

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA



Joice Faria Amaral

Análise do Transporte de Sedimentos na Bacia do Rio
Claro

Trabalho de Graduação
2010

Civil-Aeronáutica

Joice Faria Amaral

Análise do Transporte de Sedimentos na Bacia do Rio Claro

Orientadora
Prof.^a Dr.^a Íria Fernandes Vendrame

Divisão de Engenharia Civil

SÃO JOSÉ DOS CAMPOS
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA

2010

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Divisão de Informação e Documentação

Amaral, Joice Faria

Análise do Transporte de Sedimentos na Bacia do Rio Claro/ Joice Faria Amaral.

São José dos Campos, 2010.

98f.

Trabalho de Graduação – Divisão de Engenharia Civil –

Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2010. Orientadora: Prof.^a Dr.^a Íria Fernandes Vendrame.

1. Transporte de sedimento. 2. Curva-chave 3. Fórmula de yang para areias. I. Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. Divisão de Engenharia Civil. II. Título

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

AMARAL, Joice Faria. **Análise do Transporte de Sedimentos na Bacia do Rio Claro**. 2010. 98 folhas. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

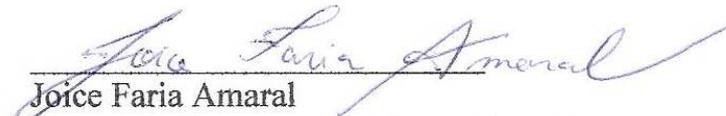
CESSÃO DE DIREITOS –

NOME DO AUTOR: Joice Faria Amaral

TÍTULO DO TRABALHO: Análise do Transporte de Sedimentos na Bacia do Rio.

TIPO DO TRABALHO/ANO: Graduação / 2010

É concedida ao Instituto Tecnológico de Aeronáutica permissão para reproduzir cópias deste trabalho de graduação e para emprestar ou vender cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de graduação pode ser reproduzida sem a autorização do autor.


Joice Faria Amaral
Prudêncio Bessa, nº200, Parque Rosário
28020-100 – Campos dos Goytacazes – RJ

ANÁLISE DO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS NA BACIA DO RIO CLARO

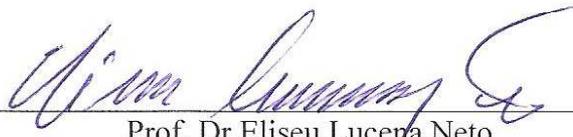
Essa publicação foi aceita como Relatório Final de Trabalho de Graduação



Joice Faria Amaral, Asp. Of.
Autor



Prof.ª. Dr.ª Íria Fernandes Vendrame- ITA
Orientadora



Prof. Dr Eliseu Lucena Neto
Coordenador do Curso de Engenharia Civil-Aeronáutica

São José dos Campos, 26 de novembro de 2010

AGRADECIMENTOS

À minha relatora Nadiane Smaha Kruk e principalmente à minha orientadora Íria Fernandes Vendrame por todo apoio dado nesse trabalho.

Aos meus amigos da turma CIVIL-10 que acompanharam cada obstáculo sempre torcendo pela minha vitória, em especial, ao Franco.

Às minhas amigas da turma ITA-09 e T-10, à Maria Claudia e ao Bruno Viana que acompanharam todo meu trajeto no ITA mesmo depois de formados.

À minha família, em especial, à minha avó, que sempre me incentivou a ingressar no ITA desde muito nova.

Ao meu companheiro na difícil reta final desse curso de graduação.

RESUMO

O transporte de sedimentos na bacia do Rio Claro interfere na vida da população na região do litoral norte paulista. O estudo da descarga sólida no Rio Claro possui grande utilidade em programas que visam evitar os problemas causados por descargas sólidas excessivas.

Em contribuição a esse estudo, no trabalho apresentado foi determinada a função que descreve a descarga sólida de material de leito a partir da utilização do método indireto de cálculo desenvolvido por Yang (1973) para areias.

Além disso, foi determinada a curva-chave para a seção do Rio Claro em estudo e avaliado qualitativamente a relação das ocorrências de chuvas com as alterações do nível do Rio Claro.

Para realização do trabalho foi feita uma ampla revisão bibliográfica sobre tópicos relacionados à sedimentologia.

Por fim, o trabalho exemplifica o cálculo da descarga sólida total para dados coletados no dia 31 de março de 2009 no Rio Claro.

Palavras-chave: transporte de sedimento, curva-chave, fórmula de Yang para areias.

ABSTRACT

The sediment transportation in Claro River Basin interferes in the life of the people living at north Coast of São Paulo. The solid discharge study in Claro River has a great utility in programs that aim avoid the problems caused by excessive solid discharges.

In addition to this study, in the presented work it was determined the function that describes de solid discharge of ground material using the indirect calculus developed by Yang (1973) for sands.

Besides that, it was determined the flow curve for the studied Claro River section and qualitatively evaluated the relation between the rain occurrence and the level alterations in Claro River.

To conduct the study it was done a comprehensive literature review on topics related to sedimentology.

Finally, the work exemplifies the total solid discharge calculation for data collected at March 31st, 2010 at Claro River.

Key words: sediment transportation, key-curve, Yang formula for sands.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-Localização da bacia do rio Claro.....	13
Figura 2-Bancos de assoreamento no baixo rio Claro-Fonte:Íria Vendrame.....	14
Figura 3-Erosão nas margens do rio claro. Fonte Íria Vendrame.....	15
Figura 4-Pequeno porto assoreado na foz do rio Juqueriquerê. Fonte: Íria Vendrame..	16
Figura 5-Captação no baixo Rio Claro.....	17
Figura 6-Captação de água no Alto Rio Claro. Fonte: Íria Vendrame.....	17
Figura 7-distribuição dos sedimentos ao longo da bacia hidrológica (Carvalho, 2008)	21
Figura 8-diagrama da distribuição da velocidade e da concentração na seção transversal de um rio (Carvalho, 2008).....	22
Figura 9-Distribuição de materiais diferentes ao longo da profundidade do rio (Carvalho, 1994).....	23
Figura 10-Erosão por remoção em massa. Fonte: Carlos Nunes da Costa.....	25
Figura 11-Gráfico da descarga sólida em suspensão para uma vertical.....	26
Figura 12-Gráfico para cálculo da descarga sólida em suspensão na seção transversal amostrada.....	27
Figura 13-Valores de x em função de Ks (D65) (USB, 1955).....	35
Figura 14-Gráfico de determinação da porcentagem de fluxo amostrado A' (USB, 1955).....	36
Figura 15-Gráfico de obtenção de ϕx em função de ψ (USB,1955).....	37
Figura 16-Multiplicadores para o cálculo dos Zs para cada granulometria a partir do Z de referência (USB, 1955).	39
Figura 17-Relação aproximada de Z' para a razão da descarga sólida em suspensão na zona amostrada para a descarga sólida de arrasto (Colby & Hubbell, 1961, Simons & Senturk, 1977)	40
Figura 18-Expressão de I' (USB, 1955, Colby e Hubbell, 1961).....	42
Figura 19-Expressão de J e J' (USB, 1955, Colby e Hubbell, 1961)	43
Figura 20- Expressão de -J2 (USB, 1955, Colby & Hubbell, 1961)	44
Figura 21-Expressão de I" (USB, 1955, Colby & Hubbell , 1961).....	45
Figura 22- Amostrador de água ISCO Série 6712 full size. Fonte: ISCO, 2004	59
Figura 23-Possibilidades de coletas de amostras. Fonte : ISCO, 2004.	60
Figura 24- Amostrador Liquiport 2000. Fonte: Hobeco, 2006.	61

Figura 25-Mapa sem escala da pluviosidade na região da bacia do Rio Claro. Fonte: Andrade, 2009.	64
Figura 26-Mapa de vegetação. Fonte: Andrade (2009).....	65
Figura 27-Mapa pedológico da Bacia do Rio Claro. Fonte Modificada de Andrade 2009.	66
Figura 28-Extrapolção pelo método de Stevens. Fonte: Sefione, 2002.....	69
Figura 33-Localização do ponto de coleta.....	80
Figura 34-Mapa de declividade da Bacia do Rio Claro. Fonte: Andrade (2009).....	81
Figura 35-fotografia da PCD do CPTEC no Rio Claro.	82
Figura 36-Batimetria seção 2.....	83
Figura 37-Entrada de dados para cálculo da descarga sólida total pelo método de Einstein.	84
Figura 38-Dados da distribuição granulométrica do material do leito e em suspensão.	85
Figura 39-Resultado da aplicação do método modificado de Einstein.	87

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-Resumo das principais fórmulas para cálculo da descarga de arrasto e de material de leito	30
Tabela 3- Volumes mínimos de amostras necessários para análise de concentração média de sedimentos em suspensão (WMO, 1981)	51
Tabela 4-Amostradores de sedimentos em suspensão mais utilizados no Brasil.....	56
Tabela 5- dados da bomba do ISCO 6712 full size. Fonte: Neto 2008.....	58
Tabela 6-especificações gerais do equipamento ISCO 6712 full size. Fonte: Neto, 2008	60
Tabela 7- Dados do Rio Claro	70
Tabela 8-Valores utilizados na fórmula de Yang para areias.....	79
Tabela 9-distribuição granulométrica do material de fundo do Rio Claro. Fonte Perdomo (2010).....	79
Tabela 10-Concentração da descarga de material de leito para cada fração granulométrica.....	81
Tabela 11-Concentração de sólidos em suspensão.....	83
Tabela 12-Profundidade e velocidade da corrente nos pontos da batimetria.....	83
Tabela 13-Cálculo da descarga sólida em suspensão.....	84
Tabela 14-Distribuição granulométrica do material sólido em suspensão coletado com amostrador ISCO. Fonte: Pereira (2010).....	85
Tabela 15-Descargas sólidas para os dias 23/02/2008 e 31/03/2009.....	89

LISTA DE ABREVIATURAS

ABRH	<i>Associação Brasileira de Recursos Hídricos</i>
ABNT	<i>Associação Brasileira de Normas Técnicas</i>
COBRAPE	<i>Companhia Brasileira de Projetos e Empreendimento</i>
CPTEC	<i>Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos</i>
ETA	<i>Estação de Tratamento de Esgoto</i>
IPI	<i>Instituto de Pesquisas Técnicas</i>
PCD	<i>Plataforma de Coleta de Dados</i>
USBR	<i>United States Bureau of Reclamation</i>
USGS	<i>United States Geological Survey</i>
OMM	<i>Organização Mundial de Meteorologia</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras romana maiúsculas	
Q _{ss}	descarga sólida em suspensão na seção transversal
C _{mv}	concentração média na vertical amostrada
Q	descarga líquida na seção transversal
C	concentração média na seção
Q _{sa}	descarga sólida do leito na seção transversal
L	largura da seção transversal
E _{am}	eficiência de amostragem do equipamento
A	área da seção transversal
T	temperatura da água
Q _{sm}	descarga medida de sedimentos em suspensão transportado
Q's	descarga de sedimentos em suspensão através da zona amostrada
A'	fração da profundidade não amostrada
Q _f	descarga de fundo
D	média geométrica dos diâmetros das partículas
Z'	expoente da distribuição vertical de sedimentos
D _I	valor do diâmetro dominante
V _{am}	volume da amostra
A _{bico}	área do bico utilizado
D _b	diâmetro do bico
R _t	taxa de trânsito
H	nível da água
R _h	raio hidráulico
C _v	coeficiente variável em função do raio hidráulico e da natureza do leito
J	declividade da linha de energia
I	declivida de fundo
D ₅₀	diâmetro de partículas nos quais 50% do material do leito, por peso, são mais finos
U*	velocidade de cisalhamento
V _{cr}	velocidade média de escoamento em movimento inicial
C _i	concentração das partículas na fração granulométrica i

Letras romanas minúsculas	
c	concentração de sedimentos no ponto
g	aceleração da gravidade
ho	nível zero da régua de medição
if	fração, em peso, do sedimento na granulometria f
l	largura parcial de influência
lb	largura da boca do amostrador
n	número de pontos amostrados
nm	coeficiente de Manning
p	profundidade média
p s	profundidade média da seção nas verticais amostradas
pn	distância na vertical não amostrada
q	descarga líquida parcial no segmento
qsa	desarga sólida unitária do leito
qss	descarga sólida em suspensão
t	tempo de amostragem
u'x	velocidade de cisalhamento
v	velocidade da corrente no ponto de amostragem
ws	velocidade média de queda

Letras gregas	
δ	espessura da camada laminar
Δp	profundidade de influência do ponto considerado
ν	viscosidade cinemática
ϕx	intensidade do transporte de fundo
ψ	intensidade de cisalhamento

Sumário

<i>RESUMO</i>	2
ABSTRACT	3
LISTA DE FIGURAS	4
LISTA DE TABELAS	6
LISTA DE ABREVIATURAS.....	7
LISTA DE SÍMBOLOS	8
1 Introdução.....	12
1.1 A Importância do Estudo Hidrossedimentológico.....	12
1.2 Problemas Relativos ao Transporte de Sedimentos na Bacia do Rio Claro	13
2 Objetivo.....	19
3 Revisão Bibliográfica.....	20
3.1 Fatores que Afetam o Transporte de Sedimento.....	20
3.2 Cálculo da Descarga Sólida em Suspensão	25
3.3 Cálculo da Descarga Sólida de Arrasto e do Material do Leito.....	27
3.4 Cálculo da Descarga Sólida Total.....	32
3.4.1 A Descarga Sólida Total.....	32
3.4.2 O Método Modificado de Einstein	32
3.5 Procedimentos para a Coleta de Dados.....	46
3.5.1 Introdução.....	46
3.5.2 Amostragem do Material em Suspensão	46
3.5.3 Cuidados Após a Coleta das Amostras.....	52
3.5.4 Amostragem do Material do Leito.....	53
3.6 Equipamentos de Hidrossedimentometria	55
3.6.1 Equipamentos para Descarga Sólida em Suspensão.....	55
3.6.2 O USDH-48	56

3.6.3	Amostradores Automáticos de Sedimentos em Suspensão	58
3.6.4	Equipamentos para Descarga do Material de Leito.....	62
4	Descrição da Bacia do Rio Claro	63
5	Determinação da Curva-Chave	67
5.1	Seleção do Método para Obtenção da Curva-chave do Rio Claro.....	67
5.2	Obtenção da Curva-chave do Rio Claro	70
6	Análise de Pluviosidade e Nível do Rio Claro.....	72
7	Cálculo da Descarga Sólida de Material de Leito	76
8	Cálculo da Descarga em Suspensão	82
9	Cálculo da Descarga Sólida Total	84
10	Resultados e Discussões	88
10.1	Recomendações	90
11	Conclusões.....	91
12	Referências Bibliográficas.....	92

1 Introdução

1.1 A Importância do Estudo Hidrossedimentológico

Os sedimentos são partículas sólidas originadas da degradação de rochas ou material biológico que podem ser transportadas por algum fluido. Esse trabalho foca o transporte de sedimentos por meio fluvial.

Sedimentologia é a ciência que estuda os sedimentos considerando-se os processos hidráulicos envolvidos em seu posicionamento no espaço-tempo. Esse estudo torna-se de bastante interesse da sociedade ao se perceber as diversas atividades humanas que necessitam de análises da descarga de sedimentos em cursos hídricos.

Muitas obras de engenharia necessitam de dados provenientes de estudos sedimentológicos. Entre diversos outros exemplos, pode-se mencionar o projeto de uma barragem em que se faz necessário calcular a descarga sólida de seus cursos d'água contribuintes, a fim de se determinar o tempo de assoreamento do volume morto. A sedimentologia também pode ser fundamental ao se instalar um ponto de captação para abastecimento de uma cidade, pois é importante prever a quantidade de sedimentos que será levada às estações de tratamento.

O transporte de sedimentos envolve desde os processos erosivos, fonte de material, até os processos de assoreamento nos locais de depósito do mesmo. Os processos erosivos possuem ocorrência natural provocados por agente como chuvas, ventos, tectonismo ou vulcanismo. No entanto, atualmente, percebe-se a crescente ação antrópica intensificando esse processo natural de forma drástica. Atividades como a agricultura, loteamentos, desmatamentos, entre outras vêm acelerando a erosão, o que gera alterações na morfologia terrestre.

Os sedimentos formados a partir dos processos erosivos são carregados pelos ventos e principalmente pelas chuvas para cursos d'água. O transporte dessas partículas pelas águas é dependente de diversas variáveis o que impõe dificuldades ao estudo desse deslocamento. Por fim há o depósito do material em áreas de assoreamento.

Há grande interesse econômico e sócio-ambiental em estudar a alocação das áreas de assoreamento, a degradação dos locais em erosão e a própria descarga sólida levada pelo fluxo d'água.

Nesse trabalho, é estudado o transporte de sedimento na bacia do Rio Claro, estado de São Paulo. Nesse local, as características naturais, somadas às atividades

humanas, têm gerado uma descarga de sedimentos que vem provocando alterações visíveis em regiões da bacia como áreas de erosão e assoreamentos. Além disso, o transporte de sedimentos tem interferido no abastecimento de água da região gerando diversos problemas na Estação de Tratamento de Água (ETA) de Porto Novo.

1.2 Problemas Relativos ao Transporte de Sedimentos na Bacia do Rio Claro

A Bacia do Rio Claro é uma sub-bacia do rio Juqueriquerê, localizada no litoral norte do estado de São Paulo, nos municípios de São Sebastião e Caraguatatuba. Com 419 m² de área, a bacia do rio Juqueriquerê é a maior do litoral norte, a sub-bacia do rio Claro representa 70 m² dessa área. A Figura 1 mostra a bacia do Rio Claro.

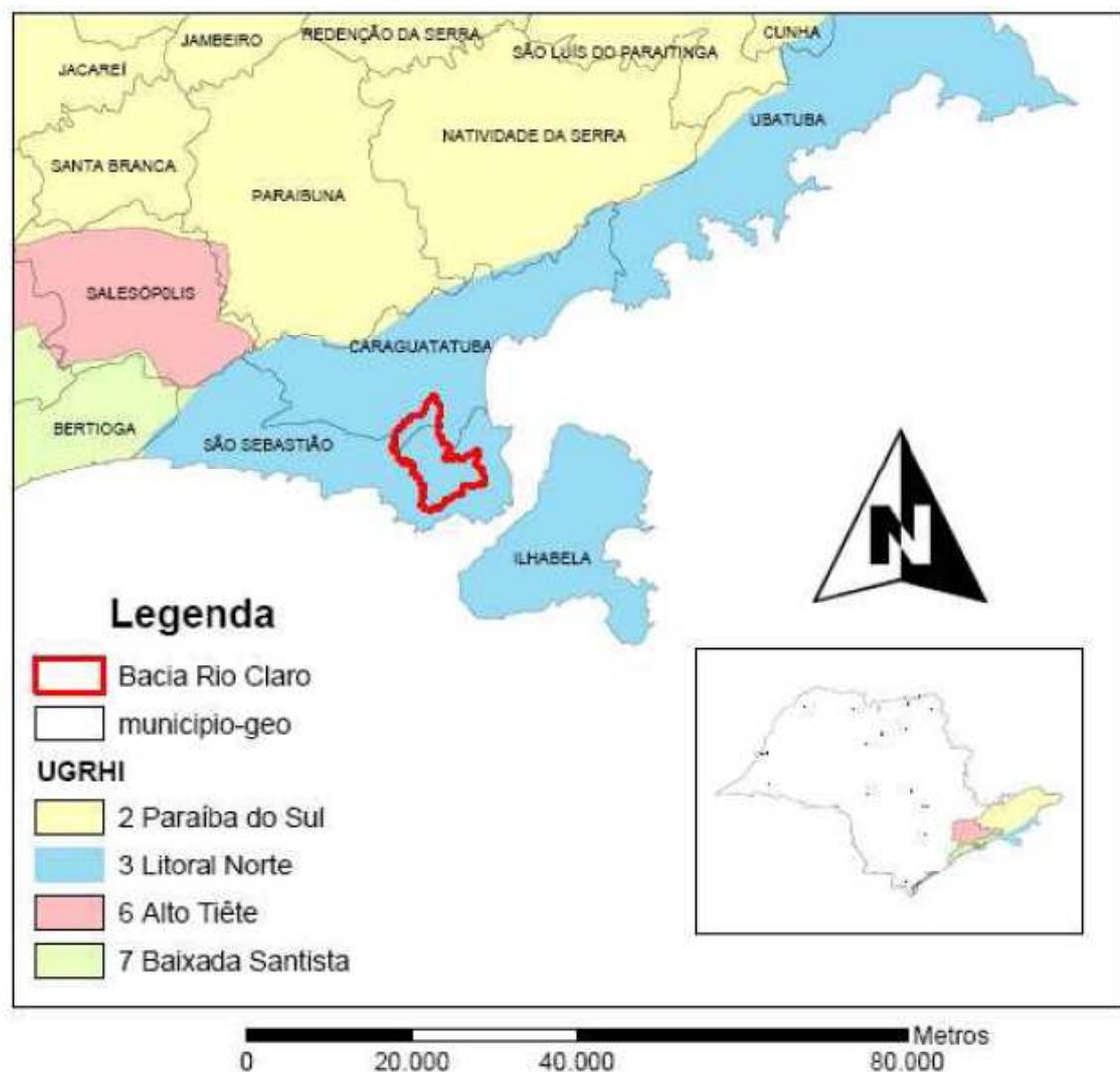


Figura 1-Localização da bacia do rio Claro. Fonte: Andrade (2009).

A região possui o relevo definido pelos contornos escarpados da Serra do Mar, localmente denominada Serra do Juqueriquerê. De acordo com a classificação proposta por Almeida (1964) a bacia do rio Claro pertence à formação geomorfológica da Serrania Costeira, região correspondente à área do litoral norte drenada diretamente para o mar.

Essa bacia hidrográfica apresenta problemas relacionados ao assoreamento. No baixo curso do rio há grande interferência antrópica e em seu médio curso há ocorrências de atividades rurais. De acordo com o relatório contendo o plano de gerenciamento dos recursos hídricos do litoral norte emitido pelo Instituto de Pesquisas Técnicas, IPT (2000), o assoreamento é causado pelo aumento do transporte de sedimentos oriundos de deslizamentos nas encostas e erosão causada por atividade humana como desmatamentos, retiradas de material para áreas de empréstimos e loteamentos.

Ao longo da bacia do rio Claro há vários pontos de erosão e locais onde esse material erodido das margens juntamente com os sedimentos trazidos pelas chuvas gera áreas de assoreamento. A Figura 2 ilustra um ponto de assoreamento e a Figura 3 um ponto de erosão na bacia do Rio Claro.



Figura 2-Bancos de assoreamento no baixo rio Claro-Fonte: Andrade (2009).



Figura 3-Erosão nas margens do rio claro. Fonte Andrade (2009).

A questão não é restrita a sub-bacia do rio Claro. O rio Juqueriquerê possui vários afluentes, dentre eles o rio Claro, e também apresenta pontos de assoreamento. O material transportado pelos rios vem depositando-se em regiões como a foz do rio Juqueriquerê gerando diversos transtornos ambientais e econômicos à população local.

Segundo o Instituto Onda Verde (<http://www.institutoondaverde.org/>), na foz do rio Juqueriquerê há implantado um pequeno porto que atende a comunidade de pescadores da região. Atualmente, devido ao assoreamento, o porto pode ser utilizado apenas no horário de pico da maré. Em momentos de maré baixa ele possui entre 20 e 30 cm de calado apenas, sendo intransitável para as embarcações dos pescadores e turistas da região. A situação gerada é apenas um dos exemplos da interferência negativa do assoreamento no cotidiano dos habitantes de Caraguatatuba e São Sebastião. A Figura 4 mostra o pequeno porto na foz do rio Juqueriquerê.

Somado a questão do assoreamento notam-se os problemas gerados pelo aumento da descarga sólida no rio Claro oriundo das áreas erodidas. O transporte de sedimentos é ainda intensificado pela geomorfologia do local. A declividade da serra aumenta a energia das águas que fluem pelo rio Claro, intensificando o transporte dos sedimentos para as áreas de assoreamento nas zonas de planícies.



Figura 4-Pequeno porto assoreado na foz do rio Juqueriquerê. Fonte: Vendrame (2010)

A questão tem provocado grandes problemas ao abastecimento das cidades do litoral norte paulista. Além da demanda flutuante ao longo do ano, chegando a quintuplicar a população dessa região litorânea no verão, ainda há a expectativa de grande aumento populacional. Segundo estudo realizado pela Cobrape (Companhia Brasileira de Projetos e Empreendimentos) (Grisotto & Phillipi, 2003) estima-se que em 2030 cerca de 390 mil pessoas vão consumir em torno de 1.300 litros de água por segundo na região na alta temporada. Atualmente, o consumo não chega a 960 litros por segundo e a população já sofre constantemente com a falta de abastecimento nos períodos de verão.

