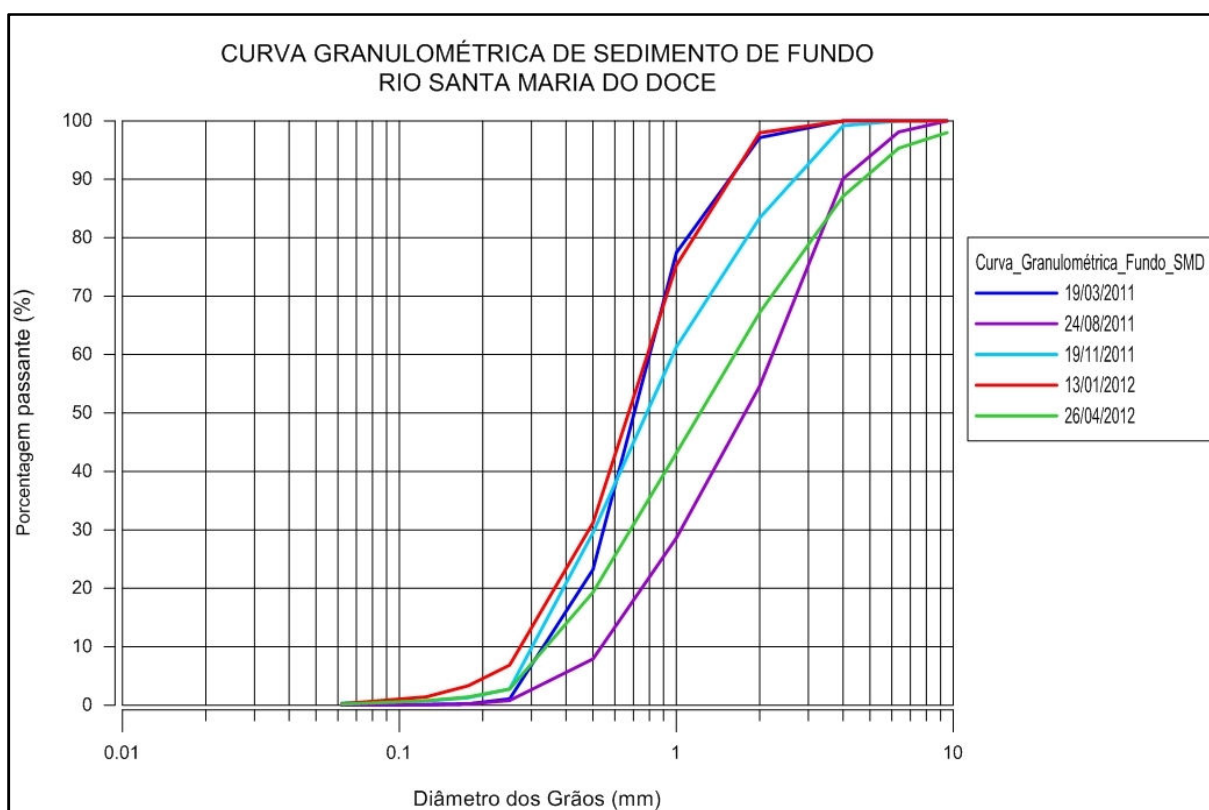


Figura A.2 - Curva Granulométrica do material do leito na seção do rio Santa Maria do Doce, em todas as campanhas.

Tabela A.3 - Faixa granulométrica do material de leito, a partir do método de peneiramento - Rio Santa Joana.

Diâmetro (Φ) (mm)	% < Φ				
	19/3/2011	12/8/2011	19/11/2011	13/1/2012	27/4/2012
9,5	99,4	97,5	100,0	100,00	98,7
8	99,3	96,3	99,3	100,00	97,6
6,35	99,1	94,6	98,6	100,00	96,4
4	97,2	89,5	96,7	100,00	92,9
2	80,5	73,3	80,0	80,62	79,6
1	44,9	51,4	61,0	38,87	51,9
0,5	13,5	28,5	32,1	15,29	26,2
0,25	1,1	11,1	9,9	6,45	13,8
0,177	0,5	5,9	5,2	4,06	10,0
0,125	0,4	2,0	2,5	1,36	4,3
0,062	0,1	0,2	0,8	0,45	1,0

Fonte: Mendonça *et al.* (2013).

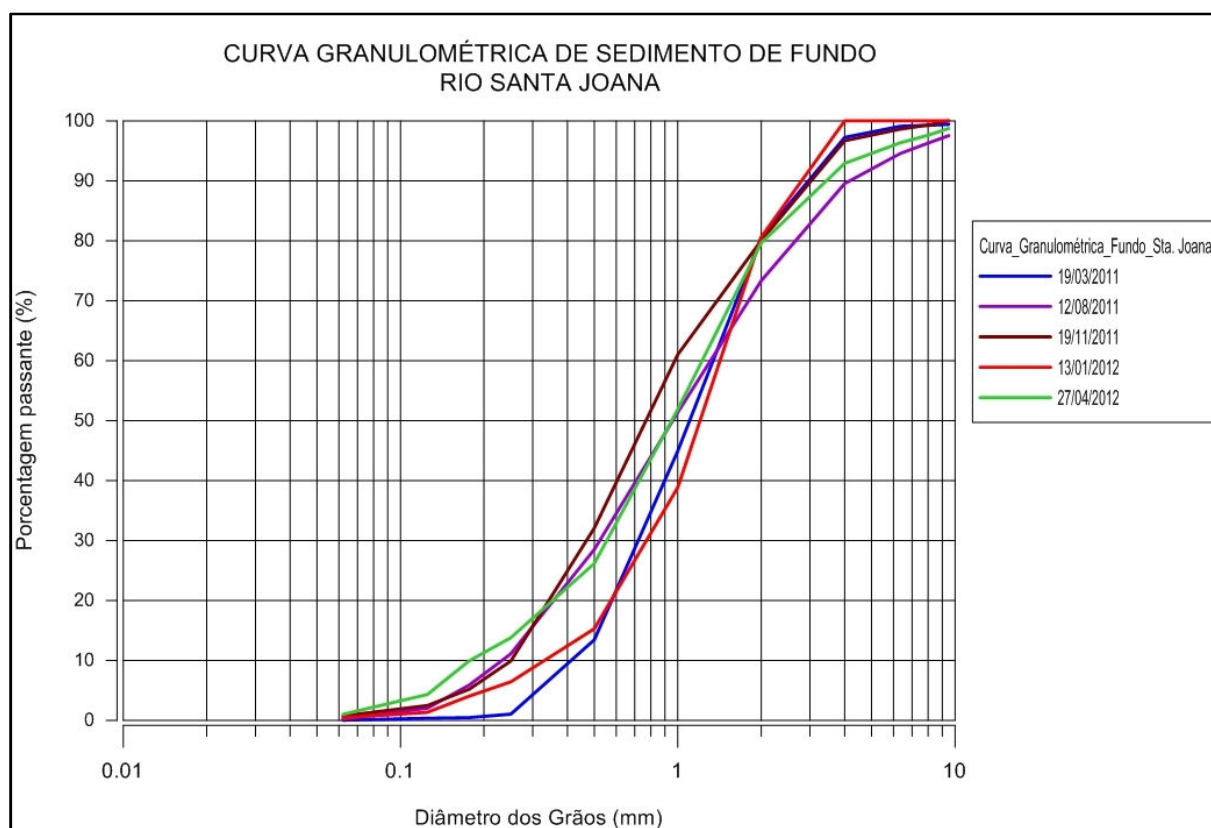


Figura A.3 - Curva Granulométrica do material do leito na seção do rio Santa Joana, em todas as campanhas.

Tabela A.4 - Faixa granulométrica do material de leito, a partir do método de peneiramento - córrego Santa Júlia.

Diâmetro (Φ) (mm)	% < Φ				
	25/8/2011	18/11/2011	30/11/2011	12/1/2012	26/4/2012
9,5	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
8	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
6,35	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
4	99,8	99,1	100,0	97,9	100,0
2	91,3	89,7	90,4	91,6	96,6
1	64,8	62,2	61,8	76,4	76,6
0,5	31,6	31,8	21,6	50,9	34,5
0,25	5,9	3,4	1,8	10,0	4,3
0,177	1,6	0,7	0,7	3,2	1,5
0,125	0,6	0,3	0,4	1,3	0,6
0,062	0,3	0,1	0,2	0,4	0,2

Fonte: Mendonça *et al.* (2013).

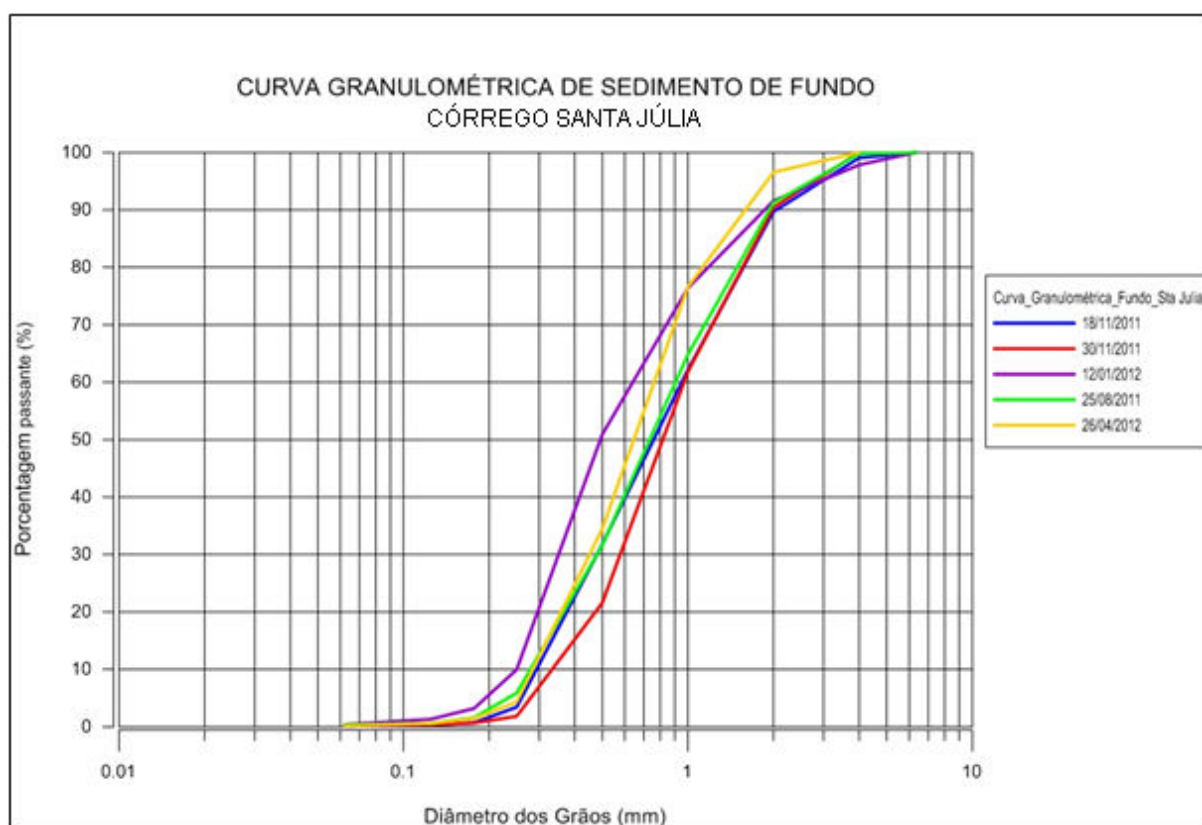


Figura A.4 - Curva Granulométrica do material do leito na seção do córrego Santa Júlia, em todas as campanhas.

Tabela A.5 - Faixa granulométrica do material de leito, a partir do método de peneiramento – Córrego Sossego.

Diâmetro (Φ) (mm)	% < Φ				
	18/3/2011	18/11/2011	29/11/2011	11/1/2012	25/4/2012
9,5	100,0	98,7	98,7	99,6	99,3
8	99,5	96,6	97,5	98,8	96,6
6,35	96,5	93,5	96,0	98,0	93,6
4	92,1	89,3	94,6	95,9	87,0
2	70,0	74,9	84,8	84,2	71,6
1	31,2	56,2	71,8	59,4	55,9
0,5	5,4	33,3	55,1	31,6	32,4
0,25	0,5	16,1	28,6	9,9	4,4
0,177	0,2	10,9	19,6	5,6	1,8
0,125	0,1	4,9	11,2	2,2	0,9
0,062	0,0	0,8	3,1	0,4	0,3

Fonte: Mendonça *et al.* (2013).