Segundo o mesmo estudo da Cobrape, o problema começa desde a captação de água bruta. A bacia do rio Claro possui dois pontos de captação: um no baixo rio Claro, onde há um canal de adução e uma lagoa desarenação e abastecimento das bombas de captação (Figura 5) e um ponto de captação no alto rio Claro (Figura 6), onde há uma pequena barragem para manutenção de nível e de onde a água vem por gravidade.



Figura 5-Captação no baixo Rio Claro. Fonte: Vendrame, (2010).



Figura 6-Captação de água no Alto Rio Claro. Fonte: Vendrame (2010)

Segundo Delquiario (2010) a poluição dos mananciais, a destruição das matas ciliares e o descaso com as políticas ambientais têm prejudicado a qualidade da água captada no sistema rio Claro. Atualmente percebem-se pioras sensíveis quanto aos padrões de cor e turbidez. Essas modificações da qualidade da água bruta captada evidenciam a necessidade de maiores cuidados com a bacia do rio Claro e de ampliações e adaptações no sistema de tratamento da concessionária local.

O problema é agravado nos períodos com elevados índices pluviométricos. Em estações chuvosas como o verão, há grande transporte de sedimento no rio Claro. O excesso de partículas carregadas pelas águas, juntamente com galhos e folhas, é captado com a água e danificam o sistema de tratamento. Para evitar a colmatção do sistema de floto-filtração empregado pela concessionária local, adota-se a alternativa de interromper a captação de água nos picos de transporte de sedimentos. A solução improvisada tem provocado falhas do abastecimento de água para milhares de moradores da região (Delquiario 2010).

O excesso de sedimentos transportados pelas águas do rio Claro tem ampliado as necessidades de alterações no tratamento de água. Os estudos realizados pela Cobrape em 2010 e entregue para a concessionária local do litoral norte paulista sugerem modificações como a implantação de uma estrutura diferenciada para receber a água bruta, com peneira de limpeza mecanizada, tanque de pré-sedimentação e câmara de mistura rápida com equipamento mecânico para a aplicação do coagulante.

A queda da qualidade da água bruta é também evidenciada no aumento das perdas na produção de água tratada. Devido à maior necessidade de lavagens dos filtros e descarga de lodo, há um desperdício de 20% da água captada enquanto essa perda costuma estar na faixa de 3 a 8 %. O relatório da Cobrape sugere a adoção de um sistema de raspagem do material flotado para diminuir a necessidade de descarga de água para lavagem do sistema.

2 Objetivo

O objetivo desse trabalho é contribuir no estabelecimento de relações numéricas entre a ocorrência de chuvas e a descarga sólida de sedimentos no rio Claro e avaliar o transporte de sedimentos nesse rio.

Para possibilitar o equacionamento da descarga sólida total em função da pluviosidade foram estabelecidas quatro etapas:

- a) Obtenção da curva que relacione nível da seção com a pluviosidade;
- b) Obtenção da curva-chave (vazão em função do nível);
- c) Obtenção da equação do transporte de material do leito em função da vazão;
- d) Obtenção do transporte de material em suspensão em função da vazão.

Esse trabalho tem por objetivo a realização dos itens b e c. Além disso, deseja-se avaliar qualitativamente a relação de nível do curso d'água com ocorrência de chuvas e calcular a descarga sólida total para os dados disponíveis.

Por fim, o trabalho busca fazer uma revisão da literatura e apresentar de forma didática informações sobre hidrossedimentologia incluindo tópicos sobre equipamentos de hidrossedimentologia, métodos de amostragem, métodos de cálculo da descarga sólida e determinação de curva-chave.

3 Revisão Bibliográfica

3.1 Fatores que Afetam o Transporte de Sedimento

O transporte de sedimentos em um fluxo líquido é dividido em três grupos (Carvalho, 1994) (R. C. V. Vieira da Silva, G Wilson-Jr, 2005) (Haans, 1993) (Graf, 1984) (Haans, 1993):

- o transporte dos sedimentos em suspensão é composto por partículas de pequena granulometria que se deslocam ao longo do curso d'água devido às componentes horizontais da velocidade do fluido enquanto as componentes verticais geradas pela turbulência do líquido mantêm as partículas em suspensão.

- o transporte de partículas em arrasto é composto por material do leito com granulometria maior que a parcela em suspensão. Essas partículas rolam ou escorregam ao longo do leito.

- o transporte de material saltitante é composto por partículas posicionadas próximas ao leito que pulam ao longo do curso d'água por efeito da correnteza ou por impacto do choques entre elas.

A descarga sólida de material do leito (partículas saltitantes e arrastadas pelo fundo) ocorre devido à ação cisalhante do escoamento na interface líquido e sólido que define o contorno do rio ou canal. Essa ação promove o desprendimento dos grãos dessa interface que posteriormente se deslocam de uma das formas descritas anteriormente.

Segundo Lane (1955) o aumento da declividade do leito e da vazão geram o aumento do diâmetro máximo das partículas transportadas, além de maior intensidade dos processos erosivos. Por outro lado, há também aumento da formação de depósitos. Fenômeno conhecido como agradação.

É comum ter-se maior degradação, ou seja, atividades erosivas na região inicial do fluxo d'água nas bacias hidrológicas. Já na foz dos rios, observam-se, em geral, formações de assoreamento, ou seja, agradação conforme pode ser observado na Figura 7.

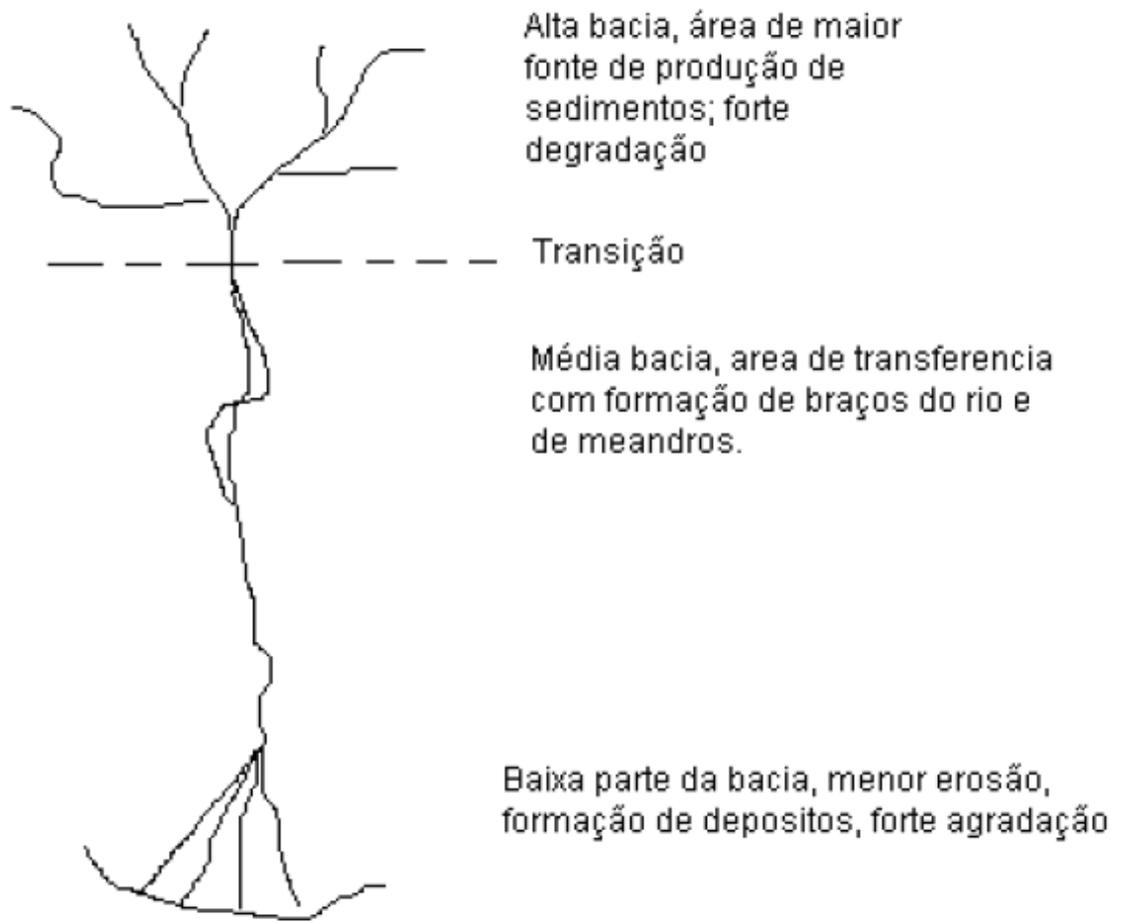


Figura 7-distribuição dos sedimentos ao longo da bacia hidrográfica (Carvalho, 2008).

Na alta bacia há gradientes de velocidade mais elevados, com isso, o fluxo d'água possui energia para carregar partículas de maiores diâmetros, havendo bastante degradação. Nessa porção do curso do rio há predominância do transporte de arraste.

Já no médio curso, há o transporte de partículas com granulometria média. Essa parte da bacia possui maior estabilidade sem grandes alterações na descarga sólida total transportada.

Por fim, tem-se a baixa bacia, nessa área as velocidades das correntes são menores. Portanto, o baixo curso do rio é uma região onde há majoritariamente transporte de partículas finas e formação de áreas de aggradação.

Essas características são válidas para rios com a declividade decrescente de montante para jusante. Esse tipo de rio apresenta perfil côncavo, em casos de rios de perfil convexo, há a inversão das características, a declividade diminui de jusante para montante e há degradação em sua foz. (Santos, 2001).

Existe distinção na distribuição dos sedimentos não apenas ao longo do curso do rio, mas também há concentrações diferentes de partículas em uma mesma seção transversal. As partículas transportadas em um curso d'água estão sujeitas a ação da velocidade horizontal do fluxo do rio, da velocidade vertical originada das turbulências das águas e da velocidade vertical obtida através da atuação de seu peso próprio. Quanto maiores as velocidades horizontais e maior compensação entre peso próprio e turbulência, mais partículas serão transportadas com a corrente (Carvalho, 2008).

Dessa forma, nas margens, local onde há menores velocidades do fluxo d'água, há também menor concentração de sedimentos. Enquanto no meio da seção há maiores velocidades e é o local com maior concentração de sedimentos. A Figura 8 ilustra a distribuição de sedimentos em uma seção transversal de um rio.

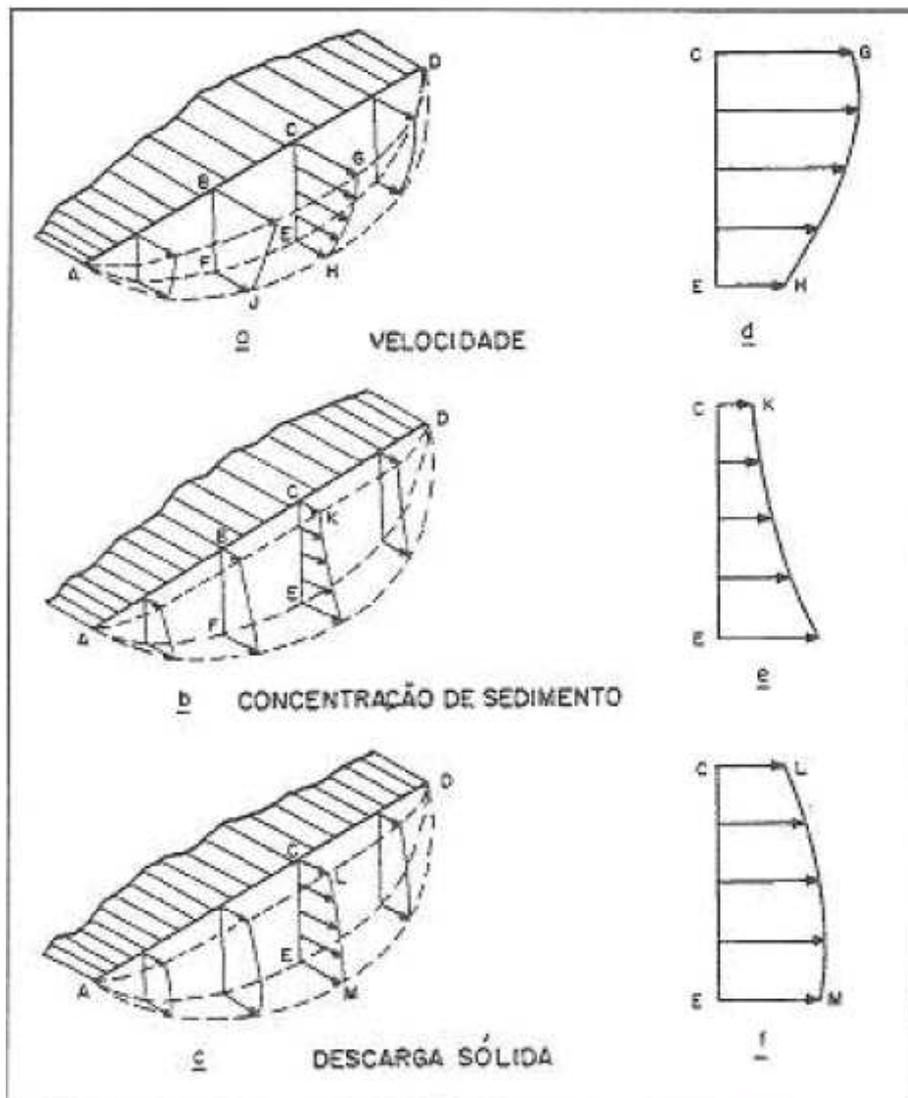


Figura 8-Diagrama da distribuição da velocidade e da concentração na seção transversal de um rio (Carvalho, 2008).

A concentração dos sedimentos também é variável de acordo com a profundidade. Partículas de maior peso próprio, em geral, as com maior granulometria, tendem a posicionarem-se em regiões mais próximas ao leito. Por outro lado, as partículas menores, como siltes e argilas, possuem uma distribuição quase uniforme ao longo da profundidade dos rios (Santos, 2001).

A Figura 9 exibe a distribuição das partículas sólidas de acordo com suas granulometrias.

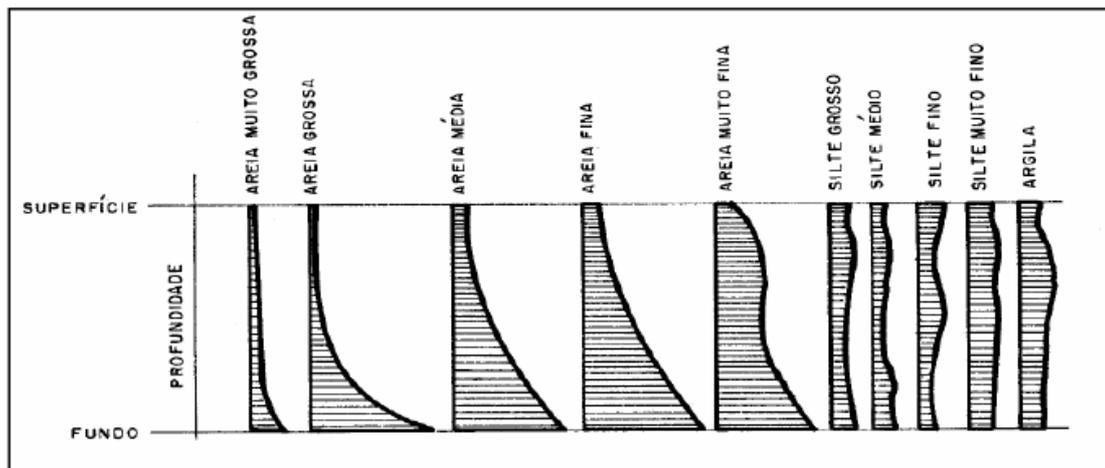


Figura 9-Distribuição de materiais diferentes ao longo da profundidade do rio (Carvalho, 1994).

Até agora foi tratado de características gerais do transporte dos sedimentos. Entretanto, para utilização das equações de transporte de sedimentos e de avaliação da estabilidade do curso d'água é necessário ter-se conhecimentos específicos das partículas sólidas transportadas.

Dessa forma, é importante a definição das propriedades das partículas sólidas individualmente e atuando em conjunto (K. G. RANGA RAJU, R. J. GARDE, 1985). Pensando-se nas partículas isoladas é comumente necessária a determinação de dimensão, forma da partícula, velocidade de sedimentação e peso específico do grão. Ao analisar os sedimentos em conjunto é importante definir a distribuição granulométrica, a porosidade o ângulo de repouso (Andrade, 2009).

Por fim, já estudadas as partículas a serem transportadas e como ocorrerá esse transporte é de interesse dos estudos sedimentológicos os processos que fornecerão a carga sólida ao curso d'água.

Nota-se que os processos erosivos são os principais fenômenos que possibilitam a existência de carga sólida disponível a ser transportada para os corpos d'água. Há quatro

tipos principais de erosão (Carvalho, 1994): a erosão fluvial, a erosão por remoção em massa, a erosão hidráulica superficial e a erosão eólica.

A erosão hídrica superficial ocorre de cinco formas distintas segundo Carvalho (1994): erosão por escoamento difuso, erosão por escoamento difuso intenso, erosão por escoamento concentrado, erosão laminar e erosão pluvial.

A pluvial é efeito do impacto das gotas de chuva na superfície, desagregando as partículas e permitindo que as mesmas sejam carregadas pelo escoamento superficial. A erosão por escoamento difuso é caracterizada pela formação de sulcos através da ação das águas que transportam o material pelos filetes formados. O tipo difuso intenso é semelhante ao escoamento difuso, porém com formação de sulcos maiores e mais extensos, dessa forma há mais transporte de sedimentos.

Dentro da erosão hidráulica superficial ainda há o tipo laminar que ocorre em chuvas intensas nas quais o solo já está saturado, portanto a água não penetra toda no solo formando o escoamento de uma lâmina d'água. Por fim há a erosão por escoamento concentrado caracterizada por deslizamentos e desabamentos em sulcos mais profundos, nesse caso pode haver formação de voçorocas.

A erosão eólica é causada pela ação dos ventos. Ela ocorre em terrenos muito secos sem coesão entre os grãos. Sua intensidade depende da velocidade dos ventos, declividade do terreno, tamanho das partículas. Vale ressaltar que esse tipo de erosão ocorre em locais sem vegetação, pois a exposição dos solos ao vento é necessária à desagregação dos grãos.

Há ainda mais dois tipos de erosão destacados por Carvalho (1994): erosão por remoção em massa como exemplificado na figura 10 e fluvial. A remoção em massa ocorre quando há a movimentação de grande volume de solo devido à ação da gravidade e saturação do solo. Já a erosão fluvial está relacionada à formação morfológica dos rios e redes de drenagem.



Figura 10-Erosão por remoção em massa na Guatemala. Fonte: Da Reuters (2010)

3.2 Cálculo da Descarga Sólida em Suspensão

A descarga sólida é composta por duas parcelas, uma oriunda do material suspenso e a outra originada do material do leito. Essa última parcela é subdividida em dois tipos de transporte de sedimento: o primeiro é associado às partículas que são transportadas por arraste e o segundo pelo material do leito saltitante. Usualmente denomina-se descarga total de material do leito o transporte de material não suspenso.

Segundo Carvalho (2008), a maior parcela da descarga sólida total é constituída pela parte em suspensão 80 a 90% e em seus cálculos espera-se um erro provável de 10% enquanto os cálculos da descarga sólida de fundo têm erro provável de 25%.

Os cálculos da descarga sólida em suspensão e do leito são feitos em separados, pois não são regidos pelas mesmas leis. Há diversas formas para calcular cada uma dessas descargas e obter a partir da soma de ambas a descarga sólida total, ou ainda métodos para obter diretamente a descarga sólida total, como o método simplificado de Colby (1957) ou o método modificado de Einstein.

O cálculo da descarga sólida em suspensão é função principalmente da velocidade, posição da seção, tipo de escoamento, profundidade e granulometria, segundo CARVALHO (2008). Ele pode ser efetuado baseado em dados obtidos por medições diretas (turbidímetros, equipamento nuclear ou outro) ou por indiretas com amostragem do material. Nesse trabalho é utilizada a medição indireta efetuada a partir das amostras coletadas com o uso do equipamento US DH-48.

Para efetuar um cálculo da descarga sólida em suspensão na amostragem pontual devem-se obter os seguintes dados de campo: velocidade da corrente no ponto de amostragem (v), concentração de sedimentos no ponto (c), profundidade de influência do ponto considerado (Δp) que representa a distância compreendida entre os dois pontos médios da profundidade do ponto amostrado e os pontos vizinhos na mesma vertical e (l) a largura parcial de influência representada pela distância entre os dois pontos médios da posição da vertical em análise e as vizinhas.

A descarga sólida em suspensão parcial (q_{ss}), na vertical considerada é dada por:

$$q_{ss} = \sum c.v.\Delta p.l \quad (1)$$

E a descarga sólida em suspensão Q_{ss} na seção transversal é dada por:

$$Q_{ss} = \sum q_{ss} \quad (2)$$

Carvalho (2008) indica a utilização do cálculo gráfico para a determinação da descarga sólida em suspensão, pois esse processo contorna o problema da região não amostrada. Para a realização do procedimento, primeiramente analisa-se cada vertical de coleta de dados em separado produzindo a Figura 11:

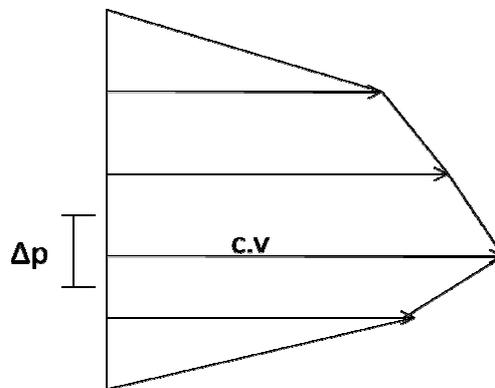


Figura 11-Gráfico da descarga sólida em suspensão para uma vertical.

No gráfico da Figura 11, os vetores perpendiculares à vertical de coleta de dados representam os valores da multiplicação da concentração pela velocidade de escoamento nos pontos de amostra. A área do gráfico gerado corresponde à $\sum c.v.\Delta p$.

Após análise de cada vertical de coleta de dados, os valores das áreas do gráfico da Figura 11 são plotados em um novo gráfico correspondente à seção transversal. A

área do gráfico da Figura 12 representa a descarga sólida em suspensão na seção transversal amostrada.

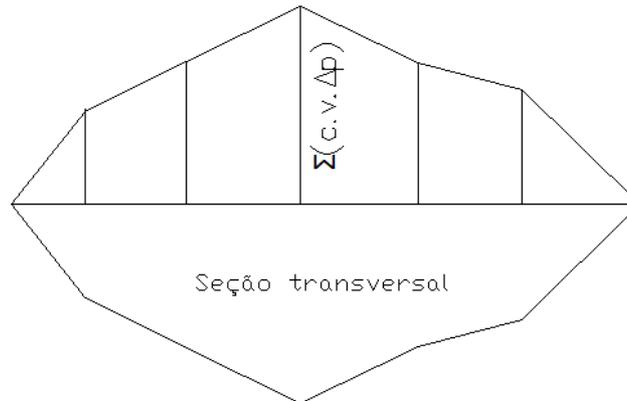


Figura 12-Gráfico para cálculo da descarga sólida em suspensão na seção transversal amostrada.

O equipamento US DH-48 não coleta amostras pontuais e sim por integração em cada vertical. Dessa forma, a descarga sólida em suspensão será dada pela equação :

$$Q_{ss} = \Sigma q_{ss} = \Sigma q \cdot C_{mv} \cdot l \quad (1)$$

Onde C_{mv} representa a concentração média na vertical amostrada, l é a largura de influência e q é a descarga líquida parcial no segmento. O processo gráfico pode ser usado analogamente, sendo os vetores do gráfico da Figura 11 igual ao produto $c_v \cdot v$.

Carvalho (2008) indica a utilização do método IIL e IID (explicados no tópico que trata sobre métodos de amostragens a seguir) para coleta de amostras, dessa forma tem-se o cálculo da descarga sólida em suspensão na seção transversal pode ser dado pela equação 4:

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

Onde Q é a descarga líquida na seção e C é a concentração média na seção.

Outra opção para a obtenção da concentração de sedimentos em um corpo d'água é através do uso de sensoriamento remoto. Porém ele é adequado apenas para concentrações acima de 50 ppm e em rios com 500 m ou mais de largura, logo não se aplica essa técnica ao rio Claro (Carvalho, 2008).

3.3 Cálculo da Descarga Sólida de Arrasto e do Material do Leito

Em geral a descarga s3lida de arrasto representa uma pequena parcela da descarga s3lida total em um corpo d'3gua. No entanto em rios largos e rasos com sedimentos aluvionar ela pode igualar ou at3 superar a descarga s3lida de material em suspens3o (Carvalho, 2008).

A descarga s3lida de material do leito 3 composta n3o apenas pela descarga de arrasto, mas tamb3m pelo transporte de material do leito em suspens3o nas proximidades do fundo do corpo d'3gua. O c3lculo da descarga de leito 3 fundamental para estudos da navegabilidade de canais e avalia3o de assoreamento em reservat3rios. Essa descarga pode ser considerada equivalente 3 descarga s3lida total exclu3da a descarga de material fino.

As descargas de arrasto e de material de leito podem ser obtidas por meio de m3todos diretos atrav3s de medi3o direta ou podem ser obtidas atrav3s de f3rmulas ou metodologias utilizadas sobre os dados de medi33es indiretas. Ambos os processos apresentam grande dispers3o de resultados devido 3 diversidade de vari3veis envolvidas no transporte desse material, por isso a import3ncia da aplica3o de mais de um m3todo e compara3o dos resultados (Carvalho 2008).

A medi3o direta 3 realizada atrav3s da utiliza3o de equipamentos como cesta ou caixa, bandeja ou tanque, ou de equipamento diferen3a de press3o. O utens3lio escolhido 3 aplicado em uma quantidade de pontos (de 5 a 15) no leito da se3o transversal. O material recolhido 3 levado ao laborat3rio onde ser3o determinados o peso seco e a granulometria.

A descarga s3lida do material de leito no processo por integra3o de medi3o direta 3 dada pela equa3o 5:

$$Q_{sa} = L q_{sa} = L \frac{1}{E_{am}} \cdot \frac{p}{n \cdot t} = \frac{pL}{E_{am} \cdot n \cdot t} \text{ kg} \cdot \text{min}^{-1} \quad (3)$$

Q_{sa} 3 a descarga s3lida do leito na se3o transversal $\text{kg} \cdot \text{min}^{-1}$

q_{sa} 3 a descarga s3lida unit3ria do leito em $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$

L 3 a largura da se3o transversal em m

E_{am} 3 a efici3ncia de amostragem do equipamento

p 3 o peso seco da amostra total em kg

n 3 o n3mero de pontos da amostrados

t 3 o tempo de amostragem em min

l_b é a largura da boca do amostrador em m

O cálculo de descarga sólida por meio de medições diretas pode ser realizado também pelo processo de múltiplas amostras. Nesse caso é possível realizar um procedimento gráfico análogo à Figura 12 para obter mais precisão, minimizando o efeito das zonas não amostradas.

O cálculo da descarga sólida por meio de métodos indiretos é realizado através do uso de fórmulas desenvolvidas a partir de fundamentos teóricos e práticos. Essas fórmulas são aplicadas em dados como granulometria, características do curso d'água, entre outras informações obtidos do corpo d'água em estudo. Silva e Wilson Jr (2005) dividiram essas fórmulas em três categorias. A primeira são as fórmulas baseadas nas condições críticas de arrasto, a segunda baseada na energia de escoamento e a terceira na natureza probabilística do transporte por arrasto.

Grande parte dos métodos é desenvolvida utilizando experimentos restritos, por isso há dificuldades de generalização dos procedimentos criados. De acordo com Cunha (1968) muitas fórmulas foram propostas, mas nenhuma inteiramente satisfatória e aplicável a uma extensa gama de circunstâncias.

Os métodos mais famosos para a determinação da descarga sólida do material do leito são: Einstein, de Bagnold, de Toffaleti, de Yang, de Ackers & White, de Engelung & Hansen e de Laursen (Silva & Wilson Jr, 2005).

De acordo com Steven & Yang (1989) apresentam maior confiabilidade as fórmulas de Schoklitsch (1934) e Meyer-Peter & Muller, baseadas no movimento da carga sólida do leito (carga de arrasto) e as de Yang (1973) para areias, a de Ackers & White (1973), Engelung & Hansen (1967) e a de Yang (1984) para material grosso, baseadas nas propriedades de material de leito.

Yang (1988) identificou que havia três abordagens básicas executada no desenvolvimento das fórmulas. Um grupo de fórmulas foi desenvolvido a partir de um tratamento determinístico, assim admite-se uma correlação entre variáveis dependentes e independentes resultando em fórmulas simples.

Outro grupo possui uma abordagem probabilística realizando previsões do movimento da partícula. Por fim tem-se também um gama de fórmulas desenvolvidas através de análises de regressão. Esse último grupo é baseado em relações empíricas entre valores da descarga e parâmetros do escoamento e dos sedimentos, dessa forma possui aplicação restrita aos casos com características muito semelhantes ao estudado no desenvolvimento da fórmula.

A Tabela 1 foi retirada da obra de Carvalho (2008) e trás um resumo das principais fórmulas para cálculo da descarga sólida de arrasto e do material do leito. Dentre elas há cinco baseadas no movimento da carga do leito e oito baseadas nas propriedades do material do leito.

Tabela 1-Resumo das principais fórmulas para cálculo da descarga de arrasto e de material de leito.(Carvalho, 2008)

Autor da fórmula	Data	Carga do leito (B) ou material do leito (BM)	Tipo de fórmula (1)	Tipo de sedimento (2)	Granulometria (3)
Ackers & White (*)	1973	BM	D	S	S,G
Colby (para material de leito)	1964	BM	D	S	S
Einstein (carga do leito)	1950	B	P	M	S,G
Einstein (material do leito)	1950	BM	P	M	S
Engelund & Hansen (*)	1967	BM	D	S	S
Kalinske	1947	B	D	M	S
Laursen	1958	BM	D	M	S
Meyer-Peter & Muller (*)	1948	B	D	S	S,G
Rottner	1959	B	D	S	S
Schoklitsch (*)	1934	B	D	M	S,G
Toffaleti	1968	BM	D	M	S
Yang (areia) (*)	1973	BM	D	O	S
Yang (pedregulho) (*)	1984	BM	D	O	G

(*) Consideradas de maior confiança por Stevens & Yang (1989);

(1) Determinística (D) ou probabilística (P);

(2) Fração granulométrica (S), composição ou mistura (M), ou opcional (O);

(3) Areia (S) ou pedregulho (G).

A importante escolha da fórmula é uma etapa importante do cálculo da descarga sólida de arrasto ou de material de leito. Stevens & Yang (1989) propuseram regras para determinar a fórmula mais adequada ao rio em estudo.

Primeiramente devem-se determinar os tipos de dados que podem ser obtidos conforme o tempo, recursos e equipamentos disponíveis. Em seguida, estudam-se as experiências e os tipos de dados utilizados no desenvolvimento das fórmulas, buscando aquelas compatíveis aos dados disponibilizados do rio em estudo.

Após restringir o número de fórmulas de possível utilização devido às limitações de campo, deve-se calcular o valor por todas que restaram para comparar os resultados obtidos. Por fim, decide-se qual a fórmula a ser usada no estudo comparando o resultado de cada uma delas com os valores de descarga sólida medida e assim utilizar a escolhida nas condições de descarga sem medição.

Segundo Carvalho (2008) tem-se as seguintes recomendações para escolha de fórmula no caso de ausência de medições diretas.

- A fórmula de Meyer-Peter & Muller é usada quando o material do leito é mais grosso que 0,4 mm.
- A fórmula de Einstein para os casos em que a descarga de arrasto é uma parte significativa da descarga sólida total.
- A fórmula de Toffaleti é adequada para grandes rios com leito de areia
- A fórmula de Colby (1964) é usada para rios com profundidades menores que 10 ft (≈ 3 m) e material do leito com diâmetro médio menor que 0,8 mm.
- A fórmula de Yang, de areias, é usada em rios com leito de areia
- A fórmula de Yang, de pedregulhos, é usada em casos nos quais a maior parte do material do leito tem granulometria de 2 a 10 mm.
- As fórmulas de Ackers & White e de Engelund & Hansen são para rios com leito de areias e escoamento subcrítico.
- A fórmula de Laursen é para rios rasos com areia fina ou silte mais grosso.

Nesse trabalho foi utilizado o método de yang para areias para o cálculo de descarga do material de leito no rio Claro devido às características do rio Claro. O método é explicado no item 7 desse trabalho.

Caso seja necessária a criação de uma curva-chave deve-se plotar dados de descarga sólida ou concentração contra descarga líquida, velocidade, declividade, profundidade, força de cisalhamento, potência da corrente ou potência unitária da corrente.

Além da utilização de fórmulas, é possível obter a descarga sólida de arrasto pelo método do traçador radioativo, usado em rios de fundo de areia com superfície plana, ou pelo método das dunas também utilizado em rios de fundo de areia.

3.4 Cálculo da Descarga Sólida Total

3.4.1 A Descarga Sólida Total

A determinação da descarga sólida total é de grande importância na maioria dos estudos sedimentológicos. Ela pode ser medida de forma direta ou indireta.

A medição direta com a utilização da calha de turbulência possui cálculos análogos aos referentes à determinação da descarga de material suspenso, pois a calha possibilita que todos os sedimentos transportados entrem em suspensão.

A medição indireta pode ser realizada de quatro maneiras distintas. Uma delas considera a descarga sólida total igual à soma do material de arrasto com a descarga em suspensão e com uma parcela relativa ao material não amostrado. Outra forma é considerá-la a soma do material fino com material de leito. Também é possível obter a descarga total através da medição do volume assoreado em reservatórios.

Por fim, tem-se a determinação da descarga sólida total através do método modificado de Einstein desenvolvido em 1955 por B.R. Colby e C. H. Hembree. Esse método sofreu diversas adaptações. Nesse trabalho é utilizada uma versão modificada por Carvalho (1984) e também por Otto Pfafstetter para possibilitar a realização das contas com gráficos e expressões no sistema métrico.

De acordo com o USBR (1955) o método de Einstein modificado possui a maior precisão para o cálculo do transporte sólido, por isso é a forma mais utilizada nos EUA para o cálculo da descarga sólida total.

3.4.2 O Método Modificado de Einstein

O método modificado de Einstein foi desenvolvido em 1955 por B.R. Colby, do U.S. Geological Survey e por C.H.Hembree, do U.S. Bureau of Reclamation determina a descarga sólida total por faixas granulométricas. O processo desenvolvido no USGS e USBR é uma modificação do The Bed-Load Function for Sediment Transportation in open Channel Flows, de Hans Albert Einstein, publicado pelo “Soil Conservation Service, U.S. Departmente of Agriculture”, 1950. A metodologia foi criada a partir de

resultados de pesquisas em rios aluvionais largos e rasos no Estado de Nebraska, EUA. Esse método sofreu inúmeras melhorias e adaptações posteriormente.

Segundo Beling, Paiva & Scapin (2007) em artigo publicado pela ABRH (Associação Brasileira de Recursos Hídricos), o método de Einstein possui baixa disparidade entre os valores de descarga de sólidos medidos e os calculados. Essa constatação foi fruto de uma pesquisa realizada em um córrego urbano da cidade de Santa Maria RS.

No estudo de Beling, Paiva & Scapin (2007), foram testados os seguintes métodos: Meyer Peter & Müller (1948), Einstein (1950), Einstein Modificado por Colby e Hembree (1955), Colby (1957), Engelund e Hansen (1967), Yang (1973), Ackers e White (1973), Van Rijn (1984), Karim (1998) e Cheng (2002). Foram realizadas treze medições de descargas líquidas e sólidas, realizadas durante eventos chuvosos, no período entre Dezembro de 2003 e Novembro de 2004.

Para avaliar a qualidade dos resultados utilizou-se a relação entre os valores calculados e medidos e o índice de dispersão proposto por Aguirre et al. (2004), que estabelece um valor máximo de 10 como critério de aceitação. O método modificado de Einstein obteve o melhor resultado na relação entre a descarga calculada e a descarga medida, a razão foi de 1,01 com índice de dispersão de 0,14.

Nesse trabalho é utilizada a versão do método modificado de Einstein adaptado para o sistema métrico por Otto Pfafstetter, do Departamento Nacional de Obras de Saneamento, órgão extinto. Além disso, tem-se a utilização dos gráficos; viscosidade cinemática X temperatura da água, fatores de cálculo de Z' x temperatura da água e a relação entre descarga em suspensão e descarga de fundo x expoente de Z' , já adaptados para o sistema métrico por Carvalho (1984).

Como dados de entrada são necessários:

Q, descarga líquida

L, largura

V, velocidade média

p, profundidade média

ps, média das profundidades nas verticais de amostragem

A, área da seção transversal

T, temperatura da água

Amostras de mistura água-sedimento

Amostras do material de fundo

Em muitos casos pode-se considerar $p=ps$ quando esses valores forem muito próximos. Isso ocorre quando as verticais de amostragem sólida são as mesmas das verticais de descarga líquida essa consideração de igualdade é válida.

As amostras e dados obtidos em campo devem ser levados ao laboratório para obtenção das seguintes informações:

C, Concentração média do sedimento e suspensão em mg/L

Distribuição granulométrica das amostras de sedimentos em suspensão

Qsm, Descarga medida de sedimento em suspensão transportado em , t/d

Sendo que:

$$Q_{sm}=0,0864.Q.C$$

A distribuição granulométrica do material sólido em suspensão não é usada segundo a classificação ABNT (Associação Brasileira de Normas técnicas) e sim segundo a classificação AGU utilizada no método original. De forma semelhante é determinada a distribuição granulométrica do material de fundo. No entanto, para o material do leito é necessário maior refinamento das faixas de granulometria.

Para a aplicação do método é necessário determinar o D_{65} e o D_{35} , esses são respectivamente os diâmetros, em metro, que correspondem a 65% e 35% de partículas menores.

3.4.2.1 Cálculos

Primeiramente deve-se determinar R.S a partir da equação 6. Para aplicar essa equação há a necessidade de arbitrar valores de x segundo a variação da Figura 13.

$$\sqrt{RS} = \frac{V}{18,01 \cdot \log \left[\frac{12,27 \cdot (x) \cdot (p)}{D_{65}} \right]} = \frac{V}{7,822 \cdot \ln \left[\frac{12,27 \cdot (x) \cdot (p)}{D_{65}} \right]}$$

(4)

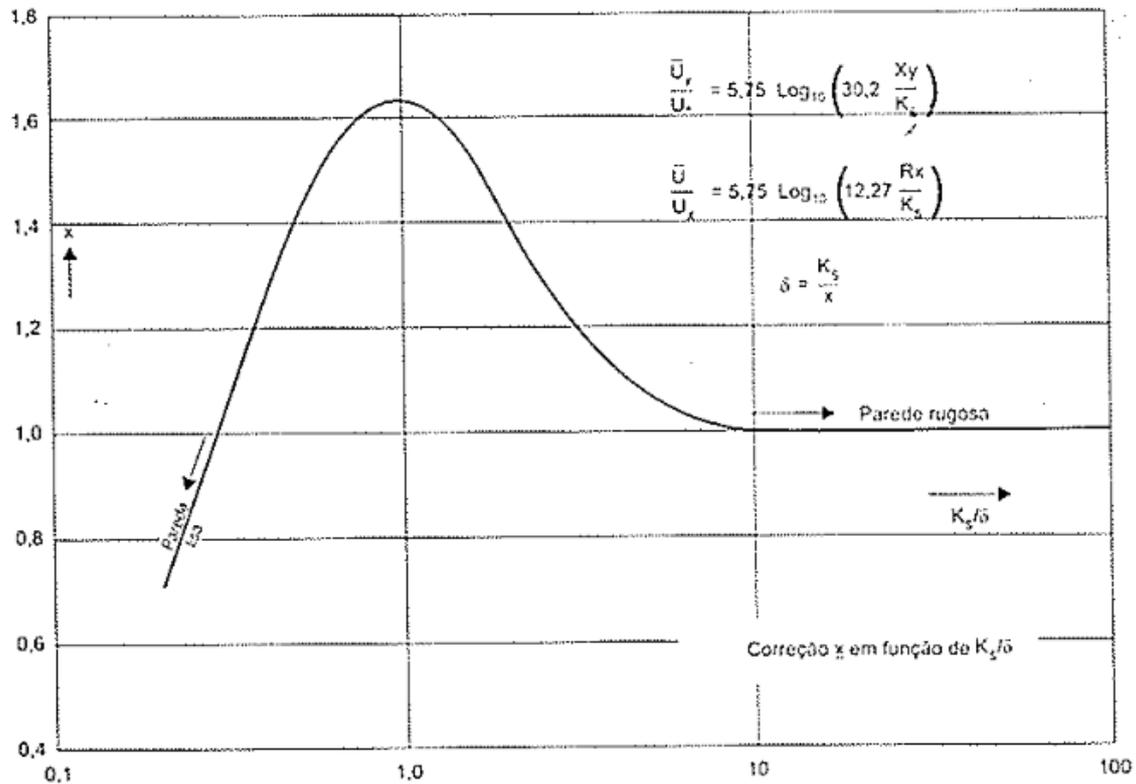


Figura 13-Valores de x em função de Ks (D65) (USBR, 1955).

A verificação do valor x arbitrado é feita através da Figura 13 e das equações 6, 7, 8 e 9. Tem-se um valor de R.S aceitável quando x satisfaz a todas essas equações e ao gráfico.

$$u'_x = \sqrt{R.S. \cdot g} \quad (5)$$

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

$$x = f\left(\frac{D_{65}}{\delta}\right) \quad (7)$$

Sendo:

u'_x = velocidade de cisalhamento

g = aceleração da gravidade

δ = espessura da camada laminar

ν = viscosidade cinemática

Após calculado o R.S deve-se determinar o valor P, dado pela equação 10:

$$P = 2,303 \cdot \log \left[\frac{30,2 \cdot (x) \cdot (p)}{D_{65}} \right] = \text{Ln} \left[\frac{30,2 \cdot (x) \cdot (p)}{D_{65}} \right] \quad (8)$$

A partir do cálculo de P e com o auxílio da Figura 14 é possível determinar A' e assim determinar a descarga em suspensão na zona amostrada. Da Figura 14 obtém-se a fração da profundidade não-amostrada, esse valor multiplicado por Q_{sm} resulta na descarga de sedimentos em suspensão através da zona amostrada $Q's$.

$$A' = \frac{p_n}{p_s} \quad (9)$$

Onde:

A' = fração de profundidade não amostrada

p_n = é a distância, em metros, vertical não amostrada, essa distância depende do amostrador utilizado

p_s = é a profundidade média da seção nas verticais amostradas

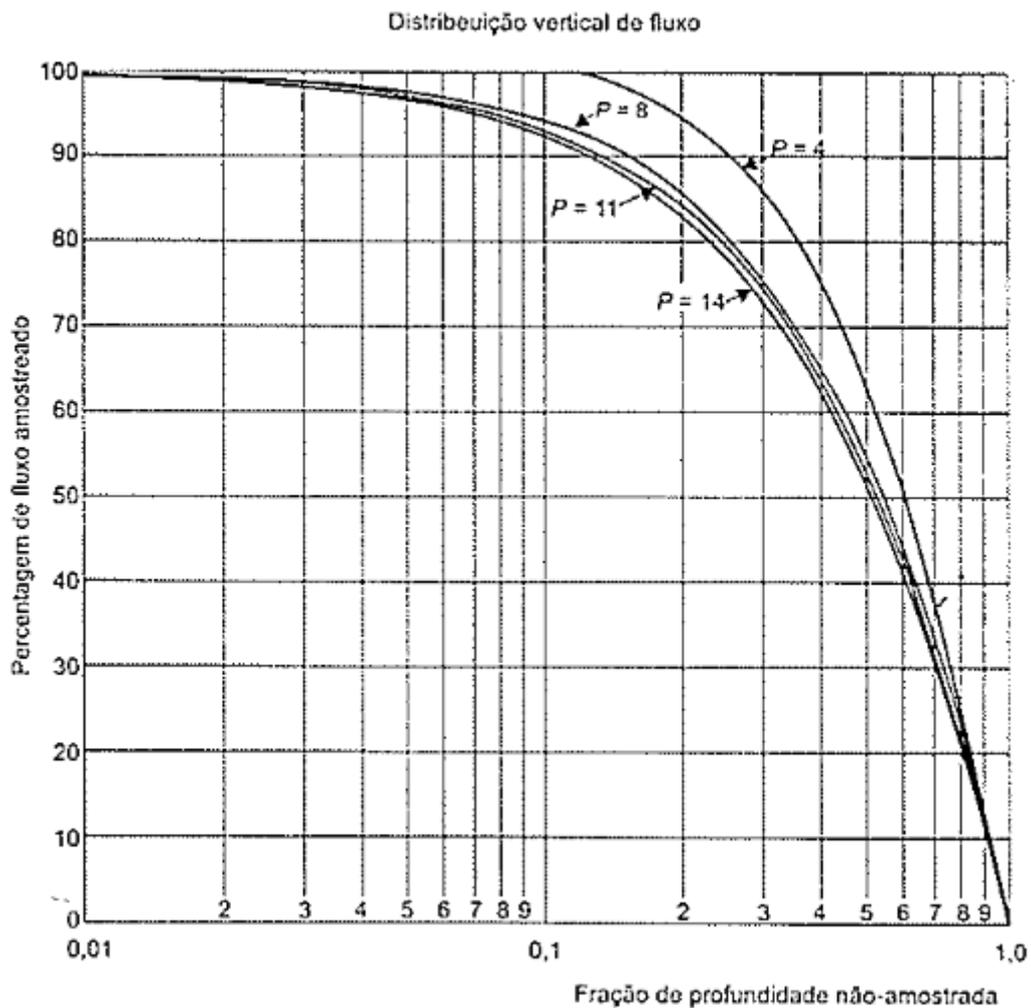


Figura 14-Gráfico de determinação da porcentagem de fluxo amostrado A' (USBR, 1955).

Na sequência do método modificado de Einstein é calculada a descarga sólida de arrasto. A descarga sólida de arrasto é dada por $i_f Q_f$, onde i_f é a fração granulométrica de

diâmetro f e Q_f é a descarga de fundo. Dessa forma, note que a descarga de arrasto é dada para cada classe granulométrica.

Deve-se determinar o valor da intensidade de cisalhamento ψ , que é dado pelo maior valor dentre os obtido pelas equações 12 e 13.

$$\Psi = \frac{1,65.D_{35}}{R.S} \quad (10)$$

$$\Psi = \frac{0,66.D}{R.S} \quad (11)$$

Onde D é a média geométrica das partículas. Assim determina-se ψ para cada classe granulométrica na qual ocorre transporte de fundo.

Após determinação de ψ deve-se calcular o valor da intensidade do transporte de fundo ϕ_x . Esse valor é obtido através da Figura 15, uma vez que já está determinado o valor de ϕ_x .

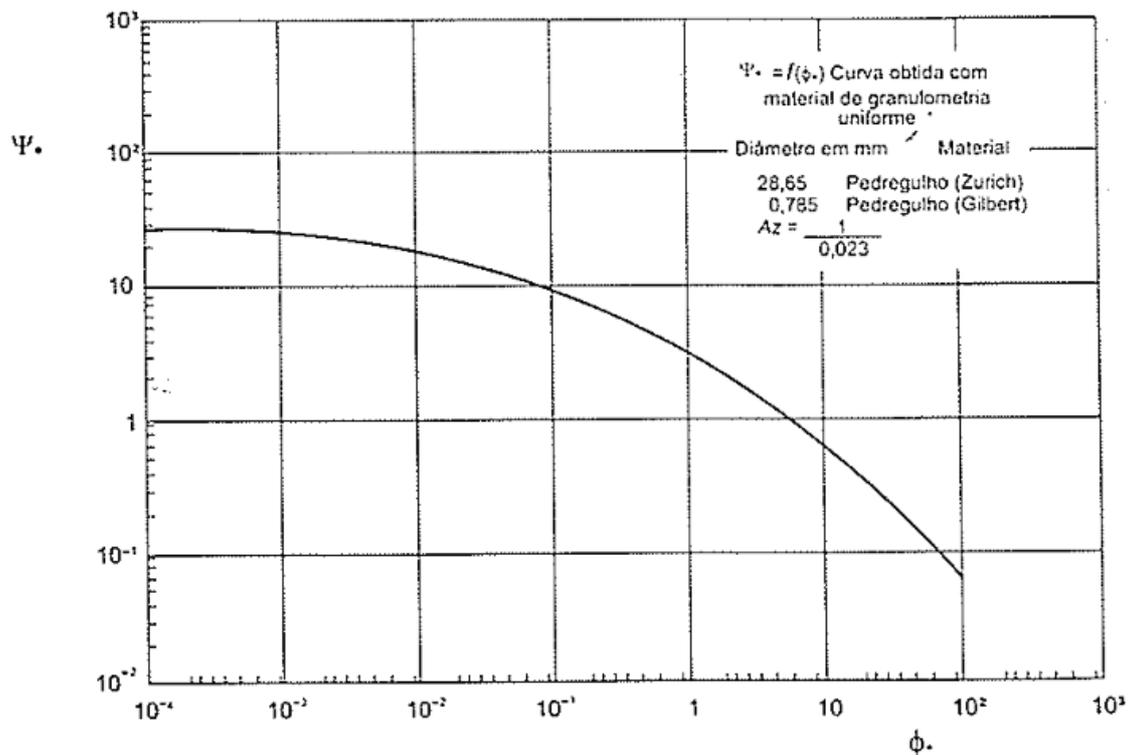


Figura 15-Gráfico de obtenção de ϕ_x em função de ψ (USBR,1955).