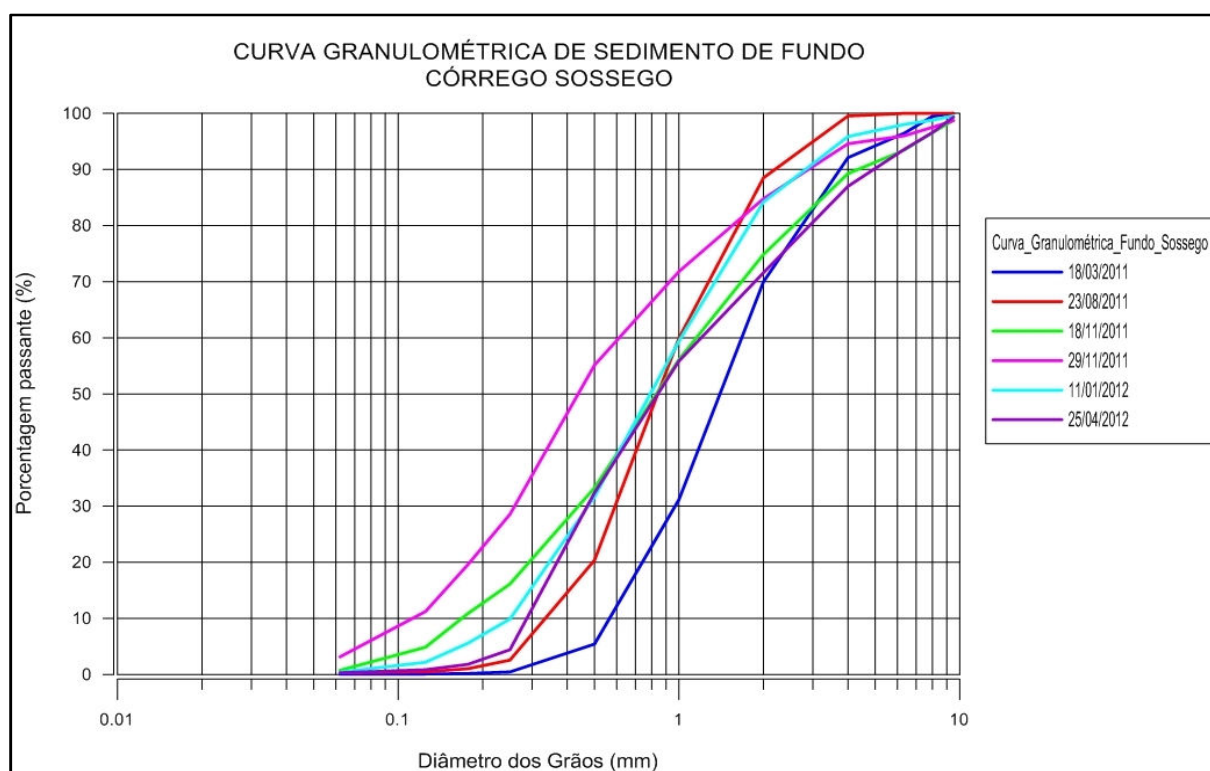


Figura A.5 - Curva Granulométrica do material do leito na seção do córrego Sossego, em todas as campanhas.

ANEXO B – GRÁFICOS PARA CÁLCULO DO MÉTODO DE EINSTEIN MODIFICADO POR COLBY E HEMBREE (1955)

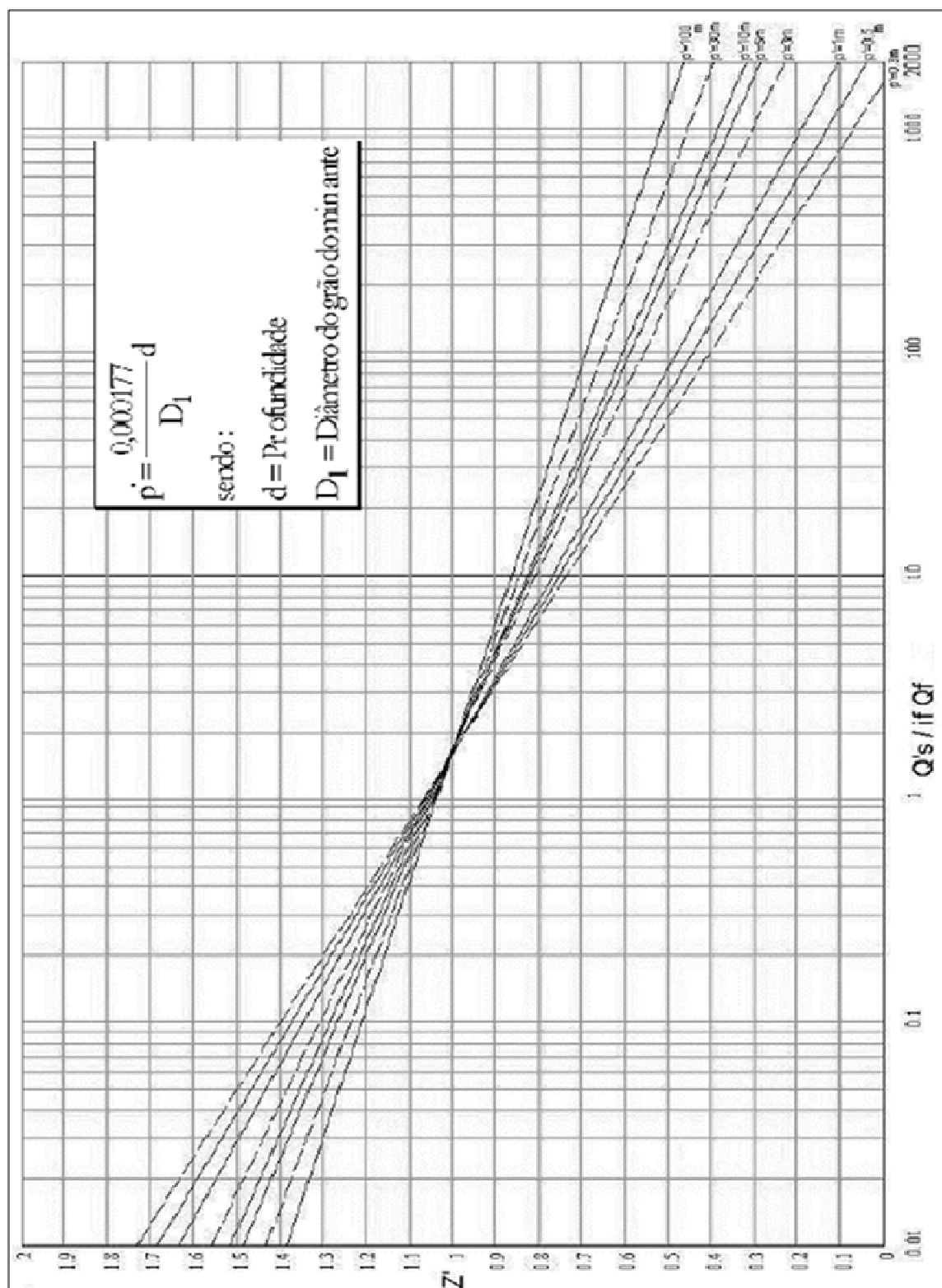


Figura B.1 - Relação aproximada de Z' para a razão da descarga sólida em suspensão na zona amostrada para a descarga sólida de arrasto.

Fonte: Colby & Hubbell (1961), SIMONS & SENTURK (1977) *apud* Carvalho (2008).