Dessa forma pode-se calcular o valor de $i_f Q_f$ dado utilizando-se a equação 14 e a equação 15.

$$i_f q_f = 5,33.D^{\frac{3}{2}}.i_f.\Phi_x \quad (12)$$

$$i_f Q_f = i_f q_f .86400.L \quad (13)$$

O valor da descarga de fundo é igual à soma dos $i_f Q_f$ de todas as faixas granulométricas.

A última etapa é o cálculo da descarga total de sedimentos. Para esse cálculo deve-se determinar Z' , que é o expoente da distribuição vertical de sedimentos. Z' é uma correção do valor de Z que é dado por:

$$Z = \frac{w_x}{0,4 \cdot u_x'} \quad (14)$$

Essa correção é necessária para levar-se em conta fatores que distorcem a distribuição de sedimentos na vertical como forma irregular do sedimento, turbulência da correnteza etc.

Para obtenção de Z' é preciso determinar os valores de A'' .

$$A'' = 2 \cdot \frac{D}{p} \quad (15)$$

Devem-se obter também os multiplicadores obtidos da Figura 16 em função da temperatura para cada intervalo granulométrico. Para o intervalo entre 0,125 e 0,25 tem-se fator igual a 1,00. Na Figura 16 utilizam-se as velocidades de queda.

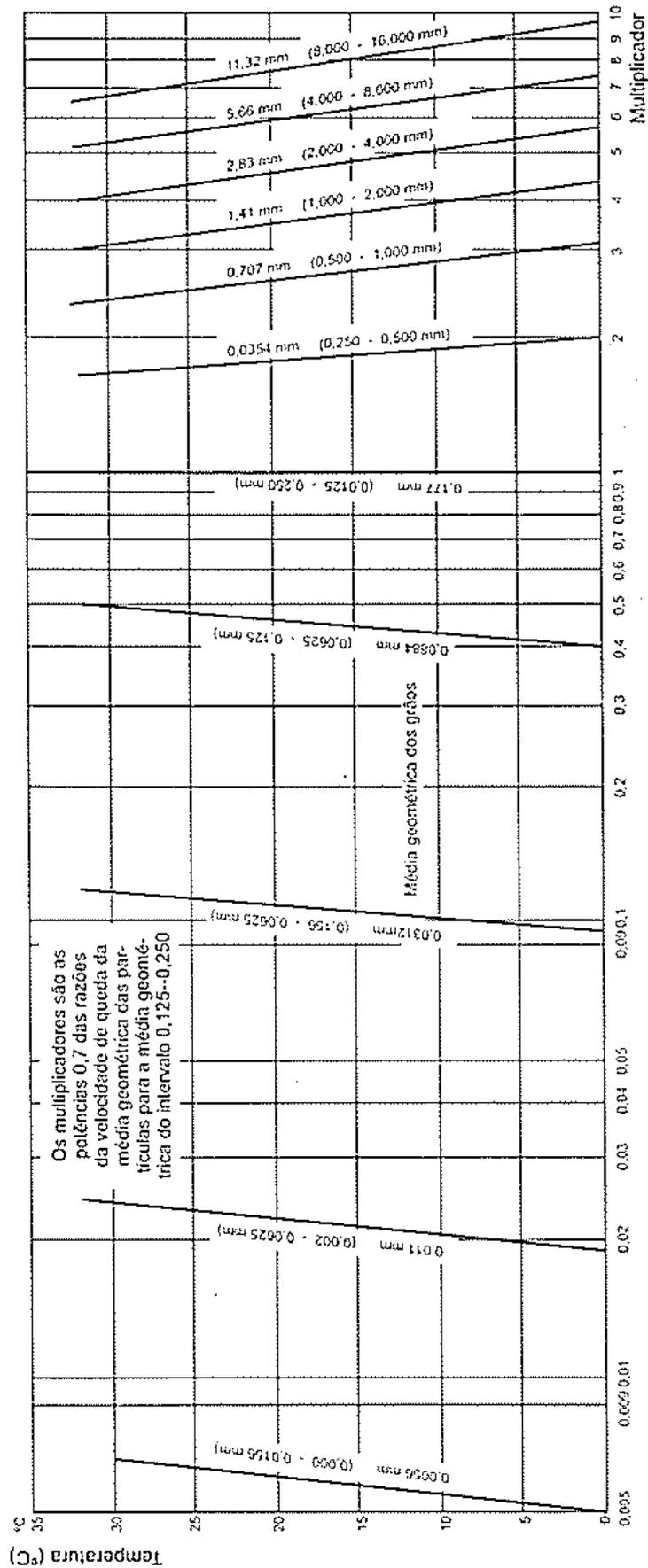


Figura 16-Multiplicadores para o cálculo dos Z's para cada granulometria a partir do Z de referência (USBR, 1955).

Para aplicação do método escolhe-se um diâmetro de referência, essa escolha é baseada no diâmetro com maior fração da amostra. Assim, por aproximações sucessivas determina-se Z' para esse diâmetro de referência. Os demais Z' 's são obtidos utilizando-se as velocidades de queda determinadas anteriormente para cada fração granulométrica.

O cálculo de Z' é feito por aproximações sucessivas para o diâmetro de referência escolhido utilizando-se a equação 18.

$$\frac{Q'_s}{i_f Q_f} = \frac{I'_1}{J_1} (P \cdot J'_1 + J'_2) \quad (16)$$

A Figura 17, traçada para a granulometria de referência 0,177, fornece o valor de Z' em função de $\frac{Q'_s}{i_f Q_f}$ dado o valor de p' obtido pela equação 19:

$$p' = p \cdot \frac{0,000177}{D_1} \quad (17)$$

Onde D_1 é o valor do diâmetro dominante selecionado.

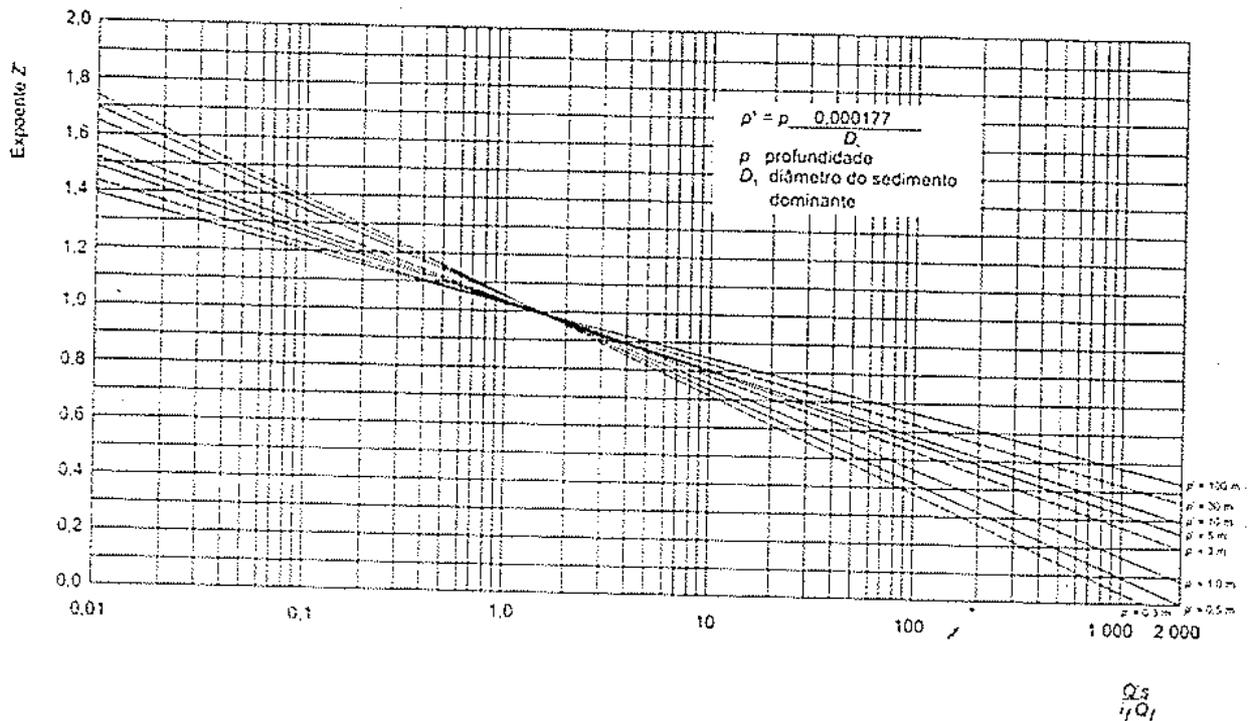


Figura 17-Relação aproximada de Z' para a razão da descarga sólida em suspensão na zona amostrada para a descarga sólida de arrasto (Colby & Hubbell, 1961, Simons & Senturk, 1977)

De acordo com (Carvalho, 2008) com o valor de Z' e A'' obtém-se I''_1 e J''_1 da Figura 18, Figura 19, e com Z' e A' obtém-se J'_1 e $-J'_2$ das Figura 19 e da Figura 20.

Ao usar as curvas “J”, deve-se notar que “J₂” é sempre negativo. A Figura 19 aplica-se à dupla finalidade de determinar J”₁ e J’₁.

Com a substituição dos valores de I”₁, J”₁, J’₁ e -J’₂ na equação antecedente, pode-se encontrar um valor diferente, antes calculado, para a igualdade. A inclinação da linha de Z’ para o p’ correspondente indicará novos valores de Z’ que serão arbitrados, calculando-se novamente o segundo membro da equação e, assim sucessivamente, até que haja a igualdade necessária. O valor de Z’ varia principalmente em função de I”₁, que tem maior peso na expressão.

Com A’, A” e Z’ determinados pode-se obter os valores de I e J através da Figura 18 e da Figura 21.

Por fim a descarga total de sólidos é dada pela expressão 21 para as classes granulométricas menores e pela expressão 20 para as classes granulométricas maiores.

$$Q_s \left(\frac{P.J_1'' + J_2''}{P.J_1' + J_2'} \right) \quad (18)$$

$$i_f Q_f (P.I_1'' + I_2'' + 1) \quad (19)$$

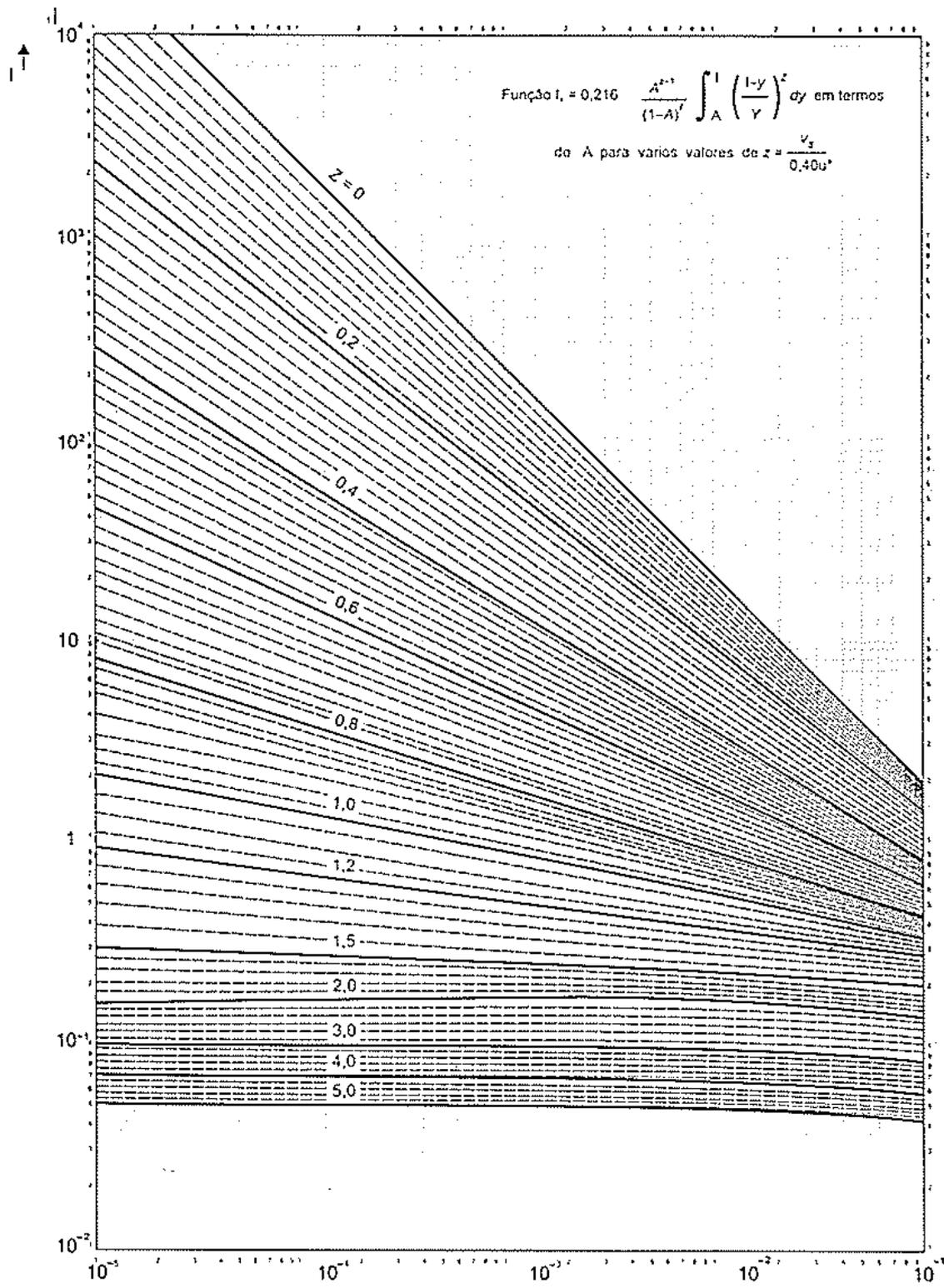


Figura 18-Expressão de I' (USBR, 1955, Colby e Hubbell, 1961).

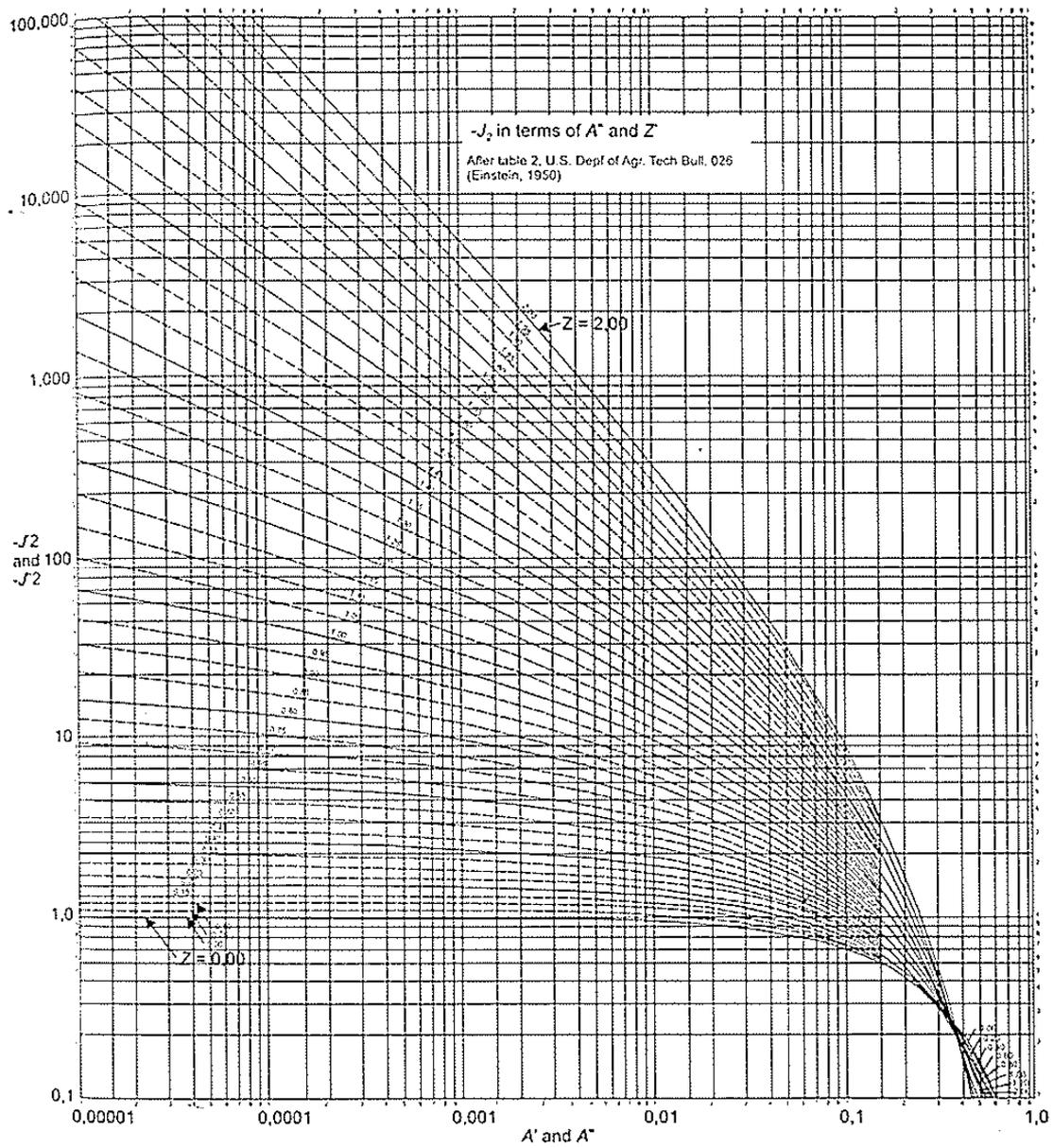


Figura 20- Expressão de $-J_2$ (USBR, 1955, Colby & Hubbell, 1961).

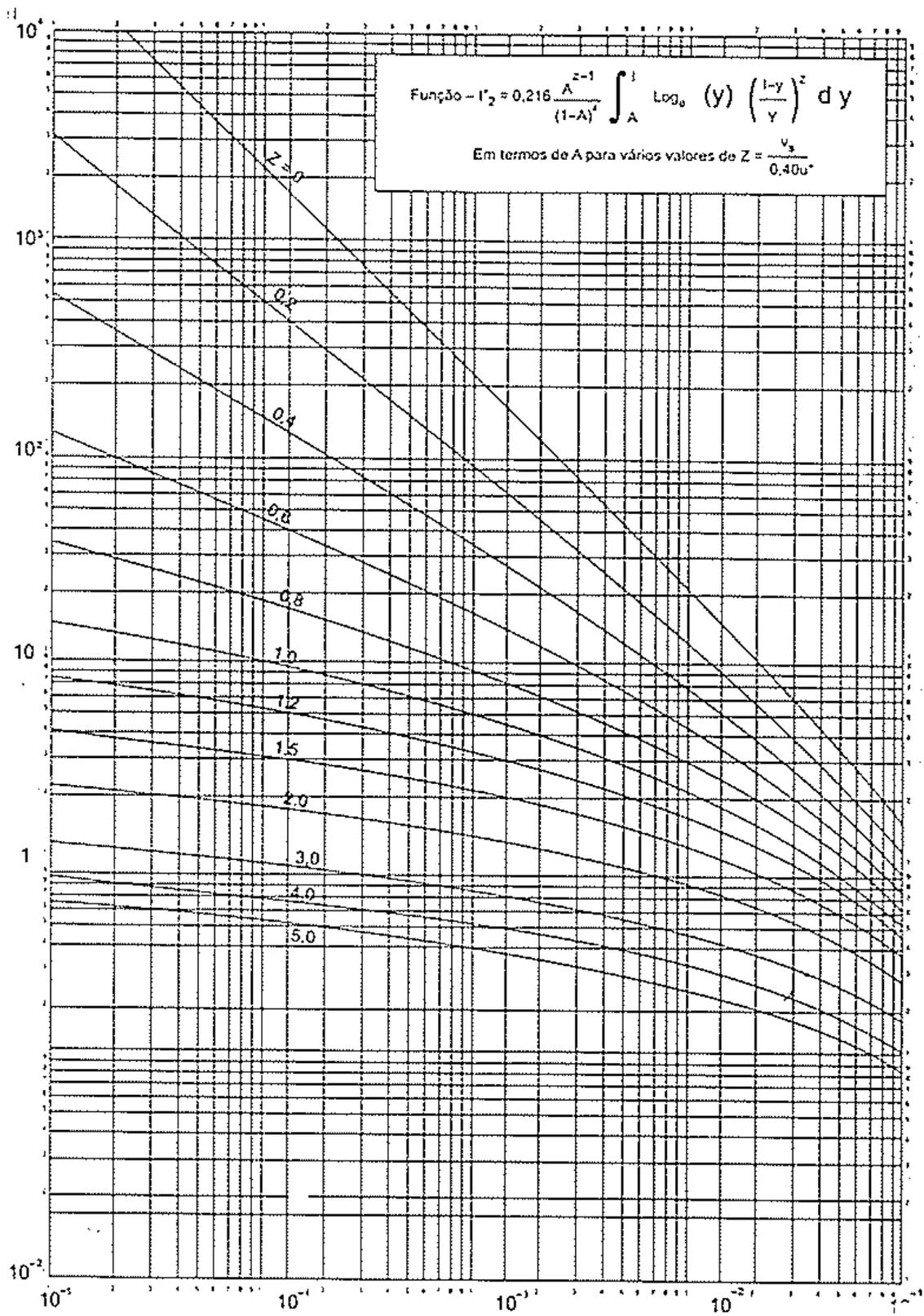


Figura 21-Expressão de Γ' (USBR, 1955, Colby & Hubbell , 1961).

3.5 Procedimentos para a Coleta de Dados

3.5.1 Introdução

A amostragem de sedimentos deve ocorrer com a utilização de técnicas apropriadas e equipamentos padronizados para obtenção de amostras representativas. A técnica e o equipamento utilizados são variáveis com o tipo de sedimento que se deseja amostrar.

As partículas são transportadas em um curso d'água de acordo com seu peso, velocidade da corrente e caso esteja no leito, o transporte da partícula é dependente também do atrito entre partículas.

O material sólido transportado em suspensão possui peso baixo e por isso são levados regidos pelas correntes do curso d'água. Em suspensão também transitam partículas saltantes, essas possuem peso maior que o material fino transportado somente em suspensão, por isso parte de seu trajeto é realizado através do leito e parte em suspensão.

Com a granulometria ainda maior, há o material transportado pelo leito. Para essas partículas o transporte ocorre através de rolamentos, deslizamentos ou pequenos saltos.

Dessa forma, a escolha do equipamento hidrossedimentológico é dependente do material que se pretende amostrar. Em geral distingue-se amostragem de material em suspensão de amostragem de material de leito.

Além da distinção entre tipo de materiais do rio é necessário determinar as características do curso d'água. Para cada tipo de rio há um equipamento hidrossedimentológico adequado, por exemplo, em rios rasos pode-se fazer medição a vau, utilizando-se apenas hastes de apoio ao equipamento, enquanto em rios profundo, muitas vezes necessita-se de pesados guinchos.

3.5.2 Amostragem do Material em Suspensão

Os métodos de amostragem do material em suspensão são distinguidos entre medição direta e indireta. A medição indireta necessita de amostragem física de porções de mistura água com sedimentos escolhidas adequadamente em pontos de uma seção transversal de forma a obter-se um valor médio da granulometria e concentração de sedimentos (CARVALHO,1984).

Já a medição direta, em geral, não precisa de amostragem física. No caso de equipamentos fixos que medem posições pontuais, essa medição exige amostragem por métodos indiretos no mesmo ponto para calibragem e também medições regulares em uma seção próxima para correlações com as medições pontuais (Carvalho, 2008).

A amostragem do material em suspensão é a fase predominante da coleta de dados, pois há maior dispersão dos valores medidos ao longo do dia. Deve-se tomar o cuidado de manter a distância mínima necessária do fundo do corpo d'água para evitar que os amostradores de sólido em suspensão colem também material do leito. Além disso, há necessidade de se evitar tocar o leito para que o material deste não entre em suspensão devido à agitação gerada pelo equipamento coletor de amostra. Em geral, o amostrador deve manter uma distância do fundo do corpo d'água variando entre 9 cm e 15 cm de acordo com o equipamento utilizado (Carvalho, 2008). Dessa forma, há sempre uma zona não amostrada próxima ao leito.

O hidrometrista busca obter amostras com mesma concentração e mesma granulometria dos sedimentos presentes no fluxo d'água. No entanto, sabe-se que a inserção do próprio equipamento gera turbulências alterando a condição que se deseja amostrar. Equipamentos adequados e os devidos cuidados do hidrometrista minimizam esses erros de amostragem mantendo-os dentro de uma tolerância aceitável.

A amostragem do material em suspensão pode ocorrer de forma pontual ou por integração na vertical. A medição pontual é utilizada tanto em métodos diretos quanto indiretos, no entanto, a medição por integração na vertical é apenas utilizada em determinação da descarga sólida em suspensão de forma indireta.

A coleta de dados de forma pontual pode ocorrer de duas maneiras: de forma instantânea ou por integração. A primeira tem duração curta de coleta, já a segunda dura até mais que 10 segundos. Os métodos por integração, tanto o pontual quanto o efetuado em verticais, apresentam maior utilização, pois alcançam maior representatividade do valor médio das concentrações e granulometrias.

A amostragem pontual é geralmente utilizada quando se deseja estudar a distribuição da concentração ou granulometria ao longo de uma vertical, ou nos casos nos quais se deseja determinar a concentração em uma seção onde já foi previamente determinado um fator de correção obtido de medições completas anteriores.

Para a amostragem pontual o tempo para cada coleta de amostra é dado por:

$$t = \frac{V_{am}}{A_{bico}} = \frac{4.V_{am}}{\pi.Db^2.v} \quad (20)$$

Onde:

t= tempo de amostragem, em segundos

V_{am} = volume da amostra

A_{bico} = área do bico utilizado, 1/8", 3/16" ou 1/4"

v= velocidade da corrente no ponto

Db= diâmetro do bico

A determinação do número de amostras para efetuar uma medição depende da forma e do tamanho da seção transversal, do tamanho das partículas, da razão entre a descarga sólida transportada na ocasião de amostragens e da descarga sólida durante o período considerado. Além disso, deve-se levar em consideração o grau de precisão necessário à medição e o grau de precisão do método laboratorial utilizado.

Quanto à determinação das posições de amostragem pontuais têm-se onze tipos mais comuns (Cemig, 1965, Subcommittee on Sedimentation, 1963):

- Uma amostra única na superfície.
- Uma amostra a 60% da profundidade.
- Uma amostra em posição previamente estudada.
- Duas amostras de pesos iguais, uma próxima a superfície e outra próxima ao fundo.
- Três amostras com pesos iguais: próxima à superfície, próxima ao fundo e uma a meia profundidade.
- Três amostras em posições similares a item anterior, porém com peso 2 a amostra do meio.
- Várias amostras em uma vertical, quantidade de acordo com a precisão requerida.
- Amostras tomadas em pontos definidos com correções baseadas em conhecimentos prévios.
- Método de Straub, amostra a 20 % e 80% da profundidade e concentração média dada por:

$$C_m = \frac{3}{8} C_{0,8p} + \frac{5}{8} C_{0,2p} \quad (21)$$

- Método de Luby: a área definida pela curva de velocidade é dividida em valores iguais, ou seja, áreas de mesma descarga, as amostras são coletadas dos centros dessas áreas.

- Método de B. C. Colby recomenda dividir a profundidade da vertical em proporções iguais. As amostras são retiradas nos centros dessas partes nos pontos a 1/10, 3/10, 5/10, 7/10 e 9/10 da profundidade. As concentrações são determinadas de acordo com a velocidade em cada ponto. A curva de velocidade pode ser feita antes ou depois do momento da amostragem.

Os métodos mencionados tratam da coleta de dados pontual. Já para a amostragem por integração na vertical há um tempo de coleta é maior. Como dito anteriormente, em geral, no mínimo 10 segundos é o suficiente para o amostrador descer com velocidade uniforme até o fundo e retornar a superfície fazendo a coleta nos dois sentidos. Porém essa velocidade e o tempo de coleta devem ser bem determinados para promover coletas dentro dos limites de volume necessário, não se devem coletar amostras com volume superior a 400 cm³.

Generalizadamente, a amostragem por integração na vertical segue o roteiro a seguir. Após montagem do amostrador ideal na haste de suporte, zera-se o contador com o bico na superfície e desce o equipamento até o fundo retornando-o em seguida à superfície, novamente zera-se o contador e o cronômetro. Essa primeira etapa é efetuada para determinação da profundidade. Em seguida, esvazia-se a garrafa, posiciona-se o bico pouco a cima da superfície e o procedimento de descida e subida com velocidade constante é repetido para a coleta da amostra.

O procedimento explicado é uma forma geral de coleta de dados na amostragem por integração na vertical. Na realidade, a escolha do método de amostragem depende do fluxo e da granulometria dos sedimentos em suspensão no corpo d'água. Faz-se a divisão em quatro casos distintos para a escolha do método adequado (Douglas G.Glysson, Edward, 1999):

- Velocidades baixas ($v < 0,60$ m/s) com poucas partículas com granulometria de areia. Não é importante coletar amostras isocinéticas devido à uniformidade do material fino.
- Velocidade altas ($0,60$ m/s $< v < 3,70$ m/s) e profundidades menores que 4,60 m. Utilização de amostradores do tipo DH-48, DH-59, DH-75 ou DH-74, com coleta de dados na descida e subida (não necessariamente com mesma velocidade de trânsito) do equipamento.

- Velocidades altas ($0,60 \text{ m/s} < v < 3,70 \text{ m/s}$) e profundidades maiores que 4,60 m. Devem ser utilizados amostradores pontuais ou de saca compressíveis.
- Velocidades muito altas ($v > 3,70 \text{ m/s}$) utilização de amostradores pontuais ou de integração é perigosa ou impossível, deve-se utilizar amostragem de superfície.

Assim como na coleta pontual, deve-se determinar o número de pontos de coleta na seção transversal, no caso da coleta por integração na vertical, deve-se determinar o número de verticais e suas posições. Há as sete seguintes configurações das verticais (Cemig, 1965, Agriculture et alii, 1978):

- Uma vertical no meio do rio ou em posição adequadamente estudada.
- Uma vertical no talvegue ou no local de maior profundidade.
- Três verticais a 1/4, 1/2 e 3/4 da seção transversal
- Três verticais a 1/6, 1/2 e 5/6 da seção
- Quatro ou mais verticais nos centros de segmentos iguais da seção transversal
- Verticais com iguais incrementos de largura (método IIL)
- Verticais nos centros de iguais incrementos de descarga (método IID)

O método IIL é o método de amostragem por igual incremento de largura, nele a seção transversal é dividida em segmentos de larguras iguais. As amostras são coletadas em cada vertical com velocidade de trânsito igual. Logo os volumes coletados são diferentes e proporcionais à vazão em cada zona amostrada.

Em geral, as verticais são traçadas em número ímpar em iguais distâncias entre elas. É selecionada a vertical com maior produto velocidade por profundidade, na maioria dos casos, é a vertical do meio da seção transversal. Para encontrar a velocidade de trânsito, encontra-se a velocidade média e multiplica-se pela razão máxima, de 0,2 a 0,4 de acordo como bico do equipamento utilizado. O tempo de coleta é dado pela divisão da velocidade pelo dobro da profundidade. Em seguida o processo é repetido para as demais verticais.

De acordo com as normas da OMM (1981) é indicada a realização de 5 a 15 verticais de acordo com a largura do rio. Em rios de água limpa e pequena concentração de sedimento há necessidade de uma coleta de maior volume de mistura água-

sedimento. A mostra uma relação entre a concentração de sedimentos e o volume necessário de amostragem na seção transversal.

Tabela 2- Volumes mínimos de amostras necessários para análise de concentração média de sedimentos em suspensão (WMO, 1981)

Concentração esperada de sedimento em suspensão PPM	Volume da amostra (litros)
> 100	1
50 a 100	2
20 a 30	5
< 20	10

O método de amostragem por igual incremento de descarga é o chamado de IID, é também conhecido como EDI, *equal discharge increment*, Nesse método a seção transversal é dividida em subseção de mesma vazão e a coleta de amostra ocorre no centróide de cada segmento.

No IID a velocidade de trânsito em cada subseção é escolhida de tal forma que o volume de amostra seja igual em todas as coletas. Ou seja, diferente do método IIL, pode ocorrer velocidades de trânsito diferentes entre verticais distintas. Além disso, esse método tem menor quantidade de verticais, pois há a coleta de maiores volumes por verticais e admite-se a utilização de bicos diferentes na mesma seção.

Em laboratório essas subamostras, caso realmente de volumes iguais, podem ser combinadas fornecendo uma análise única da concentração média de segmentos.

Pode-se seguir o seguinte procedimento (Ringen, 1978): faz-se a medição da descarga na seção transversal escolhida e traça-se um gráfico com o uso das porcentagens acumuladas de descargas parciais contra a respectiva abscissa na seção transversal.

Para a realização do método IID sem as utilizações dos gráficos de Lane e do gráfico de distribuição de vazões pode seguir o seguinte processo (Carvalho, 2008):

- Mede-se a descarga líquida com quantidade maior de verticais do que a usual, 30 a 35 verticais e calcula-se, por exemplo, 100 m³/s.
- Divide-se a descarga total pelo número de amostras que se quer obter; sendo 10 verticais, ter-se-á uma amostra a cada 10 m³/s.
- A primeira amostra deve ser obtida no centróide, na posição de 5m³/s.

- Procura-se na planilha de cálculo a posição da abscissa correspondente pela soma das descargas parciais; a posição mais precisa pode ser obtida por aproximação com cálculos simples; também a velocidade pode ser obtida com cálculos simples.
- As verticais seguintes seriam a cada 10 m³/s até 95 m³/s.

Vale ressaltar que o método IIL é de mais simples utilização no campo sendo preferido pelos hidrometristas.

3.5.3 Cuidados Após a Coleta das Amostras

Alguns cuidados devem ser tomados no período entre obtenção das amostras e a análise no laboratório. Em geral, devem-se lacrar bem os recipientes e levá-los o quanto rápido possível ao laboratório. Enquanto esperam o momento da análise laboratorial é importante manter as amostras em local escuro e frio para evitar a formação de algas devido à possível presença de matéria orgânica. Além disso, o tempo de espera pode propiciar a modificação da qualidade da amostra desencadeada pela ionização de partículas muito finas e formação de cadeias com esses íons.

Antes da armazenagem durante o período de espera para análise em laboratório é recomendável a ocorrência de uma pesagem. Anterior a ação do laboratorista, novamente deve ser feita a pesagem das amostras a fim de detectar a possível evaporação de parte da mistura água-sedimento coletada.

Ainda quanto aos cuidados na amostragem, de acordo com Guy & Norman (1985), não é recomendável a transferência da amostra para recipientes diferentes da coleta para evitar a perda de partículas grudadas nas paredes do antigo frasco.

Quando se pretende determinar a granulometria das amostras (Carvalho, 2008) recomenda a adição de 1 cm³ de solução de silicato de sódio com 1,023 g/cm³ a 20 °C, ou de hexametáfosfato de sódio para manter as partículas separadas.

Outro cuidado importante é quanto à identificação das amostras. Na garrafa plástica ou de vidro, ou ainda em alguns casos, em uma lista suplementar codificada juntamente com as garrafas é necessário registrar dados como: rio, local, data, hora, vertical, n° da garrafa, nível d'água, temperatura, amostrador, bico usado no equipamento de coleta, tipo de amostragem, profundidade, tempo de amostragem e nome do hidrometrista.

A temperatura da água que foi registrada no recipiente de coleta deve ser determinada por termômetro de imersão, com permanência de no mínimo 2 minutos mergulhado para estabilização da temperatura medida. Além disso, a leitura deve ocorrer com o instrumento ainda imerso em sua quase totalidade.

Dentre os dados necessários aos cálculos de descarga tem-se também a velocidade do fluxo d'água. Esse valor é obtido através do molinete. Para obtenção de valores de velocidade coerentes para os cálculos, as medidas com o molinete devem ser tomadas no mesmo instante em que há a coleta da amostra.

Vale ressaltar que as garrafas não devem conter amostras com volume igual à capacidade do recipiente. As garrafas devem estar preenchidas entre $\frac{3}{4}$ e $\frac{4}{5}$ de seu volume. Nos casos onde a coleta obteve volume inferior a essa faixa é recomendável outro período de coleta com velocidade de trânsito pelo menos igual à primeira integração.

3.5.4 Amostragem do Material do Leito

Há maiores dificuldade na determinação da descarga de fundo que a carga em suspensão. Para a amostragem do material de leito necessariamente deve haver uma amostra física obtida no rio em estudo, tanto na medição direta quanto na indireta. Na grande maioria dos métodos de determinação indireta da descarga de material de leito e arrasto é necessário saber a granulometria do leito, por isso a necessidade de amostragem.

No Brasil, não é comum a medição direta da descarga de fundo, normalmente, essa descarga é determinada com a utilização de fórmulas e métodos a partir de dados de vazão, parâmetros hidráulicos, informações obtidas da análise do material coletado do fundo do rio etc..

Os métodos de amostragem de fundo são divididos em dois tipos. O primeiro é realizado para materiais mais fino que pedregulho, menor que 8 mm de diâmetro médio. O segundo é realizado para amostragem de material com 90% ou mais com diâmetro médio maior que 8 mm, ou seja, material com granulometria maior que areia grossa (Ringen, 1978).

A escolha do equipamento amostrador e do tipo de amostragem é dependente da granulometria, da profundidade e da velocidade do fluxo d'água. O número ótimo de

amostras deve ser verificado segundo a natureza e heterogeneidade do material e das variáveis em estudo (Ringén, 1978).

Geralmente as amostras são recolhidas em posições com igual incremento de largura na seção transversal. Muitas vezes podem-se utilizar as mesmas verticais da amostragem em suspensão. No entanto, para a coleta de material do leito é necessário um número menor de verticais que a coleta de amostras da mistura água-sedimento em geral. Esse material coletado é misturado e submetido a uma análise única no laboratório no processo de peneiramento.

Se for utilizado o método IID para material em suspensão, pode-se coletar o material do leito em verticais alternadas, nunca inferior a um número de cinco subamostras. No total, deve ser recolhido cerca de 2 kg de material do úmido. Sempre deve-se tomar o cuidado de garantir que não se perca as partículas finas no processo de remoção da amostra e também no momento de transporte do material do equipamento para o recipiente que será levado ao laboratório.

É importante salientar que nunca deve haver coleta de material do leito em locais de água parada.

As amostras coletadas devem ser etiquetadas tais como as amostras do material em suspensão. Nessa etiqueta deve constar: número e nome do posto, rio, data da coleta, hora, método de amostragem, abscissa, tipo do amostrador, temperatura da água, profundidade e iniciais do hidrometrista.

Para coleta de material mais fino que 8 mm, argila, silte e areia, são indicados amostradores do tipo penetração vertical, tipo tubo vertical, BMH-53 e tipo caçamba de escavação, BMH-60 e BM-54.

Os amostradores, ou coletores classificados com penetração horizontal são as caçambas de dragagem e de concha. Esse tipo de amostrador, quando possui pequeno comprimento, não é recomendado para rios. Para evitar a perda de finos os amostradores devem ter comprimento mais longo.

Os amostradores de penetração vertical não são recomendados, pois há grande perda de material durante o processo de levantamento do amostrador. Em rios rasos, com medição a vau, utilizam-se os amostradores BMH-53 e BMH-80 (Douglas G. Glysson, Edward, 1999).

Para material mais grosso utiliza-se a técnica de contagem de seixos realizada entre 100 a 200 pontos (Ringén, 1978).

3.6 Equipamentos de Hidrossedimentometria

3.6.1 Equipamentos para Descarga Sólida em Suspensão

A amostragem para determinação indireta da descarga sólida em suspensão pode ser realizada por três categorias de equipamentos: instantâneos, por integração e por bombeamento. Os equipamentos instantâneos dispõem de um mecanismo de fechamento instantâneo do recipiente coletor, já os por integração acumulam a mistura por um certo período, podendo ser pontual ou por integração em uma vertical. Por fim, os amostradores por bombeamento retiram a amostra succionando-a através da ação de bombas, também podem ser pontuais ou por integração na vertical.

Os amostradores por integração são mais utilizados, pois extraem uma amostra mais representativa do valor médio a ser mensurado no corpo d'água.

Cada um dos três tipos de amostradores ainda é classificado quanto à orientação do orifício coletor. Esse orifício pode estar posicionado contra a corrente e paralelo ao escoamento ou em ângulo reto ao escoamento.

A amostragem para determinação direta da descarga sólida em suspensão é realizada na maioria das vezes por instrumentos fotoelétricos ou nucleares. No entanto, devido ao curto período de amostragem, esses aparelhos instantâneos possuem limitações de aplicabilidade.

No geral, podem ser identificados treze tipos de amostradores:

- 1- Tubo comum vertical
- 2- Instantâneo vertical
- 3- Instantâneo horizontal
- 4- Garrafa
- 5- Saca
- 6- Bombeamento
- 7- Integrador
- 8- Fotonuclear
- 9- Nuclear
- 10- Ultra-sônico
- 11- Ultra-sônico de dispersão
- 12- Eletrônico
- 13- A laser

Os amostradores de tubo comum vertical, o instantâneo vertical e o amostrador horizontal de retenção instantânea não apresentam condições técnicas de bom amostrador. O de garrafa é o mais simples dos instrumentos e o amostrador integrador

proporciona uma concentração média representativa, sendo um dos mais recomendáveis. A tabela 3 exibe os tipos mais comuns de amostradores, bem como algumas de suas especificações.

Tabela 3-Amostradores de sedimentos em suspensão mais utilizados no Brasil. (Carvalho,2008)

Tipo de amostrador	Denominação original	Denominação nacional	Origem	Modo de uso	Distância do bico ao leito	Profundidade de amostragem
Integração vertical	USDH-48	AMS-1	EUA	Haste a vau	0,09 cm	1,5 m
	USDH-48 modificado		EUA	Haste a vau	0,09 cm	4,5 m
	USDH-48 com peso e cauda alongada		EUA	Cabo manual	0,09 cm	4,5 m
	USDH-59	AMS-3	EUA	Cabo manual ou guincho	0,10 m	4,5 m
	USD-43		EUA	Guincho	0,12 m	5,5m
	USD-49	AMS-2	EUA	Guincho	0,10 m	5,5 m
	Amostrador de saca	AMS-8	EUA	Guincho	Variável	100 m
Pontual ou de integração por partes	USP-46	AMS-4	EUA	Guincho	0,12 m	22 m *
	USP-61		EUA	Guincho	0,11 m	37 m **
	USP-63***		EUA	Guincho	0,15 m	37 m **
	USU-59		EUA	Fixo	Variável	Superfície

** Até 55 m, quando modificado para operar com garrafa de 1 litro

*Até 36 m conforme a disposição do exaustor na cabeça do amostrador

Nesse trabalho é utilizado o amostrador USDH-48, com denominação brasileira de AMS-1.

3.6.2 O USDH-48

O amostrador USDH-48 possui cerca de 3 kg e pode ser operado a vau, de canoa, ou de pontes de pequena altura. Ele funciona como integrador na vertical até 2,75 m de profundidade ao nível do mar, chegando até 9 cm do leito. Deve-se respeitar

essa distância do fundo do corpo d'água para evitar que o bico do amostrador toque o leito, comprometendo a amostragem. A Figura 22 mostra um exemplar do equipamento US DH-48.



Figura 22- US DH-48. Fonte: site www.hidromechc.com.br/hidrometria[Online].

O USDH-48 é feito de alumínio em forma hidrodinâmica e possui uma garrafa coletora presa por uma mola. Ele coleta amostras de 375 mL e 420 mL e possui a limitação de uso até velocidade máxima de correnteza: 2,75 m/s e velocidade de influxo: entre 90% e 110%. Além disso, deve-se respeitar um limite do fator de hasteamento (nível da água em pés multiplicado por velocidade do fluxo em pés/s) menor que 10.

Para a coleta de amostra devem-se determinar previamente alguns parâmetros para o procedimento. O tempo de descida e subida em cada vertical deve ser determinado previamente. Se o tempo for curto demais a coleta será insuficiente, por outro lado, tempo demasiado produzirá amostras acima do limite de 420 mL.

Além disso, há limitações quanto a taxa de trânsito R_t , sendo que $R_t = (2 \times \text{nível da água}) / (\text{tempo de coleta})$. Os limites da taxa de trânsito podem ser checados em gráficos disponibilizados pelo fabricante do equipamento. Alguns cuidados devem ser tomados para garantir a coleta de amostras representativas. O equipamento deve ser inspecionado cuidadosamente para evitar a utilização de um USDH-48 com algum tipo

de avaria. Dessa forma, recomenda-se limpar e desobstruir as extremidades da porta de exaustão, checar roscas (no caso das roscas não estarem funcionando adequadamente deve-se usar tap de 3/8-20NS para encaixe da haste e 7/16-20 NF para encaixe a válvula). Além disso, é necessário verificar tensão na mola de retenção da garrafa, conferir as vedações e limpar a garrafa após inspecioná-la antes da coleta de amostras.

3.6.3 Amostradores Automáticos de Sedimentos em Suspensão

Os amostradores automáticos possuem a grande vantagem da automação o que possibilita a coleta de dados com procedimentos pré-programados. Assim, em casos onde é necessária uma grande quantidade de amostras ao longo de um período, esse tipo de aparelho torna-se uma opção interessante. Além disso, amostradores automáticos costumam a ser utilizados quando se deseja coletar dados em momentos nos quais há perigo na realização da coleta manual ou em horários inconvenientes, por exemplo, em casos de grandes cheias, ou em casos de coletas durante a madrugada.

Muitas vezes em pequenos riachos, o fluxo e as concentrações da água alteram rapidamente em resposta a eventos meteorológicos, esse é mais um exemplo de estudos nos quais é indicado o uso de amostradores automáticos.

Por outro lado, vale atentar para uma desvantagem dos amostradores automáticos, apesar de virem apresentando excelentes resultados, esses aparelhos, em geral, coletam amostras pontualmente em uma seção. Dessa forma, é importante determinar um ponto que tenha a maior representatividade da média de transporte de sedimento da seção escolhida.

Devido ao alto custo de amostragem automática, especialmente para estudos que necessitam de um grande número de coletas, métodos alternativos têm sido considerados para recolher amostras durante as rápidas mudanças nas condições de fluxo.

Dentre os modelos de amostradores automáticos são destacados os equipamentos ISCO série 6712 full size e Liquiport 2000.

O modelo ISCO série 6712 full size permite a coleta de amostras com volume entre 10 e 9.990 ml através da utilização de uma bomba peristáltica cujas especificações são exibidas na Tabela 4.

Tabela 4- dados da bomba do ISCO 6712 full size. Fonte: Neto 2008.

Bomba peristáltica	
Capacidade de sucção	7,9 m ao nível do mar
Variância	± 10 ml
Velocidade de fluxo em função da altura de sucção	0,76 m/s a 3,10 m

O equipamento é muito resistente às agressões do meio ambiente e pode realizar coletas simples ou compostas. A amostragem composta é realizada a partir da combinação de todas as amostragens simples, ou subamostras. A Figura 23 e a Figura 24 mostram exemplares do equipamento ISCO.



Figura 23- Amostrador de água ISCO Série 6712 full size. Fonte: ISCO, 2004

O ISCO 6712 full size é bastante utilizado em coletas de amostras de efluentes industriais, monitoramento de escoamento de águas superficiais, controle de descarga de efluente, avaliação de desempenho em estações de tratamento de esgoto e efluente, monitoramento e estações de tratamento preliminar, avaliação do transporte de sedimentos. (Neto, 2008).