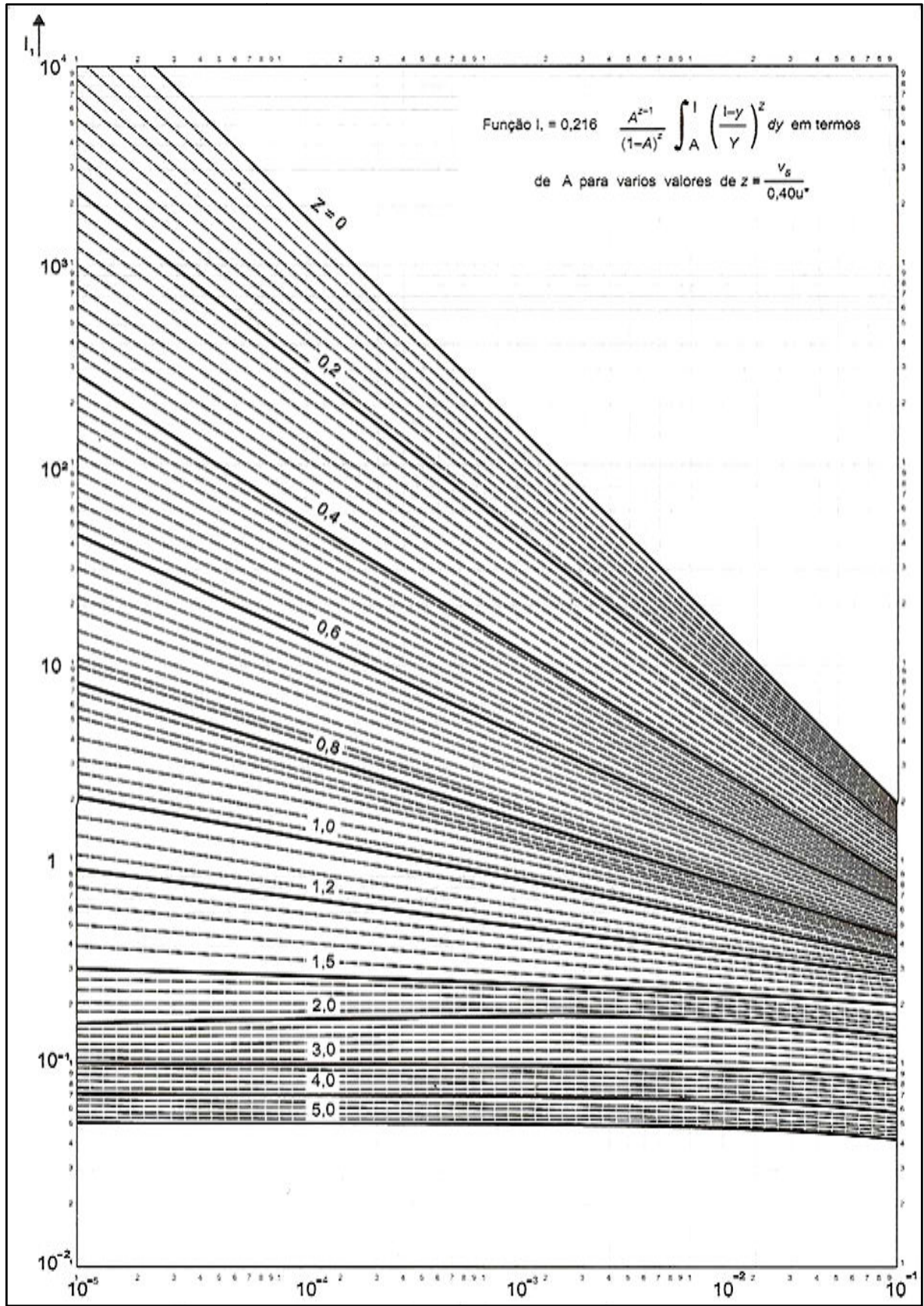


Figura B.2 - Expressão de I_1 .
 Fonte: USBR (1955), Colby & Hubbell (1961) *apud* Carvalho (2008).

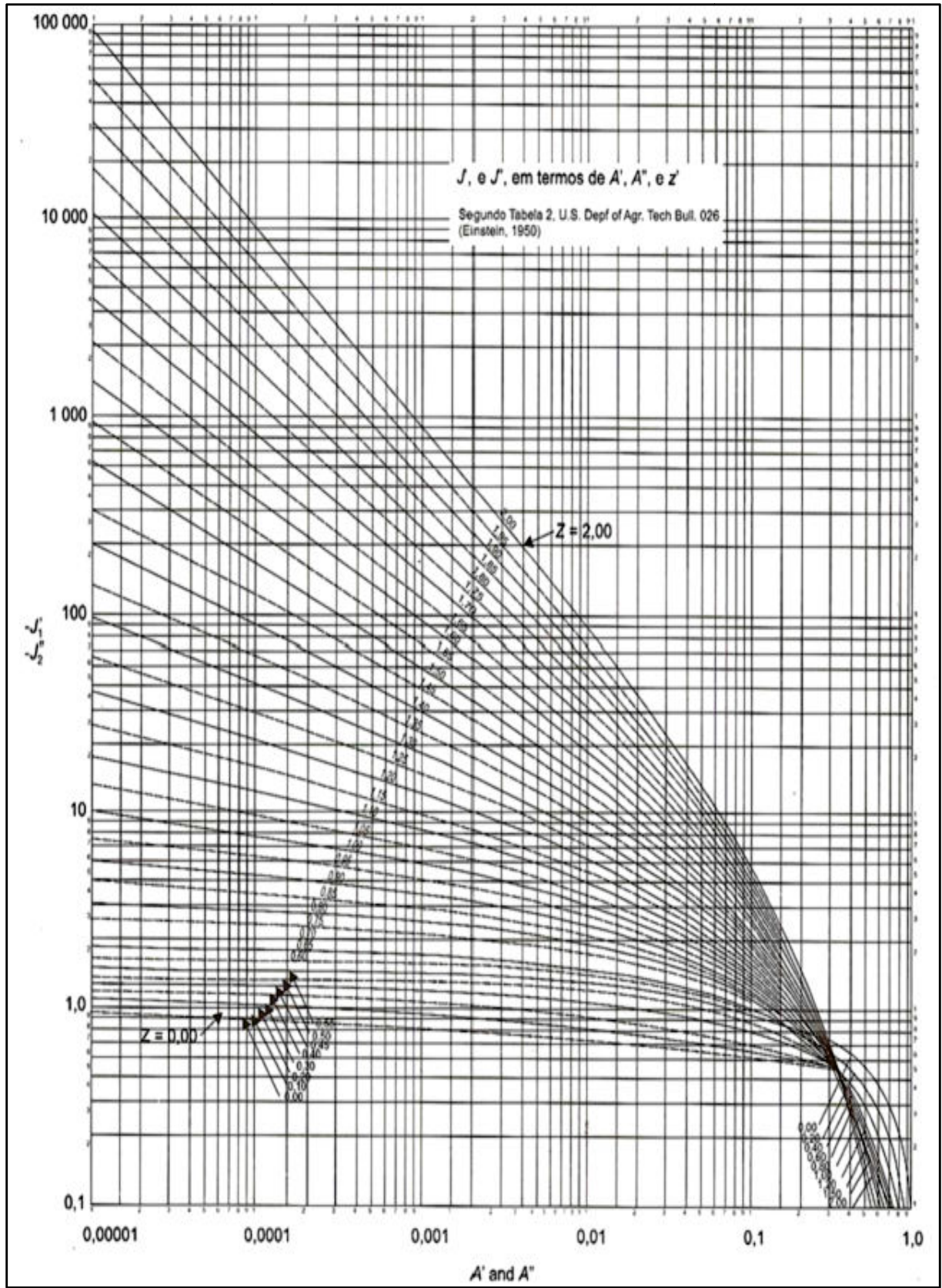


Figura B.3 - Expressão de J'_1 e J_1 .
 Fonte: USBR (1955), Colby & Hubbell (1961) *apud* Carvalho (2008).