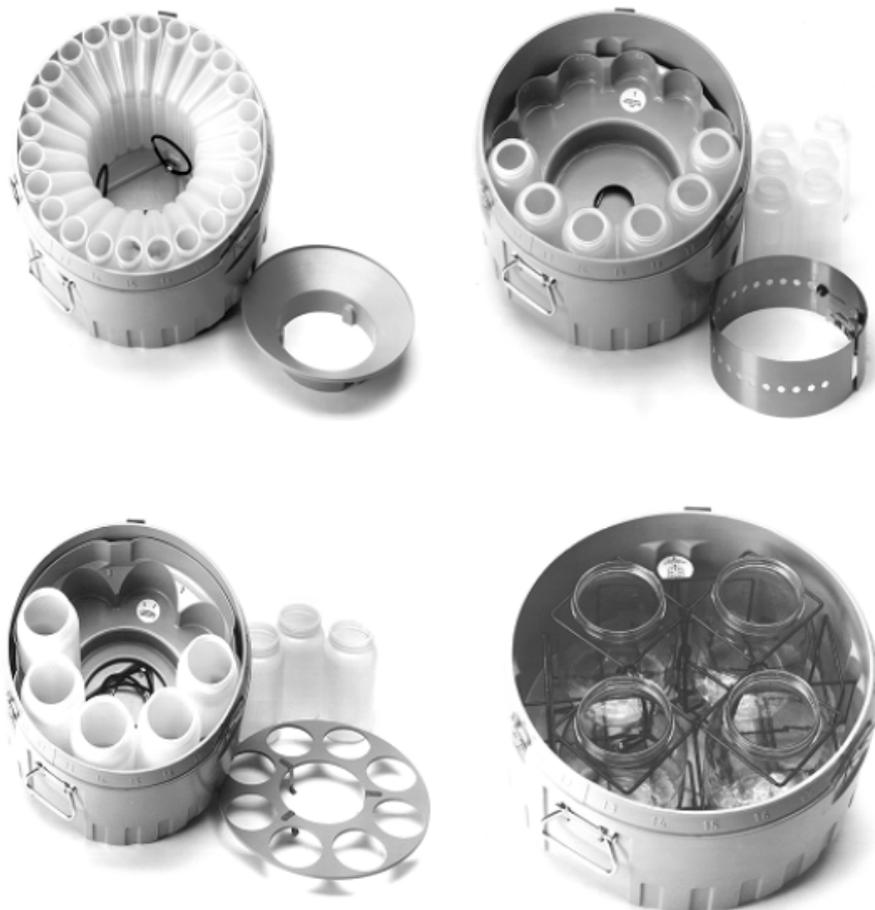


Figura 24-Possibilidades de coletas de amostras. Fonte : ISCO, 2004.

A Tabela 5 traz a especificações gerais do equipamento.

Tabela 5-especificações gerias do equipamento ISCO 6712 full size. Fonte: Neto, 2008

Dados gerais	
Refrigeração	Gelo
Dimensões	68,6 × 50,7 cm
Peso líquido	15 kg
Material	Fibra de Vidro
Alimentação	Bateria 12 VDC

O hidrometrista pode programar o ISCO para realizar a coleta de amostras simples ou compostas em diversos módulos diferente em tempo pré-determinado de acordo com o objeto em estudo. O amostrador automático ISCO pode ser conectado, via conexão SDI-12, a diversos equipamento auxiliares permitindo a pluralidade de funções

para coleta. Os dados obtidos são armazenados em um sistema de registro e armazenamento de dados (datalogger) de 4 MB.

Os equipamentos auxiliares mais utilizados em conjunto com o ISCO Série 6712 full size são:

- Medidor de vazão (ultra-sônico, pressostático, borbulhador ou área-velocidade) em Calhas Parshall, canis abertos ou tubulações;
- Sondas multiparamétricas para qualidade de água;
- Pluviógrafos
- Sistemas de telemetria SCADA;
- Alimentação por energia solar;
- Comunicação 4-20 mA;
- Alarmes por SMS via celular;
- Conexão com lap top.

O outro amostrador automático bastante utilizado é o Liquiport 200, esse é um equipamento portátil alimentado por bateria com amostragem controlada por tempo, fluxo ou evento em meio líquido. As mostras coletadas também por bomba peristáltica possuem volume variável entre 20 e 9.999 mL.

Esse equipamento possui diâmetro externo de 480 mm, altura de 700 mm e peso vazio de aproximadamente 19 kg. O L200 atende a uma altura de amostragem de 6 m a 8 m e distância de transporte de no máximo 30 m. A Figura 25 mostra um exemplar do equipamento LIQUIPORT 2000.



Figura 25- Amostrador Liquiport 2000. Fonte: Hobeco, 2006.

Nesse trabalho seria interessante a utilização de um equipamento automático como o ISCO ou o L2000, pois o Rio claro possui pequeno porte sendo bastante afetado por alterações meteorológicas, inclusive em horários noturnos.

Com equipamentos automáticos haveria maior facilidade de obtenção de uma grande base de dados em uma discretização de tempo adequada. Com esse tipo de equipamento seria possível avaliar as alterações no transporte de sedimento frente a modificações pluviométricas obtendo-se uma correlação entre os dois fenômenos.

3.6.4 Equipamentos para Descarga do Material de Leito

A descarga sólida de arrasto pode ser medida de forma direta ou indireta. Os equipamentos utilizados na medição direta são classificados em quatro tipos: de cesta ou caixa, de bandeja ou tanque, de diferença de pressão e os de estrutura de fenda ou poço.

Esses equipamentos de medição direta perturbam o escoamento no leito, por isso obtêm amostras que não são completamente fies à realidade. Para minimizar os erros, os equipamentos devem ser calibrados em laboratório e devem ser determinadas a eficiência de retenção e a eficiência hidráulica.

A eficiência de retenção é a razão da quantidade de sedimento retida pelo medidor pela quantidade de sedimento transportado pelo curso d'água no espaço equivalente à ocupação do equipamento.

A eficiência hidráulica é a razão da descarga líquida através do amostrador pelo produto da velocidade média da correnteza do rio, na posição do bocal e a área da entrada do bocal.

4 Descrição da Bacia do Rio Claro

A Bacia do Rio Claro está inserida na Bacia do Rio Juqueriquerê no litoral norte de São Paulo, região da Serra do Mar. Nesse item são descritas suas características físicas: clima, vegetação, geologia, pedologia, geomorfologia.

Localizada dentro da Planície Costeira, mais precisamente na Serrania Costeira, a bacia do rio Claro é formada por região serrana com planícies litorâneas descontínuas. A geomorfologia é marcada por vales alongados, segmentos de drenagem retilíneos, linhas de cristais e cumeadas paralelas, escarpas íngremes e grandes desníveis altimétricos (Andrade, 2009).

O clima da região é determinado por seu relevo. A Serra do Juqueriquerê, denominação da Serra do Mar no litoral norte paulista, possui morros paralelos a linha da costa formando uma barreira aos sistemas frontais. Assim a umidade não atinge tão fortemente a região ao leste da serra, por esse motivo, essa parte leste possui uma dos menores índices pluviométricos da Serra do Mar: um total anual por volta de 1500 mm (Andrade, 2009). Mesmo assim, no geral, tem-se que a bacia do rio claro possui um alto nível pluviométrico. A Figura 26 traz um mapa da distribuição de pluviosidade na região da Bacia do Rio Claro.

No local há uma predominância da vegetação conhecida como Mata Atlântica, antigamente encontrada ao longo de quase todo litoral brasileiro, hoje com alguns trechos ainda preservados.

As árvores formam um dossel fechado de 20 m de altura. Nas planícies e fundos de vale elas atingem maiores alturas e há formação de um dossel denso de folhas nos andares médios e inferiores. Essa cobertura vegetal impede que a luz atinja o solo não possibilitando a formação do sub-bosque. Já nas vertentes a luminosidade atinge o solo propiciando a existência de uma espessa submata que o protege da erosão (Andrade, 2009).

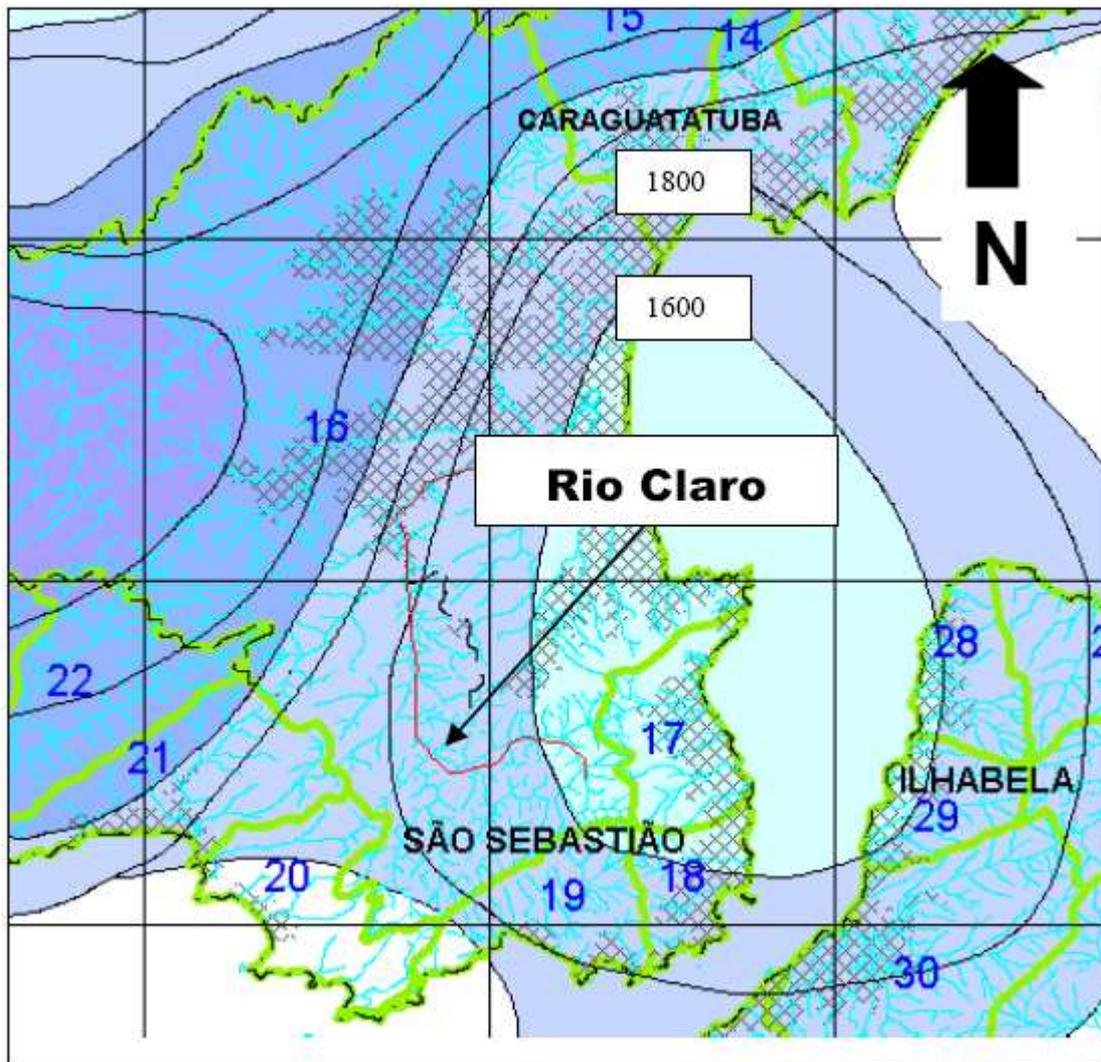


Figura 26-Mapa sem escala da pluviosidade na região da bacia do Rio Claro. Fonte: Andrade, 2009.

No local há uma predominância da vegetação conhecida como Mata Atlântica, antigamente encontrada ao longo de quase todo litoral brasileiro, hoje com alguns trechos ainda preservados.

As árvores formam um dossel fechado de 20 m de altura. Nas planícies e fundos de vale elas atingem maiores alturas e há formação de um dossel denso de folhas nos andares médios e inferiores. Essa cobertura vegetal impede que a luz atinja o solo não possibilitando a formação do sub-bosque. Já nas vertentes a luminosidade atinge o solo propiciando a existência de uma espessa submata que o protege da erosão.

Na planície litorânea há um gradiente fisionômico e florístico da restinga arbórea à floresta Atlântica de planície (Andrade, 2009). No mapa a seguir pode-se perceber que a região da bacia, delimitada em vermelho é revestida por três tipos principais de

vegetação: remanescente da mata atlântica (verde) e uma pequena área com vegetação rasteira e restinga.

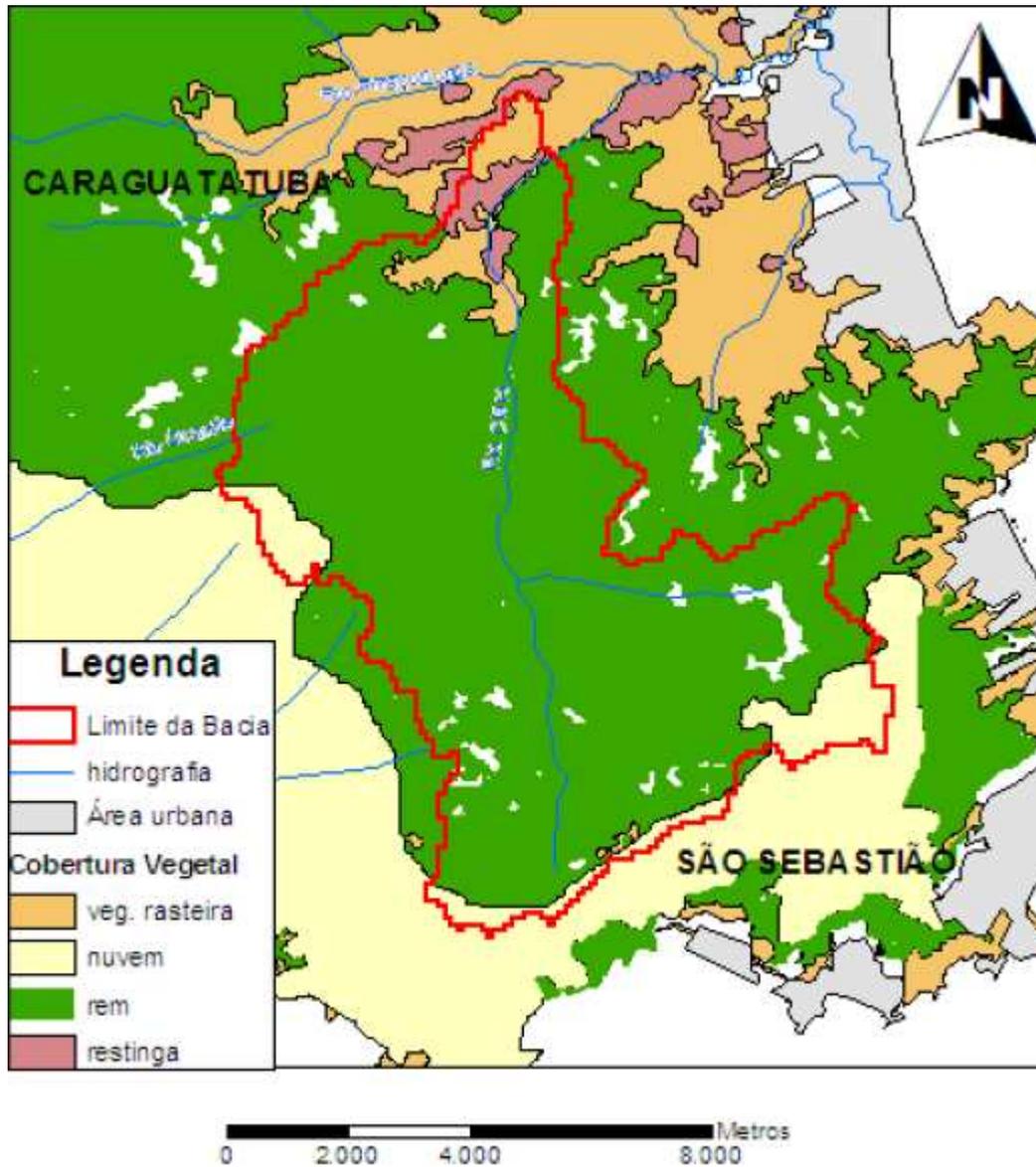


Figura 27-Mapa de vegetação. Fonte: Andrade (2009).

Quanto à geologia e pedologia destaca-se a presença do substrato rochoso da Serra do Mar. A cadeia da Serra do Mar é originada do soergimento da parte oriental da placa tectônica sul-americana após choques com a placa de Nazca há 80 milhões de anos. A região possui generalizadamente afloramento de rochas cristalinas como o granito.

O solo da bacia do Rio Claro é formado a partir da ação do intemperismo no substrato rochoso da Serra do Mar. Na Figura 28 é possível identificar os três tipos predominantes de solo da Bacia do Rio Claro.

CX10- Cambissolo Háplicos distróficos A moderado e A proeminente relevo forte e ondulado montanhoso + Latossolo Vermelhos-Amarelos distróficos A moderado relevo forte ondulado ambos com textura argilosa.

CX11- Cambissolos Háplicos distróficos textura argilosa e média fase não rochosa e rochosa relevo montanhoso e escarpado + Latossolos Vermelhos-Amarelos distróficos textura argilosa relevo montanhoso e forte ondulado, ambos A moderado e A proeminente.

ES1- Espodossolos Ferrocárbicos órticos A proeminente e A moderado textura arenosa + Neossolos Quartzarênicos órticos distróficos A moderado ambos relevo plano.

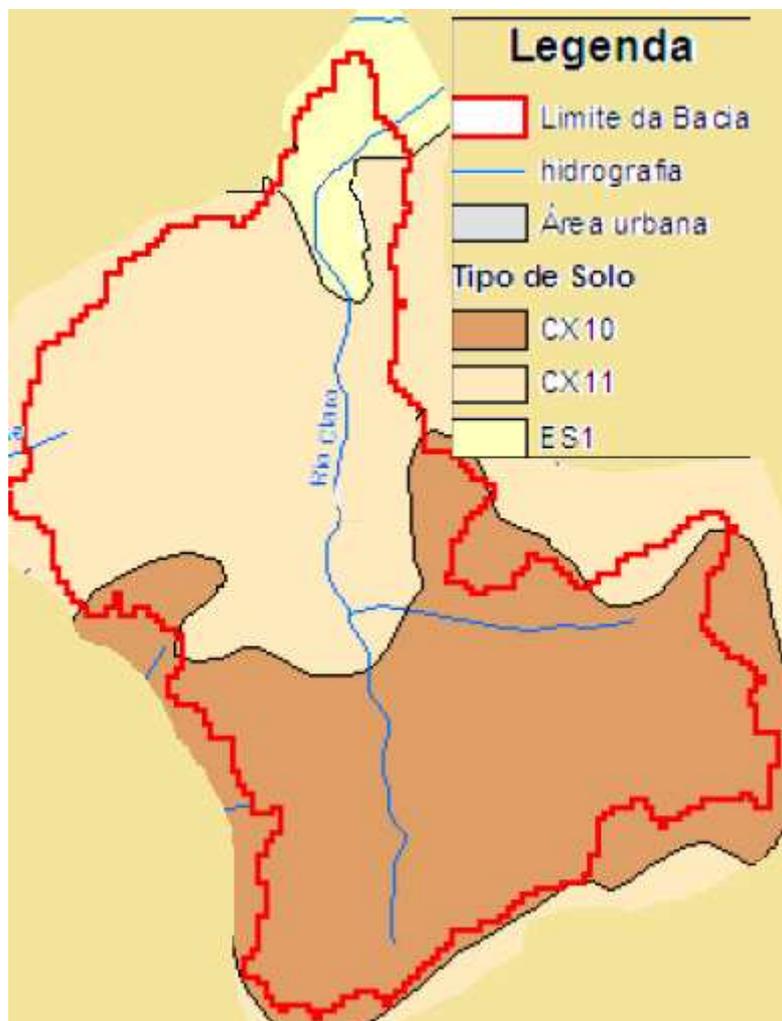


Figura 28-Mapa pedológico da Bacia do Rio Claro. Fonte Modificada de Andrade 2009.

5 Determinação da Curva-Chave

5.1 Seleção do Método para Obtenção da Curva-chave do Rio Claro

Para conhecimento pleno do regime fluvial dos rios são convenientes medições da vazão de um curso d'água de forma contínua. Porém essa obtenção de dados é um processo relativamente complexo que envolve equipamentos e técnicos especializados não sendo economicamente viável.

Dessa forma, estas medições são feitas de forma esporádica e com as informações obtidas busca-se definir uma relação entre o nível d'água e a vazão, de tal forma que a partir da medida da cota se obtenha a vazão correspondente. A relação entre estas variáveis, cota e vazão, é denominada pelos hidrólogos de curva-chave.

A Curva chave é uma função não linear unívoca entre nível e vazão. A parte jusante do escoamento pode possuir efeito sobre a curva-chave determinada alterando-a, nesses casos de efeito de jusante do escoamento tem-se como resultado um feixe de curvas dependente da declividade da linha d'água.

Existem diversos métodos para utilizados para obtenção da curva-chave de um rio. Os três métodos principais são os métodos Logarítmico, Stevens e de Manning.

O método Logarítmico é o mais utilizado do Brasil para extrapolação superior segundo Fill (1987). Nesse método utiliza-se a seguinte equação:

$$Q = a(h - h_0)^b \quad (22)$$

Onde Q é a vazão, h é o nível, h_0 o nível zero da régua de medição e “a” e “b” são parâmetros ligados a vazão local.

Aplicando a função logarítmica dos dois lados da equação pode-se linearizá-la. Dessa forma, através do método dos mínimos quadrados é possível determinar os parâmetros a e b. Com isso tem-se:

$$\ln Q = \ln a + b \ln(h - h_0) \quad (23)$$

A minimização dos desvios se verifica através do coeficiente de correlação r , que deverá ser o mais próximo possível da unidade.

A curva-chave obtida por esse método pode apresentar resultados tendenciosos na extrapolação da curva devido ao peso excessivo dado aos pontos com níveis menores. Além disso, pode apresentar tendências diferentes ao longo da curva.

Para que a equação tenha significado físico, porém é importante observar o valor resultante para o expoente b. Este não deve se afastar muito de 5/3, que seria o expoente da profundidade média (h), na equação de Manning (fazendo-se: área = base média x

altura e altura = raio hidráulico). Expoentes próximos de 2 ou 3 seriam aceitáveis, admitindo-se que a curva-chave possa ser uma parábola de 2º ou 3º graus.

É possível obter melhor ajuste subdividindo a curva por faixas de valores de profundidade.

O método Logarítmico possui as seguintes condições (Sefione, 2002):

- Relação $Q=f(h)$ unívoca com bom alinhamento das medições média e altas;
- Perfil transversal sem descontinuidade de forma na faixa de cotas extrapoladas (regular) e estável ou com baixa instabilidade;
- Permanência de controle entre as cotas médias e altas.

O outro método mencionado para obtenção de curva-chave foi o método Stevens. Este método, proposto por Stevens, foi baseado na fórmula do Chezy para escoamento uniforme em canais.

A equação de Chezy é:

$$V = Cv\sqrt{R_H i} \quad (24)$$

Onde:

V é a velocidade média do escoamento na seção (m/s),

Cv é um coeficiente variável em função do raio hidráulico e da natureza do leito,

R_h é o raio hidráulico em m,

I é a declividade da linha de carga. (m/m)

Igualando a equação da continuidade á fórmula de Chezy tem-se:

$$\frac{Q}{A_m\sqrt{R_h}} = Cv\sqrt{I} \quad (25)$$

Onde $A_m\sqrt{R_h}$ é o fator geométrico e $Cv\sqrt{I}$ é o fator de declividade.

Nos casos onde o gráfico do fator geométrico pela vazão apresenta uma reta alinhada, pelo menos no trecho final da curva, pode-se considerar que o fator de declividade é constante.

O valor do fator geométrico é determinado referente à cota que se deseja extrapolar. Por fim prolonga-se a reta do gráfico “fator geométrico x vazão” até o valor do fator geométrico calculado, obtendo-se graficamente a vazão conforme Figura 29.

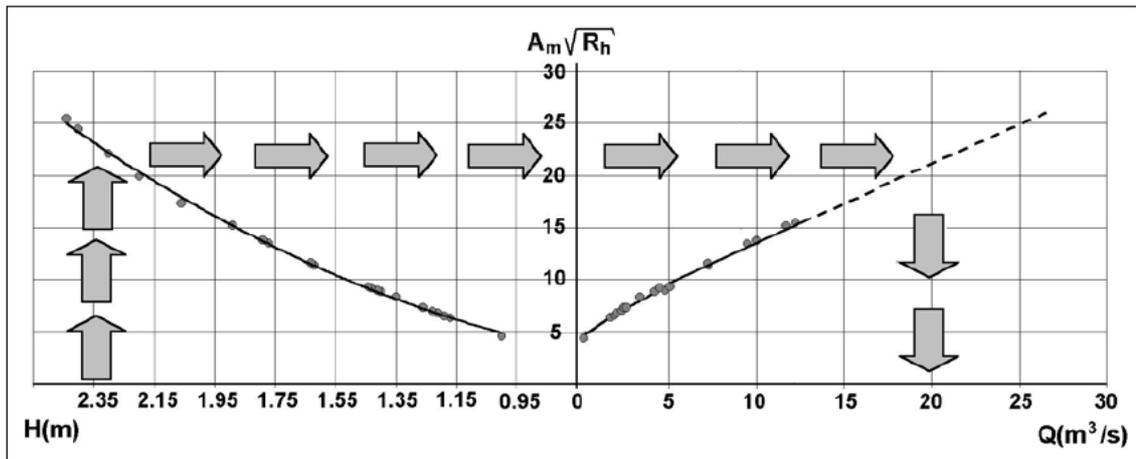


Figura 29-Extrapolação pelo método de Stevens. Fonte: Sefione, 2002.

A aplicação do método de Stevens pressupõe um escoamento quase uniforme, perfil estável ou com baixa instabilidade do fator geométrico. Portanto não se encaixa adequadamente ao caso do Rio Claro.

O método de Stevens possui a vantagem de não depender das velocidades medidas, essa vantagem é destacada nos casos em que se utiliza mais de uma seção na medição das vazões.

Por fim, além do método Logarítmico e de Stevens, tem-se também o método de Manning entre os mais usados para obtenção de curva-chave.

Esse método tem por fundamento a fórmula de Manning para escoamento uniforme dada por:

$$Q = \frac{1}{n} A R h^{\frac{2}{3}} I^{\frac{1}{2}} \quad (26)$$

Onde:

Q - vazão

n - coeficiente de rugosidade de Manning

A - área da seção transversal

Rh - raio hidráulico

I – declividade do fundo

Para cotas altas, a tendência tem-se que:

$$\frac{1}{2} I^{\frac{1}{2}} = K \quad (27)$$

Onde K é uma constante. Substituindo a equação 29 na equação 28 tem-se:

$$Q = KAR^{\frac{2}{3}} \quad (28)$$

$$v = K.Rh^{\frac{2}{3}} \quad (29)$$

Os valores da constante K para o trecho conhecido da curva são determinados pela equação 31 já que são conhecidos os valores da velocidade v e do raio hidráulico R.

Plotando-se h x K, obtém-se uma curva com tendência vertical e assintótica para um determinado valor de K. Com o valor de K, limite para os níveis mais altos (verificado no gráfico), a área e o raio hidráulico da seção transversal, calculam-se os valores correspondentes de Q. A desvantagem principal do método é que nem sempre a função K=f(h) estará bem definida graficamente pelas medições realizadas.

Nesse trabalho é utilizado o método Logarítmico para obtenção da curva-chave para o Rio Claro.

5.2 Obtenção da Curva-chave do Rio Claro

Para a determinação da curva-chave do rio Claro, primeiramente é necessária a obtenção de dados relativos ao rio em estudo.

A Tabela 6 traz os dados de nível e vazão obtidos do Rio Claro. Os dados foram obtidos em duas seções diferentes do rio Claro, porém bastante próximas. Na seção 1, 30 m a montante da seção 2, os dados foram obtidos em campanha da orientadora desse trabalho. Na seção 2, localizada no local onde há instalada a plataforma de coleta de dados do CPTEC de código 69033 os dados foram disponibilizados pela CPTEC (Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos).

Tabela 6- Dados do Rio Claro

Data	vazão (m ³ /s)	nível médio (m) seção 1	nível PCD (m) seção 2
24/11/2007	1,37	0,59	0,72
16/02/2008	1,41	0,42	0,84
23/02/2008	1,83	0,45	0,78
26/09/2008	4,9	0,84	-
07/03/2008	1,86	0,39	0,8
31/03/2009	2,87	0,50	1,1

A partir desses dados, utilizando-se o método Logarítmico, foram traçados dois gráficos de $\ln(\text{vazão}) \times \ln(\text{alteração de nível})$. O Gráfico 1 traz a melhor reta (traçada com a utilização do princípio dos mínimos quadrados) obtida para a aplicação do método Logarítmico para os dados provenientes da seção 1, enquanto o Gráfico 2 traz a melhor reta obtida para o método Logarítmico aplicado aos dados da seção 2.

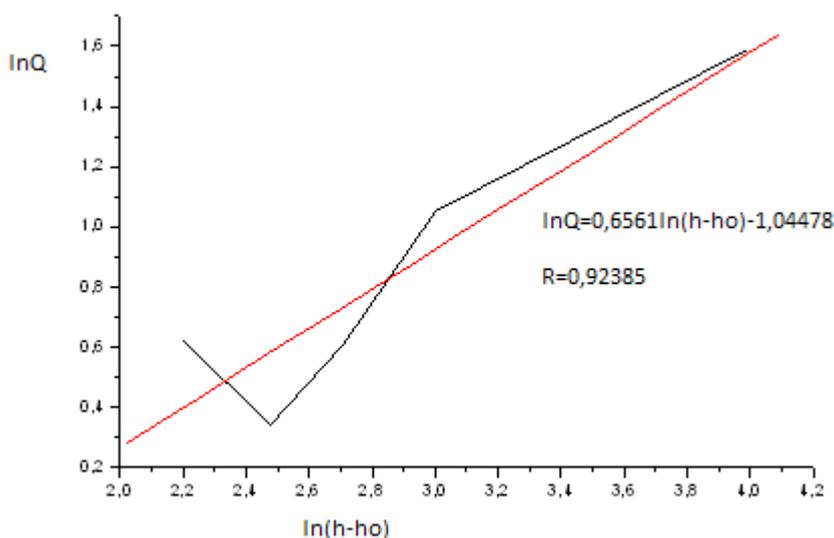


Gráfico 1-Curva-chave para seção 1

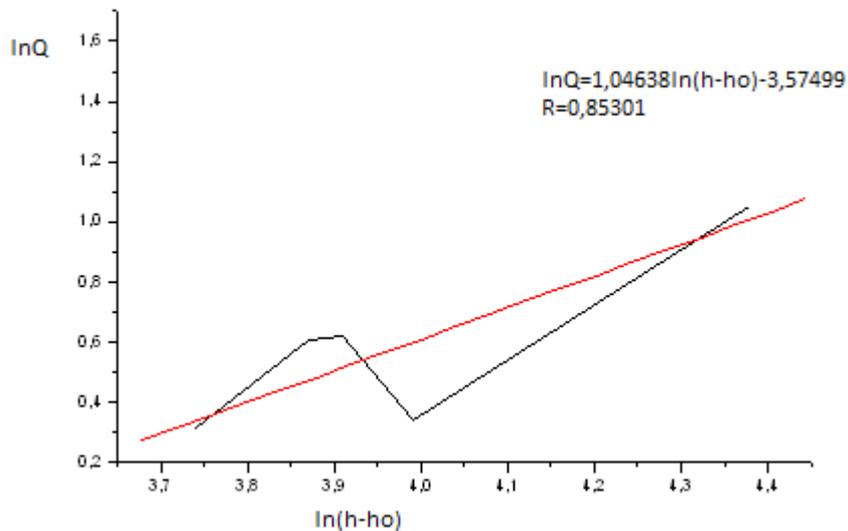


Gráfico 2-Curva-chave para seção 2.

Dessa forma tem-se na seção 1 $\ln(a) = -1,04478$ logo $a = 0,35177$ e $b = 0,6561$. Observa-se que o R^2 é bastante próximo à unidade (0,92385), portanto o desvio padrão não é tão grande, podendo-se aceitar a curva chave da equação 32. Na seção 1 foi adotado $h_o = 0,3$.

$$Q = 0,35177(\Delta h)^{0,6561} \quad (30)$$

Para a seção 2 tem-se $a = 0,028016$ e $b = 1,04638$ e obteve-se R^2 relativamente próximo da unidade (0,85031). Na seção 2 foi adotado $h_o = 0,3$. Obteve-se a curva-chave dada pela equação 33:

$$Q = 0,028016(\Delta h)^{1,04638} \quad (33)$$

Nas equações 33 e 32 o Δh é dado em cm e Q é dado em m^3/s .

6 Análise de Pluviosidade e Nível do Rio Claro

O transporte de sedimentos está relacionado com a erosão na região da bacia em estudo. As chuvas atuam como um dos grandes agentes erosivos que carregam para os

rios os sedimentos das áreas em erosão. Dessa forma, observa-se a influência da pluviosidade no transporte de sedimentos.

No caso da bacia do rio Claro, essa influência é visível. A região possui altos índices pluviométricos e áreas de grande declividade possibilitando maior energia no escoamento das águas das chuvas e por consequência grande transporte de sedimentos.

Em ocorrências de grandes precipitações, o rio Claro adquire alto índice de turbidez, chegando a apresentar aspecto “barrento”. Essa característica é reflexo do aumento substancial no transporte de sedimentos e possui consequências imediatas na rotina da população da região de São Sebastião, como interrupção do tratamento de água e ocasionais suspensões do abastecimento das residências.

A determinação do transporte de sedimentos possui como uma das variáveis a vazão do curso d’água, o aumento da vazão em geral, está relacionado com o aumento de sedimentos transportados. A variação da vazão está correlacionada com a variação de nível de forma direta, já determinada anteriormente através da curva-chave.

Dessa forma, nesse tópico, para maior compreensão das relações entre transporte de sedimentos e precipitações, é estudada a interação dos índices pluviométricos com as alterações de nível na seção de estudo do rio Claro.

Existe um determinado intervalo de tempo, variável de acordo com a bacia hidrográfica, entre a ocorrência da precipitação e o deslocamento das águas pluviais que escoam para os rios e canais dessa bacia. Após esse período, pode-se observar no rio o acréscimo de vazão proveniente das precipitações ocorridas.

Através de dados obtidos pela Plataforma de Coleta de Dados do CPTEC localizada na Bacia do Rio Claro (seção 2) foram plotados gráficos com os registros de nível do rio Claro e chuvas na região da bacia ao longo do tempo. Utilizou-se uma série de dados de fevereiro de 2008 a novembro de 2008 para analisar a correlação da ocorrência das chuvas com as alterações no nível da seção. O Gráfico 3, o Gráfico 4, o Gráfico 5, o Gráfico 6 e o Gráfico 7 mostram as alterações de nível e pluviosidade ao longo do ano de 2008. Os dados de nível se encontram em mm enquanto que os dados de chuva se encontram em (10^{-1}) mm para melhor visualização da ocorrência das chuvas.

Percebe-se que os gráficos do nível, em tom vermelho, acompanham as alterações nos gráficos da chuva com um deslocamento de tempo em atraso.

Foi observado pela análise dos dados disponíveis que os deslocamentos de tempo entre o pico de chuva e de nível variaram em torno de 2 a 9h. Essa faixa de tempo deve-se a fatores como intensidade de chuvas anteriores e umidade do solo entre outros, que

interferem no quão rápido pode-se notar alterações de nível na seção dada a ocorrência de chuva.

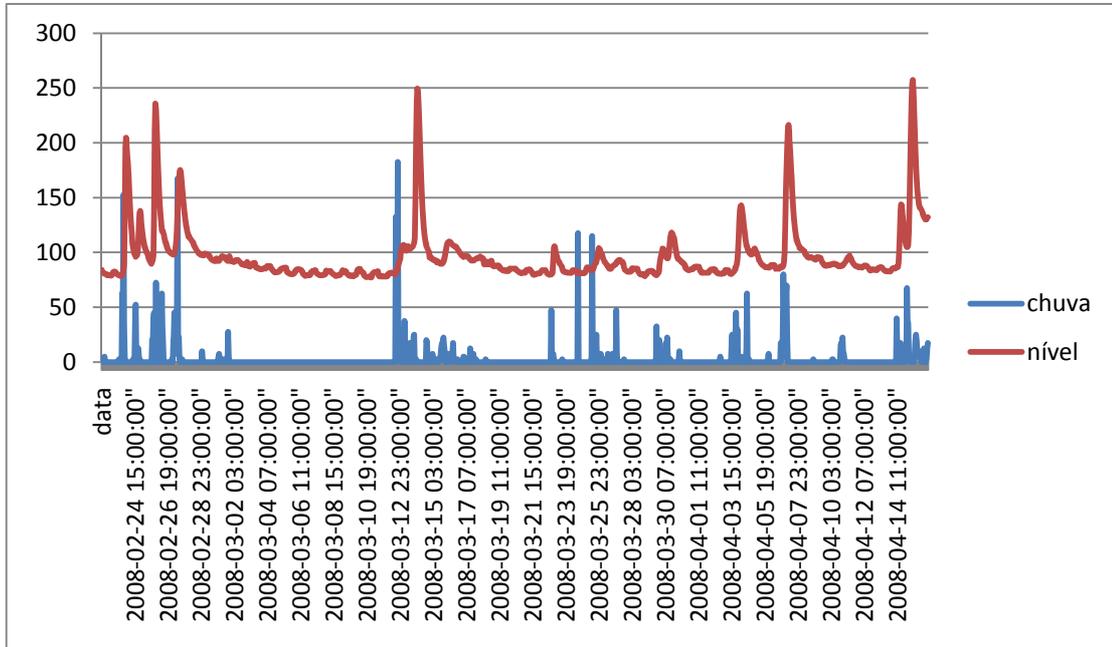


Gráfico 3--Gráfico de pluviosidade e nível em função do tempo com dados de fevereiro de 2008 a abril de 2008.

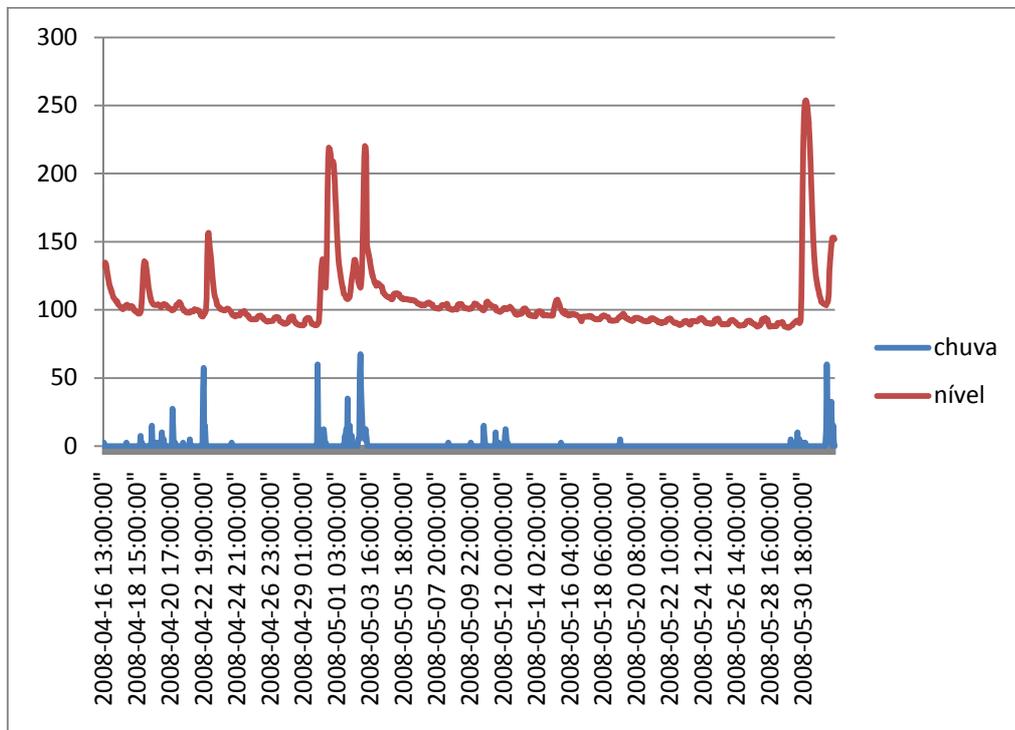


Gráfico 4--Gráfico de pluviosidade e nível em função do tempo com dados de abril de 2008 a junho de 2008.

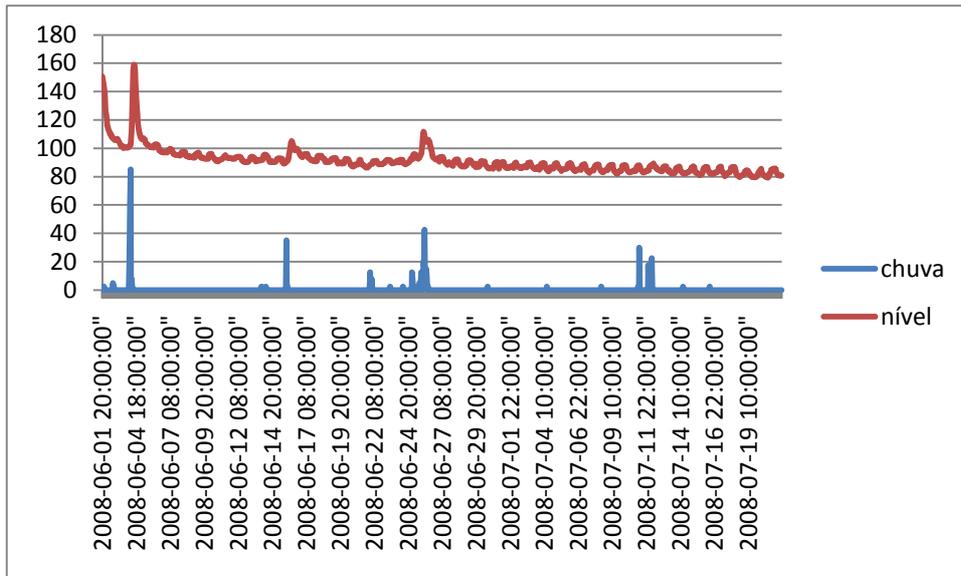


Gráfico 5-Gráfico de pluviosidade e nível em função do tempo com dados de junho a julho de 2008.

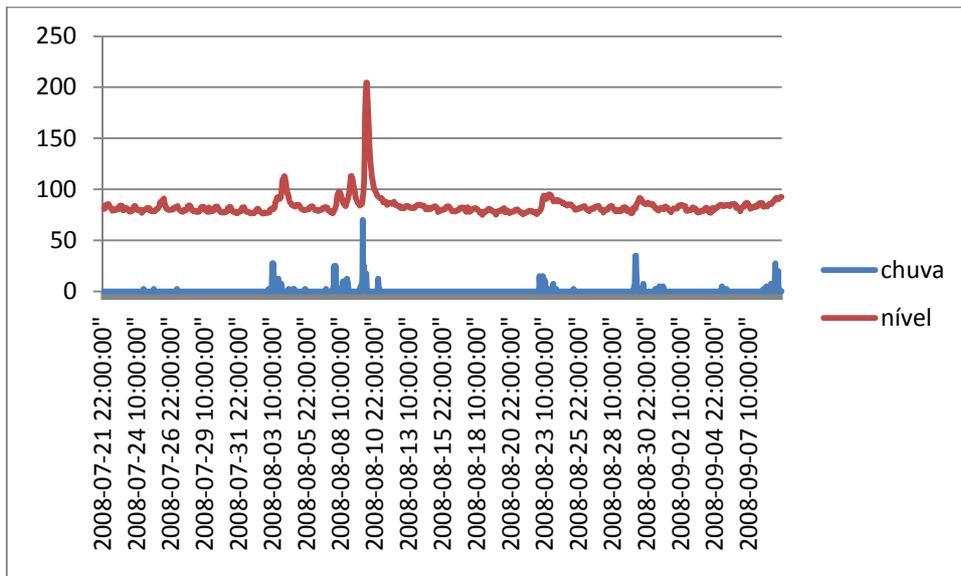


Gráfico 6-Gráfico de pluviosidade e nível em função do tempo com dados de julho a outubro de 2008.

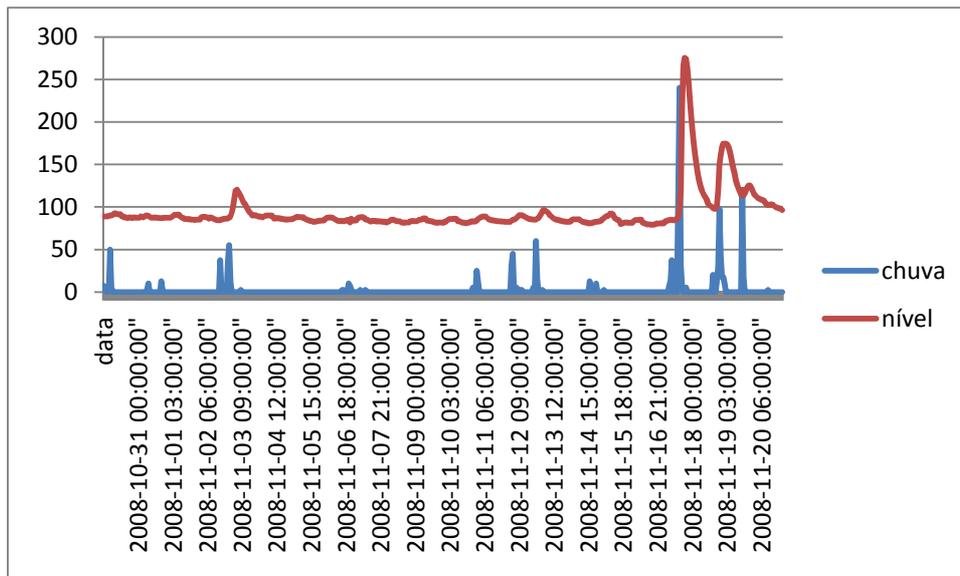


Gráfico 7-Gráfico de pluviosidade e nível em função do tempo com dados de outubro a novembro de 2008.

7 Cálculo da Descarga Sólida de Material de Leito

Nesse trabalho é utilizada a fórmula de Yang para areias (1973) para obtenção da equação $Q_{sml}=f(Q)$ e calcular a descarga de material de leito.

A fórmula deduzida por Yang é baseada na análise dimensional e no conceito de potência unitária do escoamento, ou seja, o valor da energia potencial dissipada por unidade de peso da água, expressa pelo produto da velocidade da corrente pela declividade.

Yang deduziu a equação 34, cujas constantes foram determinadas por regressões múltiplas a partir de dados laboratoriais.

$$\log C = 5,435 - 0,286 \cdot \log\left(\frac{w_s D_{50}}{v}\right) - 0,457 \log\left(\frac{U_*}{w_s}\right) + \left(1,799 - 0,409 \log\left(\frac{w_s D_{50}}{v}\right) - 0,314 \log\left(\frac{U_*}{w_s}\right)\right) \cdot \log\left(\frac{VS}{w_s} - \frac{V_{cr} S}{w_s}\right) \quad (34)$$

Onde a velocidade crítica adimensional em movimento inicial é expressa por duas equações:

$$\frac{V_{cr}}{w_s} = \frac{2,5}{\log\left(\frac{U_* D_{50}}{v}\right) - 0,06} + 0,66 \quad (35)$$

para

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

e

$$\frac{V_{cr}}{w_s} = 2,05 \quad (36)$$

Para

$$\frac{U_* D_{50}}{v} \geq 70$$

Onde:

C é a concentração da descarga de material de leito, em ppm por peso;

W_s é a velocidade média de queda, em $\text{ft}\cdot\text{s}^{-1}$, de partícula de diâmetro D_{50} ;

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

v é a viscosidade cinemática, em $\text{ft}^2\cdot\text{s}^{-1}$;

U_* é a velocidade de cisalhamento, em $\text{ft}\cdot\text{s}^{-1}$, igual a $(g.p.S)^{0,5}$;

V é velocidade média da corrente, em $\text{ft}\cdot\text{s}^{-1}$;

J é a declividade da linha energética, em $\text{ft}\cdot\text{ft}^{-1}$;

V_{cr} é a velocidade média de escoamento, em $\text{ft}\cdot\text{s}^{-1}$, em movimento inicial;

A fórmula de Yang é válida para areias na faixa granulométrica de 0,015 a 1,71 mm, por isso pode ser usada no rio Claro que possui fundo de areia dentro dessa faixa (Carvalho,2008).