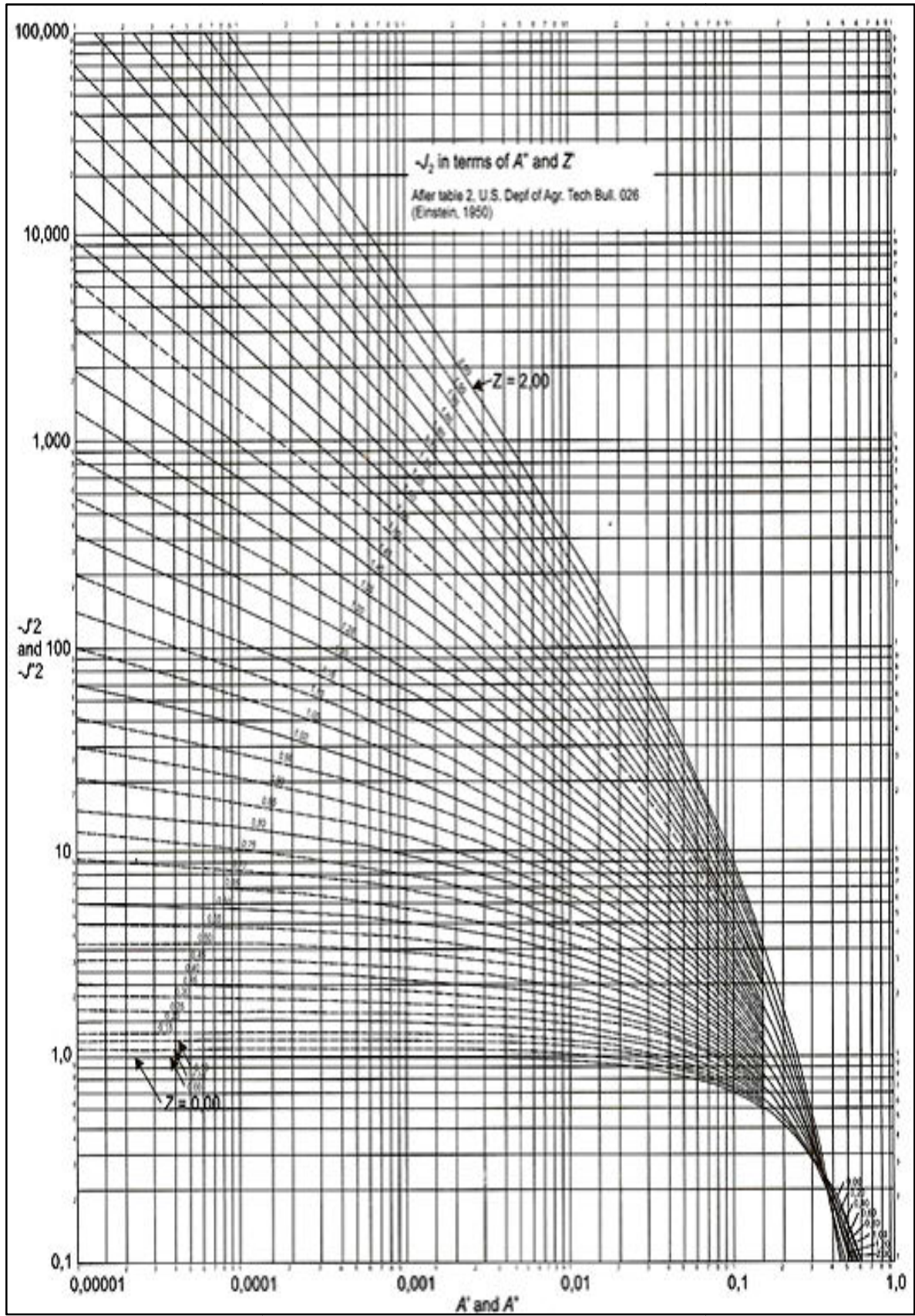


Figura B.4 - Expressão de $-J_2$.
 Fonte: USBR (1955), Colby & Hubbell (1961) *apud* Carvalho (2008).

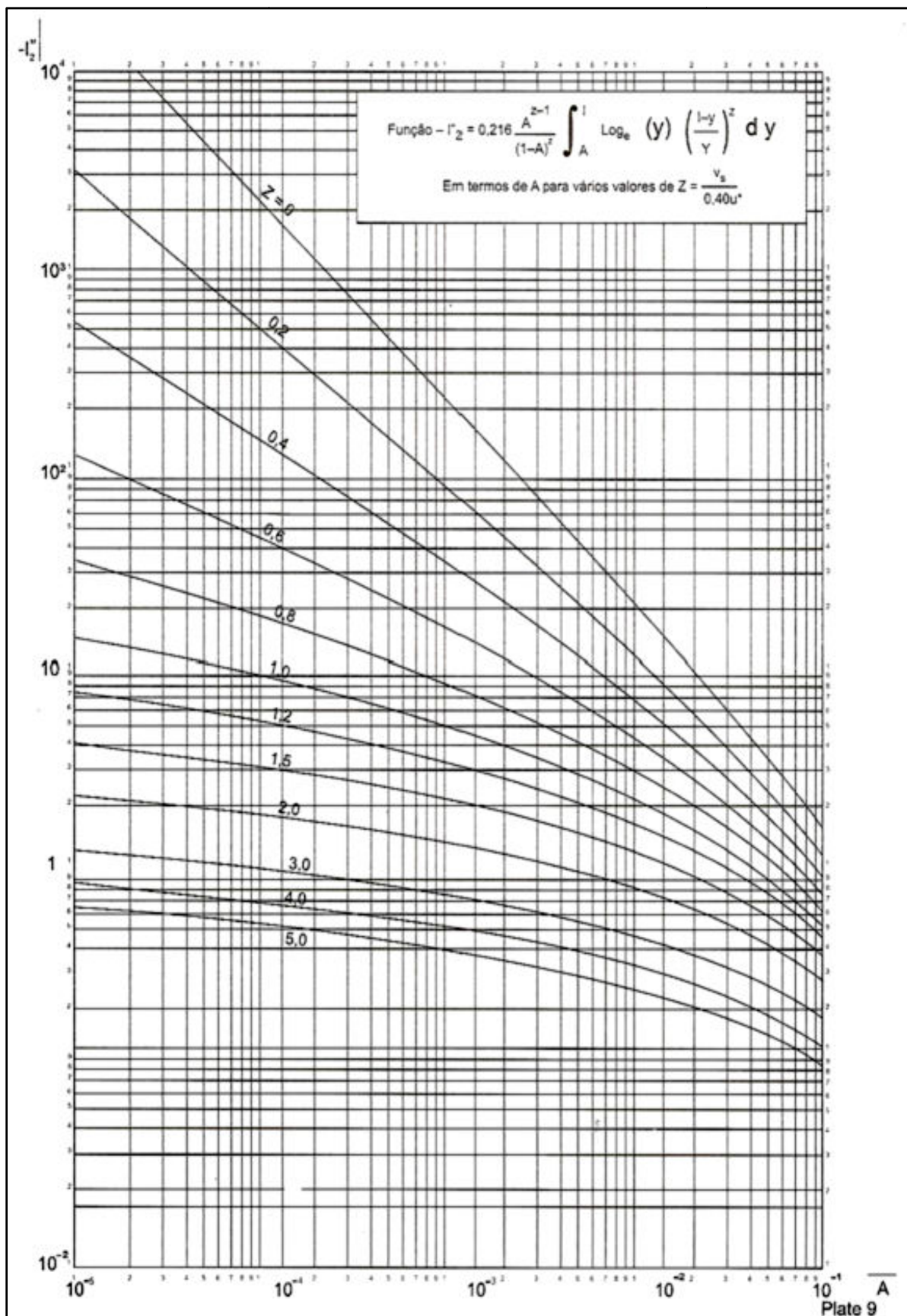


Figura B.5 - Expressão de Γ_2 .

Fonte: USBR (1955), Colby & Hubbell (1961) *apud* Carvalho (2008).

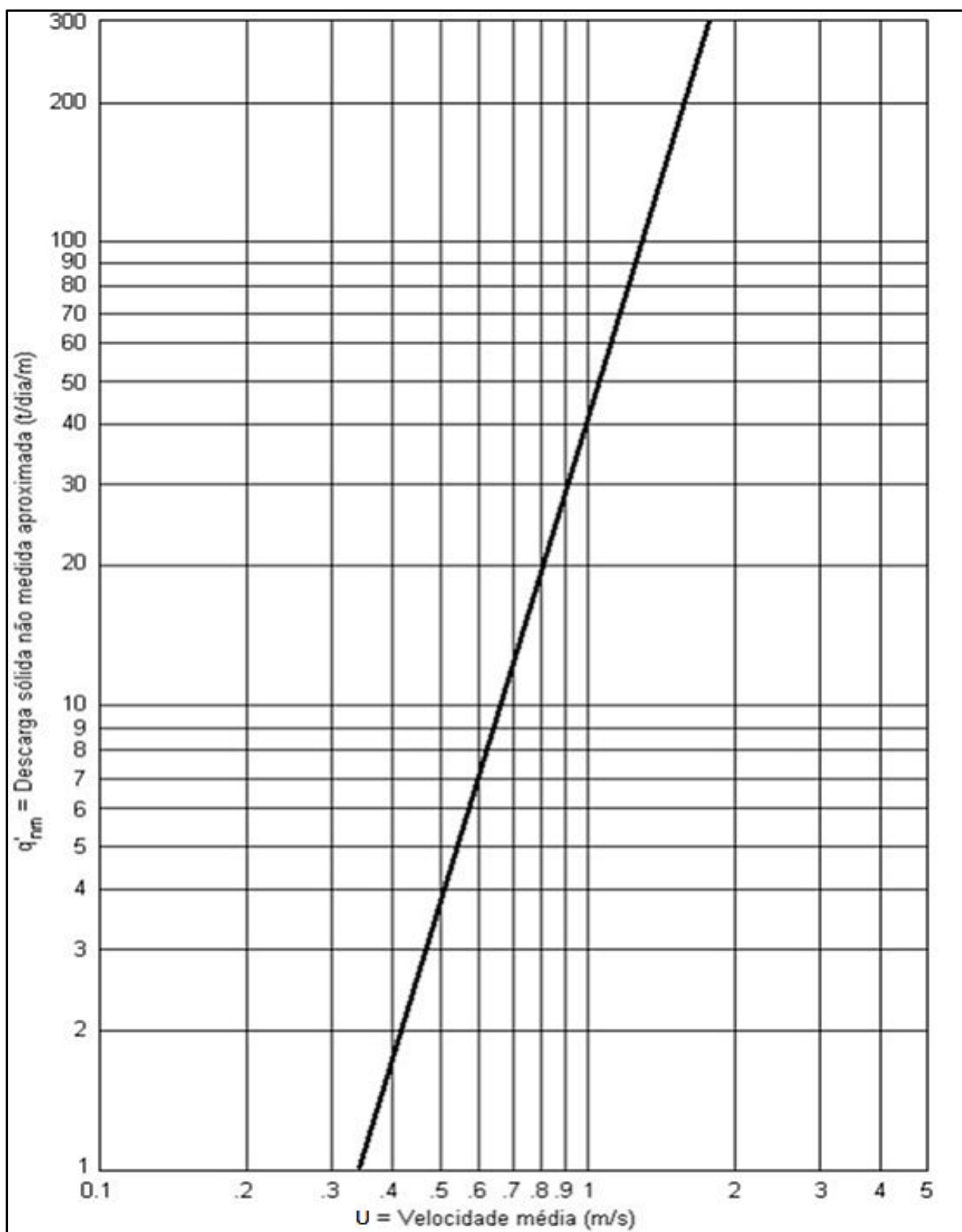
ANEXO C - ÁBACOS PARA CÁLCULO DO MÉTODO SIMPLIFICADO DE COLBY (1957)

Figura C.1 - Ábaco 1 para obtenção da descarga sólida não medida aproximada, por metro de largura do rio, a partir da velocidade média.
Fonte: Carvalho (2008).

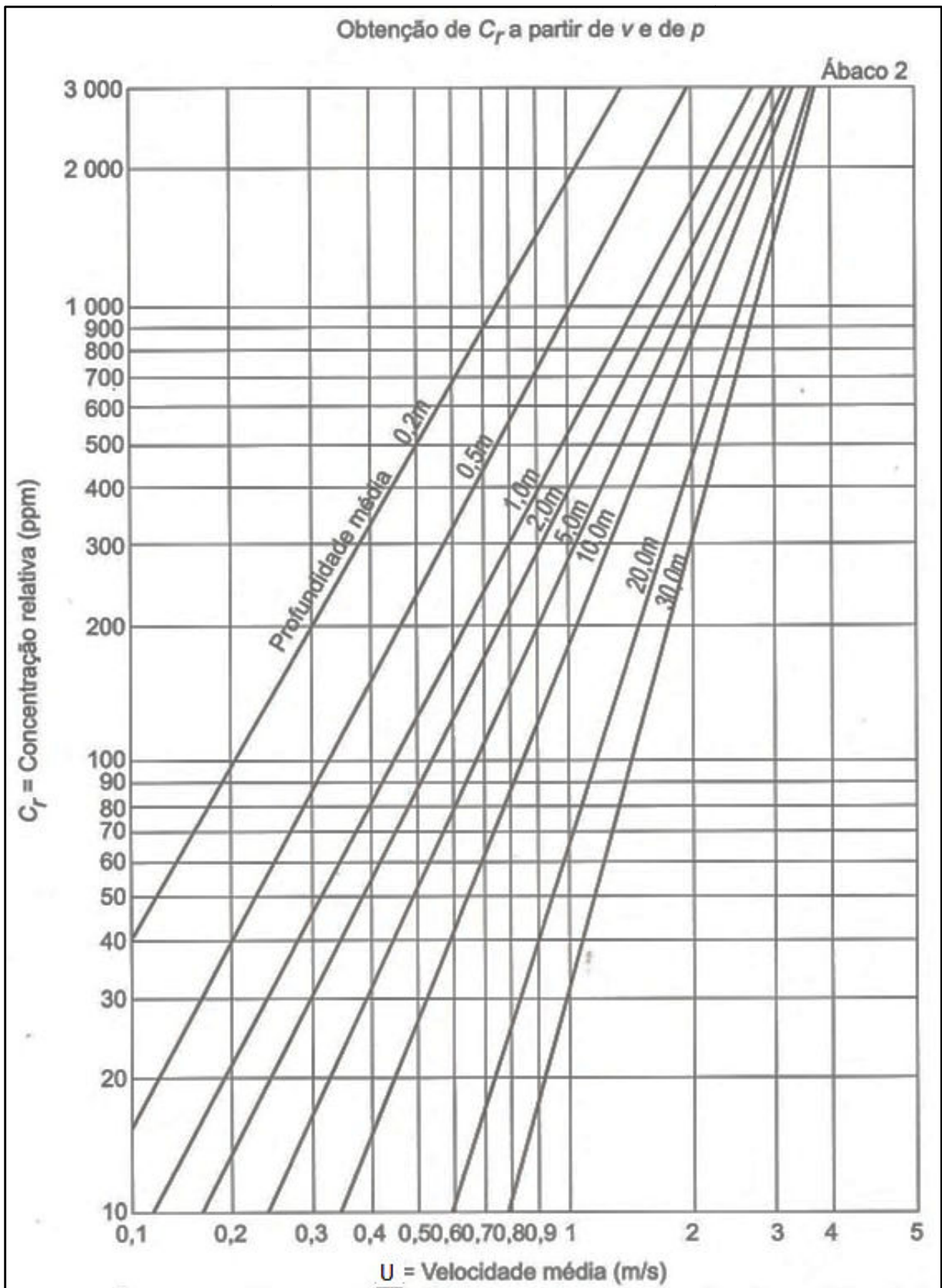


Figura C.2 - Ábaco 2 para obtenção da concentração relativa, a partir da velocidade média e da profundidade média do curso d'água.

Fonte: Carvalho (2008).

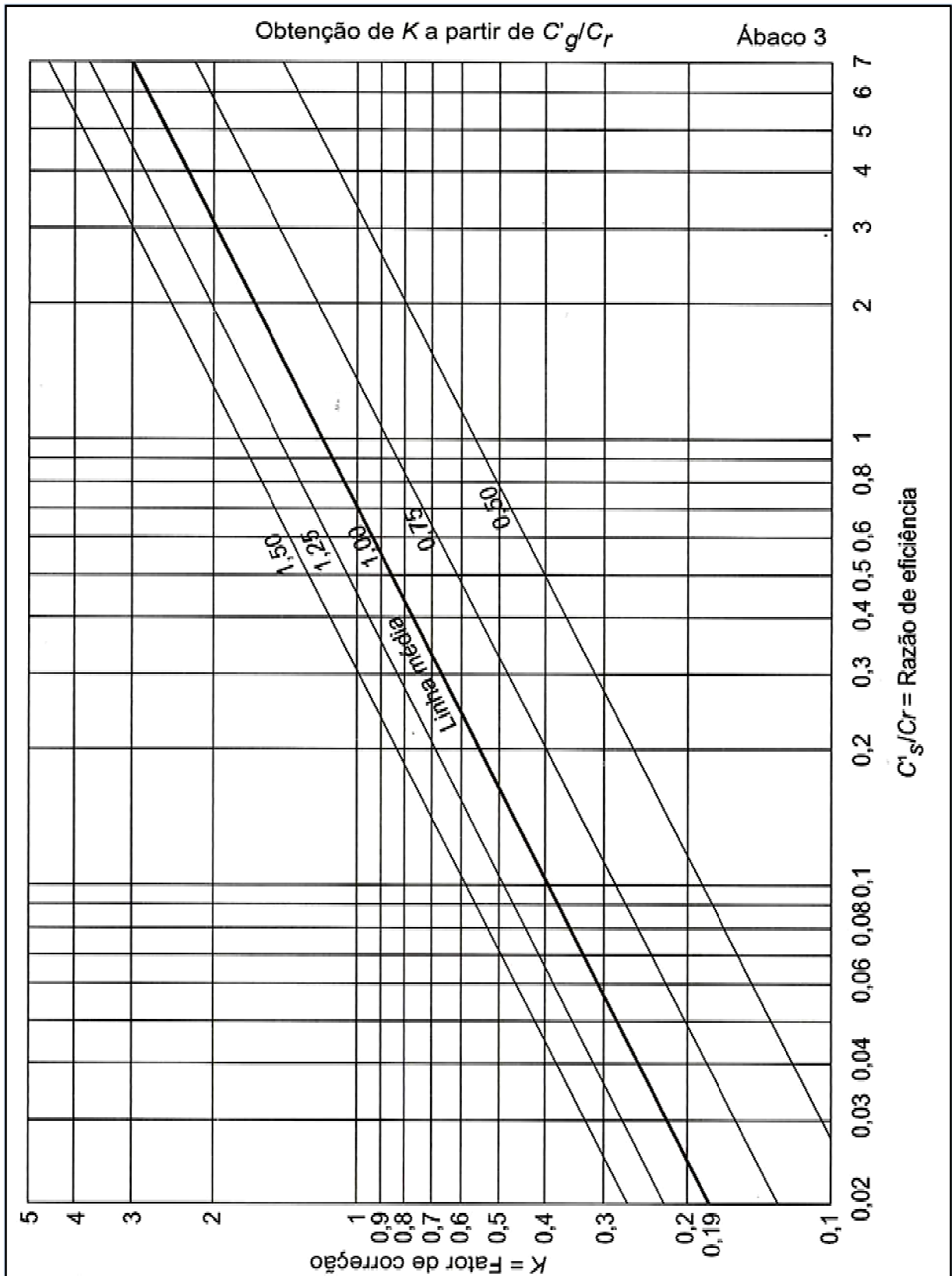


Figura C.3 - Ábaco 3 para obtenção do fator de correção a partir da razão de eficiência.
 Fonte: Carvalho (2008).

ANEXO D - INTERFACE DO PROGRAMA “EINSTEIN.xls”

Os cálculos da descarga sólida total foram executados com a utilização do programa computacional desenvolvido por Anderson Braga Mendes (2002). Nas Figuras D.1 e D.2 estão exibidas as entradas do programa, tendo como exemplo a campanha do dia 19/03/2011, no rio Santa Maria do Doce.

DADOS DE CAMPO E LABORATÓRIO

Descarga líquida:	24,750 m³/s
Velocidade:	0,860 m/s
Profundidade média (análise de QI):	2,000 m
Profundidade média (análise de Qs):	2,000 m
Largura:	14,30 m
Área:	28,77 m²
Temperatura:	25,00 °C
D ₆₅ (K _s):	0,853 mm
D ₃₅ :	0,584 mm
Concentração:	108,60 ppm
Distância do bico do amostrador ao fundo:	0,102 m

Figura D.1 - Entrada de dados para cálculo da descarga sólida total pelo método de Einstein.

FAIXAS GRANULOMÉTRICAS

Faixa (mm)	Curvas granulométricas	
	% material em suspensão	% material do leito
0.000-0.0156	24,35 %	
0.0156-0.0625	75,65 %	0,03 %
0.002-0.0625		
0.0625-0.125	0,00 %	0,09 %
0.125-0.250	0,00 %	0,95 %
0.250-0.500	0,00 %	22,13 %
0.500-1.000	0,00 %	54,22 %
1.000-2.000		19,71 %
2.000-4.000		2,87 %
4.000-8.000		0,00 %
8.000-16.000		0,00 %
TOTAIS:	100,00 %	100,00 %

Figura D.2 - Dados da distribuição granulométrica do material de leito e em suspensão.

ANEXO E - INTERFACE DO PROGRAMA "COLBY"

Transporte Sólido em Rios

Método de Colby - 1957

Dados

Posto/Rio	Data
<input type="text"/>	<input type="text"/>
Vazão (m ³ /s)	Velocidade (m/s)
<input type="text"/>	<input type="text"/>
Profundidade (m)	Área (m ²)
<input type="text"/>	<input type="text"/>
Larqura (m)	Concentração (mg/l)
<input type="text"/>	<input type="text"/>

Resultados

Concentração relativa
<input type="text"/>
D.Sólida não medida [t/dia]
<input type="text"/>
D.Sólida medida [t/dia]
<input type="text"/>
D.Sólida Total [t/dia]
<input type="text"/>

Calcular **Zerar Campos** **Exemplo** **Fechar** **Info**

Figura E.1 - Exemplo da tela do programa para cálculo das descargas sólidas totais pelo Método Simplificado de Colby, especificando as variáveis de entrada do modelo.

Fonte: Furnas Centrais Elétricas, 1996.

ANEXO F - INTERFACE DO PROGRAMA WinTSR

Neste anexo apresenta-se o programa computacional WinTSR, ferramenta utilizada no presente estudo. A Figura F.1 apresenta a interface principal do programa.

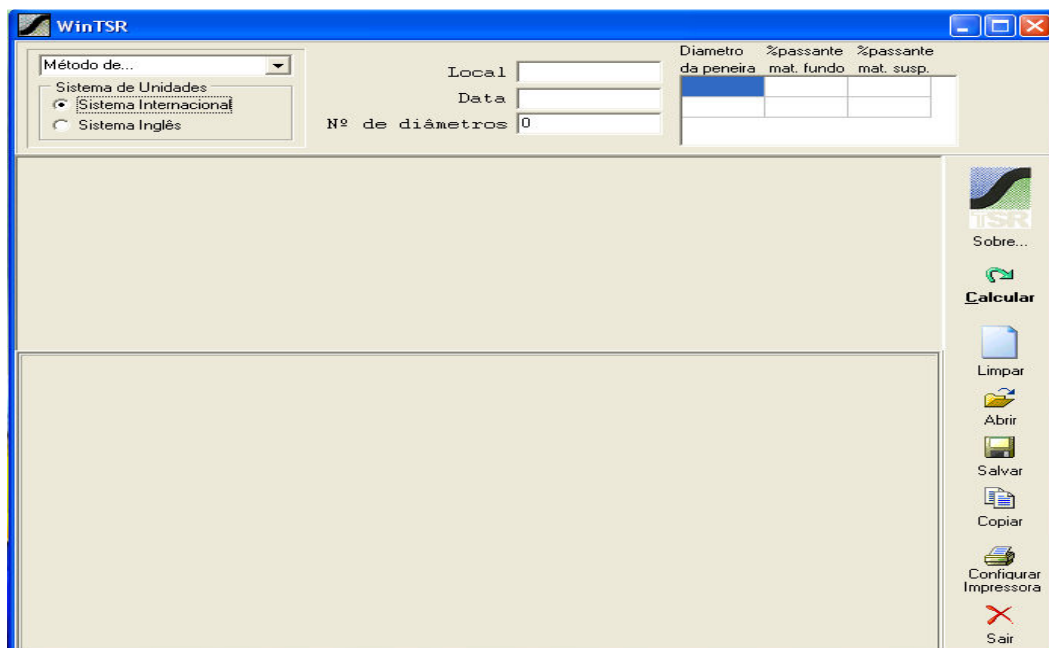


Figura F.1 - Interface principal do programa WinTSR.

Na Figura F.2 apresenta-se janela na qual são introduzidos dados hidráulicos de transporte de sedimentos.

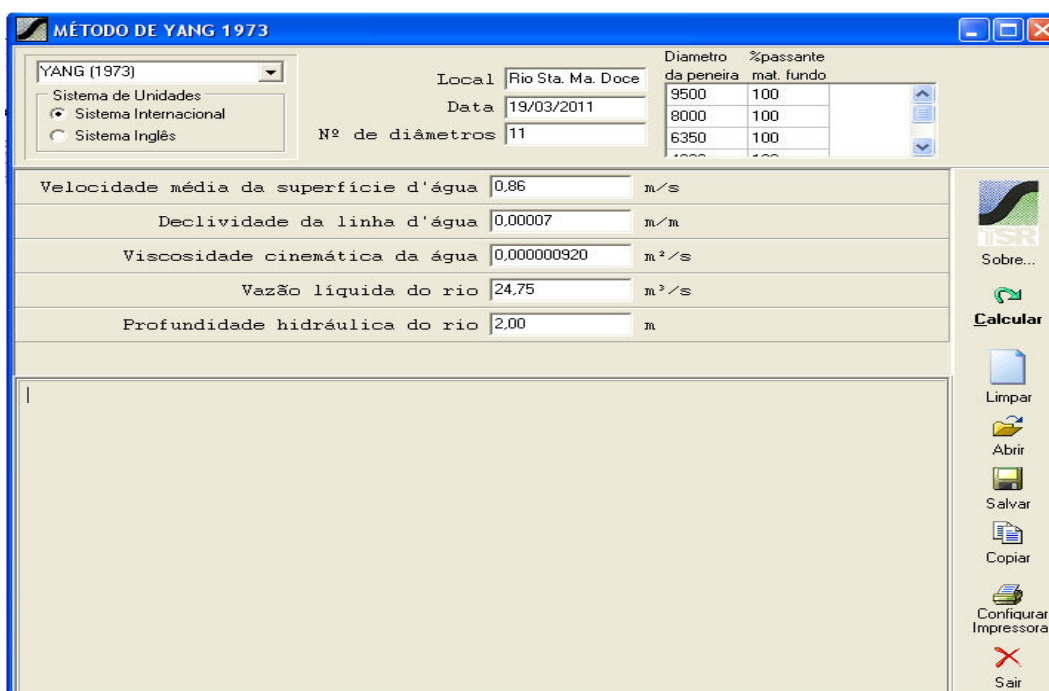


Figura F.2 - Janela das condições iniciais e parâmetros de transporte.

Os dados apresentados na Figura F.2 correspondem à campanha realizada no dia 19/03/2011. Após inserir os dados necessários, basta apenas clicar em “calcular” que o resultado será apresentado, como mostrado na Figura F.3.

The screenshot shows the 'MÉTODO DE YANG 1973' software interface. The window title is 'MÉTODO DE YANG 1973'. The interface is divided into several sections:

- Input Fields:**
 - Method: YANG (1973)
 - Local: Rio Sta. Ma. Doce
 - Data: 19/03/2011
 - Nº de diâmetros: 11
 - System of Units: Sistema Internacional (selected)
- Table:**

Diametro da peneira	%passante mat. fundo
9500	100
8000	100
6350	100
.....
- Calculated Results:**
 - Velocidade média da superfície d'água: 0,86 m/s
 - Declividade da linha d'água: 0,00007 m/m
 - Viscosidade cinemática da água: 0,000000920 m²/s
 - Vazão líquida do rio: 24,75 m³/s
 - Profundidade hidráulica do rio: 2,00 m
- Output Text:**

```

CÁLCULO DE SEDIMENTOS DE FUNDO, MÉTODO DE YANG 1973
-----
Local da leitura.....: Rio Sta. Ma. Doce
Data da coleta dos dados.....: 19/03/2011
Sistema de unidades adotado.....: Sistema Internacional de Unidades
-----
Velocidade média.....: 0,86 m/s.
Declividade da linha d'água.....: 0,00007 m/m.
Profundidade hidráulica do Rio.....: 2,00 m.
Viscosidade cinemática da água.....: 0,000000920 m²/s.
Vazão líquida do Rio.....: 24,75 m³/s.
-----
DIAMETRO DA PENEIRA (Microns) * QUE PASSA MAT FUNDO

```
- Toolbar:** Includes buttons for 'Calcular', 'Limpar', 'Abrir', 'Salvar', 'Copiar', 'Configurar Impressora', and 'Sobre...'.

Figura F.3 - Janela apresentado os resultados obtidos.