As velocidades de queda das partículas são obtidas a partir da Figura 30 utilizando-se fator de forma 0,7.

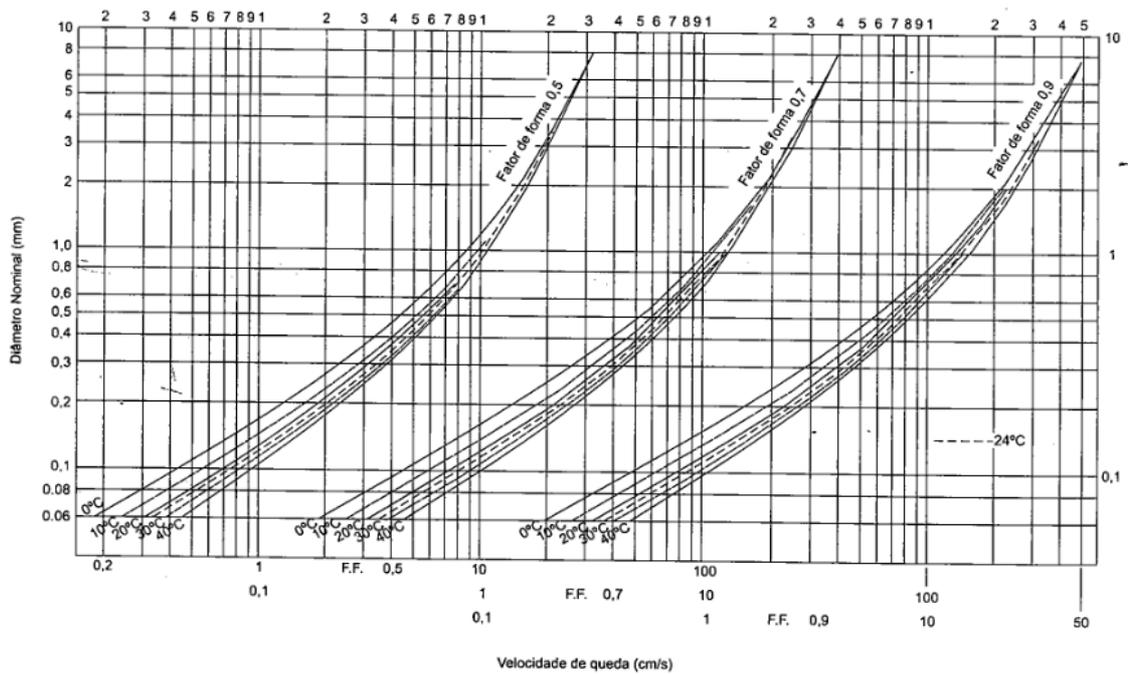


Figura 30-gráfico correlacionando diâmetro de peneira e velocidade de queda, para partículas de quartzo naturais e irregulares, caindo sozinhas em água destilada quiescente em extensão infinita (Subcommittee on Sedimentation, 1957).

A fórmula de Yang possibilita a determinação da concentração sólida para cada classe granulométrica.

Ao final da utilização da fórmula para todas as granulometrias presentes no leito do rio Claro, deve-se realizar o seguinte somatório:

$$C = \sum_{i=1}^n i_f C_i \quad (37)$$

Onde:

n é o número de frações granulométricas do material do leito;

i_f é a fração, por peso, de material do leito em cada granulometria;

C_i é a concentração calculada na fração granulométrica i através da fórmula de Yang.

Por fim, após determinada a concentração C em ppm, a descarga sólida é calculada pela fórmula da descarga em suspensão:

$$Q_{sml} = 0,0864 \cdot Q \cdot C \text{ (sistema métrico)} \quad (38)$$

Para utilização da fórmula de Yang são necessários os seguintes dados:

- Distribuição granulométrica
- D50
- Temperatura da água
- Viscosidade cinemática

- Velocidade média da corrente
- Declividade da linha energética
- Profundidade média
- Aceleração da gravidade

A Tabela 7 exibe os valores utilizados para o cálculo da concentração de sólidos. Os dados foram obtidos de Andrade (2009)

Tabela 7-Valores utilizados na fórmula de Yang para areias.

Variável	Valor
velocidade média da queda ,D50 (ft/s)	0.328084
diametro D50 (ft)	0.00082021
viscosidade cinematica (ft ² /s)	1.07962E-05
velocidade media da corrente (ft/s)	1.62264769
declividade da linha energética (ft/ft)	0.176327017
temperatura da água (°C)	25
velocidade de cisalhamento (ft/s)	3.125847075
aceleraçãoda gravidade (ft/s ²)	32.17

As demais variáveis podem ser determinadas a partir das informações listadas e do uso do formulário apresentado na teoria da fórmula de Yang para areias. Utilizando-se o processo descrito chegou-se ao valor:

$$C=75,15 \text{ ppm, em peso.}$$

A Tabela 8 e 9 exibem a distribuição granulométrica do local utilizada para o cálculo da descarga sólida de material de leito.

Tabela 8-distribuição granulométrica do material de fundo do Rio Claro. Fonte Perdomo (2010).

Areia	D (mm)	(g/kg)
Muito grossa	1,000	22
Grossa	0,500	155
Média	0,250	210
Fina	0,125	110
Muito fina	0,053	57

Perdomo(2010) recolheu 2 amostras em recipiente coletor de plástico com 2L de volume no ponto marcado no mapa da Figura 31 na parte central da seção transversal do

rio. A coleta ocorreu no dia 23 de fevereiro de 2008. A análise foi realizada no laboratório de solos da UNICAMP/FEC.

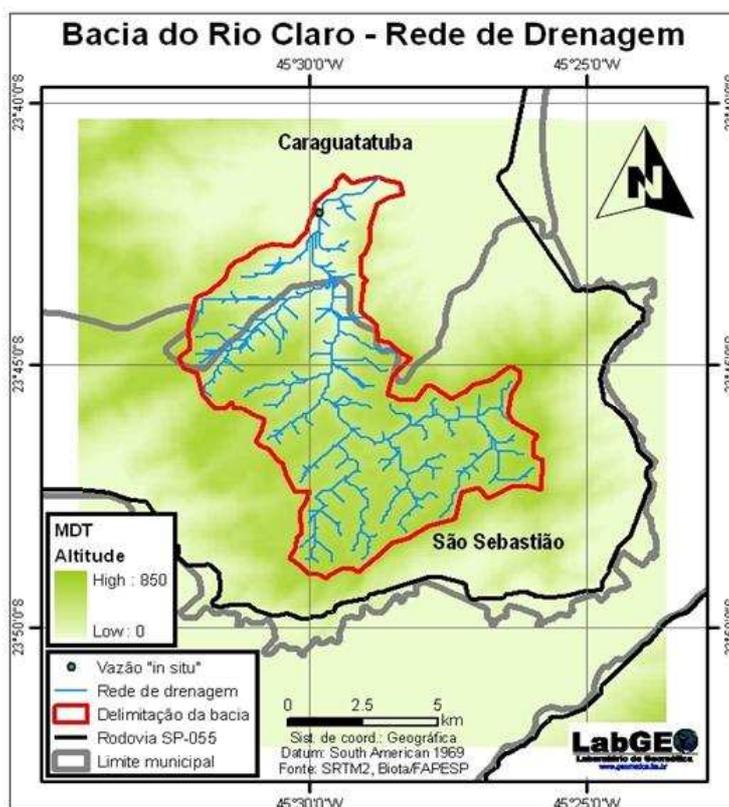


Figura 31-Localização do ponto de coleta. Fonte: Vendrame, Andrade & Mendes Filho (2009).

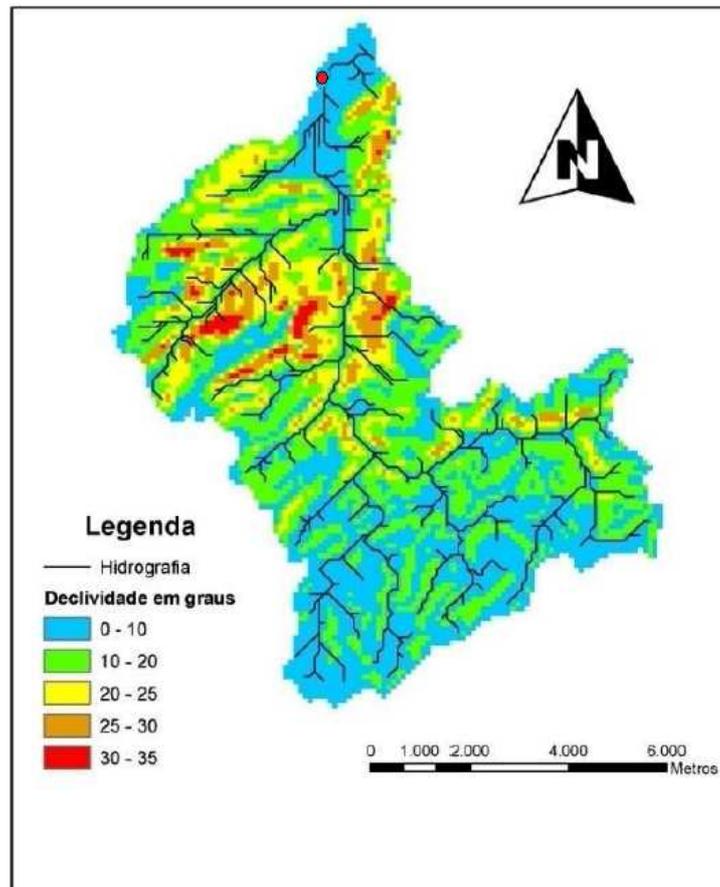


Figura 32-Mapa de declividade da Bacia do Rio Claro. Fonte: Andrade (2009).

A Figura 31 mostra a localização da seção 1 onde foi realizada a coleta. A figura 32 mostra o mapa de declividade de onde Andrade obteve a declividade da bacia do rio Claro no local da seção 1. A partir da distribuição granulométrica pode-se aplicar a equação 37 e 38 obtendo-se o valor da descarga sólida de material de leito.

Tabela 9-Concentração da descarga de material de leito para cada fração granulométrica.

Diâmetro (mm)	Fração granulométrica	Ci (ppm)	ifCi (ppm)
1.000	0.040	57.760	2.294
0.500	0.280	84.120	23.535
0.250	0.379	75.151	28.487
0.125	0.199	212.651	42.223
0.053	0.103	165.646	17.043
Total			113.582

Dessa forma obtém-se a descarga sólida de material de leito em função da vazão obtida pela equação 38.

$$Q_{SML} = 9,8135Q \text{ (kg.s}^{-1}\text{)} \quad (39)$$

8 Cálculo da Descarga em Suspensão

O cálculo da descarga em suspensão é realizado nesse tópico segundo especificado no item 3.2. As coletas de amostras dos sedimentos em suspensão ocorreram nos dias 23 de fevereiro de 2008 e 31 de março de 2009 e foram realizadas por Andrade (2009), na seção 1, localizada 30 m a montante do ponto da seção onde se encontram instalados os equipamentos do CPTEC na plataforma de dados código 32521, latitude $-23,69^\circ$ e longitude $-45,42^\circ$ (seção 2). A Figura 33 mostra a plataforma de coleta de dados 32521.



Figura 33-fotografia da PCD do CPTEC no Rio Claro.

Em cada dia de coleta foram retiradas duas amostras da seção 1. A Tabela 10 traz a concentração de sedimentos determinada no laboratório do ITA (Instituto Tecnológico de Aeronáutica) para cada amostra.

Tabela 10-Concentração de sólidos em suspensão.

Data	Frasco	C (mg/L)
23/02/2008	A	6.02
23/02/2008	B	8.50
31/03/2009	A	12.96
31/03/2009	B	15.24

Para a obtenção de amostras foi utilizado o equipamento US DH-48 apresentado no sub-item 3.6.2.. A amostragem foi realizada até 10 cm de distância do fundo.

A seção de amostragem está representada na batimetria exibida na Figura 34. realizada por Andrade (2009). As amostras foram retiradas na vertical central da seção indicada pelo ponto A.

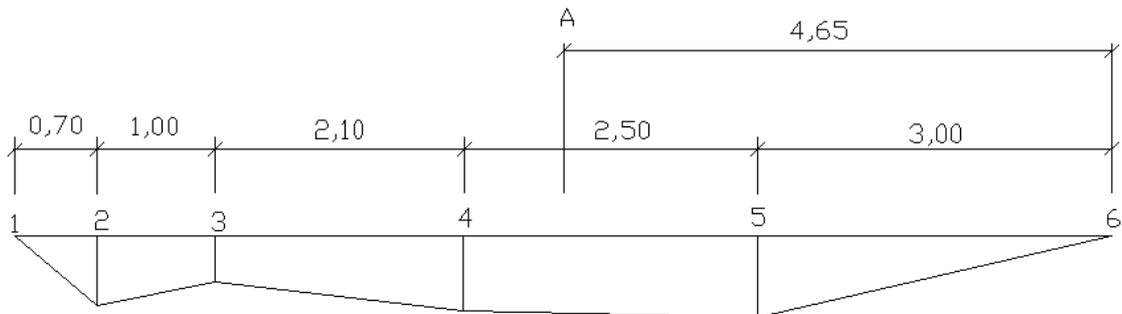


Figura 34-Batimetria seção 2. Fonte: a autora

A Tabela 11 traz as profundidade dos pontos 1, 2, 3, 4 e 5 registradas na batimetria.

Tabela 11-Profundidade e velocidade da corrente nos pontos da batimetria.

Ponto	1	2	3	4	5
Profundidade (m)	0	0,60	0,40	0,65	0,70
Velocidade (m/s)	-	0,44	0,51	0,77	0,63

A Tabela 12 exibe o valor calculado da descarga sólida em suspensão para os dois dias de amostragem.

Tabela 12-Cálculo da descarga sólida em suspensão. Fonte :a autora.

Data	Frasco	C (mg/L)	vazão (m ³ /s)	kg/s	total (kg/s)
23/02/2008	A	6.02	2.33	14.0266	16.918
23/02/2008	B	8.5	2.33	19.805	
31/03/2009	A	12.96	3.24	41.9904	45.684
31/03/2009	B	15.24	3.24	49.3776	

9 Cálculo da Descarga Sólida Total

O cálculo da descarga sólida total foi realizado através da aplicação do método modificado de Einstein de acordo com o subitem 3.4.2.

Os cálculos foram executados com a utilização de um programa computacional desenvolvido por Anderson Braga Mendes (2008). As entradas do programa estão exibidas na Figura 35e na Figura 36.

DADOS DE CAMPO E LABORATÓRIO	
Descarga líquida:	3.240 m ³ /s
Velocidade:	0.722 m/s
Profundidade média (análise de Ql):	0.489 m
Profundidade média (análise de Qs):	0.667 m
Largura:	9.30 m
Área:	4550.00 m ²
Temperatura:	25.00 °C
D ₈₅ (K _s):	0.140 mm
D ₃₅ :	0.015 mm
Concentração:	14.10 ppm
Distância do bico do amostrador ao fundo:	0.100 m

Figura 35-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	35.00 %	
0.0156-0.0625	25.00 %	
0.002-0.0625	50.00 %	
0.0625-0.125	2.00 %	30.10 %
0.125-0.250	15.00 %	37.90 %
0.250-0.500	23.00 %	28.00 %
0.500-1.000	0.00 %	4.00 %
1.000-2.000		0.00 %
2.000-4.000		0.00 %
4.000-8.000		0.00 %
8.000-16.000		
TOTAIS:	100.00 %	100.00 %

Figura 36-Dados da distribuição granulométrica do material do leito e em suspensão.

A granulometria do material de leito é a mesma utilizada no cálculo da descarga sólida do material de leito pela fórmula de Yang para areias. Os dados do material em suspensão são, em sua maioria, os mesmos utilizados no cálculo da descarga sólida em suspensão no item 8.

No entanto, não foi disponibilizada a distribuição granulométrica do material em suspensão coletado no dia 31 de março de 2009. Por esse motivo, para o cálculo da descarga sólida total pelo método modificado de Einstein foi utilizada a distribuição granulométrica de amostras coletadas com o amostrador automático ISCO na parte baixa da bacia Rincão do Soturno no período de inverno, o mais chuvoso na região. A bacia Rincão do Soturno possui pequeno porte e área de 11,98 km² e por isso foi utilizada a granulometria do material em suspensão dessa bacia já que não foi obtido para a bacia em estudo. Logo o cálculo não apresentará fielmente a descarga sólida total do rio Claro na seção 1 para o dia 31 de março de 2009. A Tabela 13 exhibe as distribuições granulométricas dos materiais coletados por Pereira (2010) nas duas bacias em estudo no seu trabalho (Rancho Amaral e Rancho do Soturno). Nesse trabalho foram utilizados apenas os dados granulométricos referentes à bacia Rincão do Soturno.

Tabela 13-Distribuição granulométrica do material sólido em suspensão coletado com amostrador ISCO.
Fonte: Pereira (2010).

Estação	D20	D35	D50	D65	D90
Período	Diâmetro (mm)				
Rancho do Amaral Primavera		0,0078	0,017	0,038	0,2
Rancho do Amaral Verão	0,004	0,013	0,03	0,084	0,34
Rancho do Amaral Inverno	0,0045	0,016	0,049	0,18	0,6
Rincão do Soturno Primavera		0,007	0,016	0,03	0,2
Rincão do Soturno Inverno	0,004	0,015	0,035	0,14	0,38

Além disso, para completar os dados do input mostrado na Figura 35 foram utilizadas as informações da batimetria realizada no dia 31 de março de 2009 na seção em estudo do rio Claro (seção 1).

Por interpolação entre as velocidades dos pontos 4 e 5 registrados na batimetria, obteve-se a velocidade no ponto A é 0,7224 m/s.

Adotou-se a profundidade média equivalente a área dividida pela largura. Sendo a área obtida pela batimetria igual à 4,550 m² e a largura igual a 9,30 m, dessa forma, tem-se uma profundidade média igual a aproximadamente 0,489 m. No ponto da coleta com o amostrador DH-48, verificou-se uma profundidade de 0,68 m.

A Figura 37 mostra o resultado dos cálculos da descarga total pelo método modificado de Einstein.

Obteve-se um valor de 109,432 t/dia para a descarga total de sólidos na seção 1 do rio Claro.

CÁLCULO DA DESCARGA TOTAL DE SEDIMENTOS - MÉTODO MODIFICADO DE EINSTEIN

Rio: **Rio Claro** Local: **Rio Claro-ponle**
 Data: **25/04/2000** Medição sólida n.º: **1**
 Entidade: Medição líquida n.º: **1**
 Código: Amostradores: **DH-48**

Molinete n.º:
 Calculado por: **Anderson Braga**
 Conferido por: **Newton Carvalho**
 Data: **18/03/2002**

Dados:
 Q: **3.240 m³/s** L: **9.300 m** V: **0.000000915 m/s²**
 v: **0.722 m/s** A: **4550.000 m²** D₅₀: **0.015 mm**
 p: **0.489 m** T: **25.00 °C** D₈₅: **0.140 mm**
 p: **0.667 m** p: **0.100 m** Concent.: **14.100 ppm**
 Q₁₀: **3.947 t/d**

Resultados das equações:
 (FS)₁₀: **0.00841** P: **11.694** Z₁₀: **1.311**
 U₁₀: **0.02634** A: **0.150** A: **0.489**
 delta: **0.00040** K_ddelta: **0.34730** Percentagem de escoamento na zona amostrada: **89.6 %**
 %: **1.134** Descarga em suspensão total na zona amostrada: **3.538 t/d**

CÁLCULO DE I _{Qz}											CÁLCULO DA DESCARGA SÓLIDA TOTAL											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	
Tamanho dos grãos (mm)	D (mm)	ρsf	h	5.33D ³ / π × 10 ⁻⁵	I _z (%)	I _z × 10 ¹⁰ cm ⁻¹	I _z (t/d)	I _z (%)	Q ²	Multiplicadores	Z ²	A ² × 10 ⁻³	J ² ₁	J ² ₂	J ² ₃	J ² ₄	(P ² ₁ +J ² ₂) / (P ² ₁ +J ² ₂)	I ² ₁	I ² ₂	P ² ₁ +I ² ₂ / +1	Descarga sólida total (t/d)	
0.000-0.015	0.0056			0.0706					12	0.006	0.008	0.023	0.846	-0.668	1.000	-1.013	1.145	8.8E-03	-8.8E-03	9.2E-04	1.48	
0.015-0.062	0.0312			0.8289				25.00	0.9	0.12	0.147	0.128	0.806	-0.611	1.036	-1.313	1.226	4.7E-02	-5.9E-02	4.9E-03	1.085	
0.062-0.125	0.0393			0.1945				90.00	1.8	0.032	0.033	0.048	0.830	-0.074	1.001	-1.080	1.66	3.8E-02	-3.9E-03	3.9E-04	2.046	
0.125-0.250	0.1770			0.825	9.225	30.10	12.30	2.00	0.1	0.453	0.593	0.382	0.840	-0.843	1.850	-4.703	1.884	1.0E-01	-2.5E-01	9.3E-01	0.133	
0.250-0.500	0.3540			1.652	4.260	20.26	16.3	16.00	0.5	1.000	1.31	0.724	1.3E-00	-1.7E-00	2.5E-01	-1.3E-02	1.2E-01	0.583	-2.871	4.843	78.842	
0.500-1.000	0.7070			3.304	15.72	35.500	28.00	16.63	2.6	1.658	2.172	1.448	3.3E-00	-4.9E-00	1.9E-03	-1.0E-04	3.1E-02	0.182	-1.041	2.090	26.248	
1.000-2.000	1.4100			6.598	0.330	100.20	4.00	1.32	0.8	2.466	3.232	2.892	1.3E-01	-2.1E-01	2.0E-05	-1.1E-06	9.7E+03	0.096	-0.519	1.604	1.706	
2.000-4.000	2.8300					282.20				3.182	4.184	5.767	5.1E-01	-8.5E-01	4.1E-06	-2.0E-07	5.5E+04	0.067	-0.325	1.483		
4.000-8.000	5.6600					802.43				4.079	5.346	11.975	2.9E+02	-5.0E+02	-2.3E-08	-2.3E-08	1.4E+05	0.049	-0.207	1.384		
8.000-16.000	11.320					2289.6				5.302	6.948	23.149	3.5E+03	-6.2E+03	7.4E-08	-2.7E-09	1.7E+05	0.035	-0.127	1.284		
TOTAL																						109.432
						49.51	39.8	100.00	3.5													

Figura 37-Resultado da aplicação do método modificado de Einstein.

10 Resultados e Discussões

Nesse trabalho pode-se observar qualitativamente, no item 6, as alterações no nível d'água ocasionadas pelas ocorrências de chuvas. Nos dados analisados referentes ao ano de 2008, coletados pela plataforma de coleta de dados 32521 do CPTEC, observou-se intervalos de 2h a 9h entre as ocorrências de máximos locais de chuvas e máximos locais de nível.

No item 5, através dos dados coletados nos anos de 2007, 2008 e 2009 pode-se traçar a curva-chave da seção 2 (30 m juzante da plataforma de coleta de dados 32521). Para obtenção da curva-chave dispoñdo-se de 7 pontos nível x vazão em vazões baixas e dadas as características do escoamento no rio Claro optou-se por utilizar o método Logarítmico. A aplicação do método gerou as seguintes curvas chaves exibidas nas equações 32 e 33 respectivamente para as seções 1 e 2:

$$Q = 0,35177(\Delta h)^{0,6561} \quad \text{e} \quad Q = 0,028016(\Delta h)^{1,04638}$$

Após calculada a curva-chave da seção em estudo no rio Claro foram abordados os cálculos de transporte de sedimentos.

O transporte de sedimentos foi dividido em duas etapas:

- o transporte de material sólido do leito (partículas saltitantes e material de arrasto)
- o transporte de material sólido em suspensão

A soma dessas duas parcelas resulta na descarga total de sólidos.

A descarga de material do leito foi calculada de forma indireta através da fórmula de Yang para areias. Analisadas as características do rio Claro concluiu-se que essa fórmula era adequada ao cálculo no rio em estudo.

A aplicação da fórmula, com o uso de dados do material de leito do rio Claro obtidos no dia 23 de fevereiro de 2008 por Perdomo resultou em:

$$Q_{SML} = 9,8135Q \text{ (kg} \cdot \text{s}^{-1}\text{)}$$

Já o transporte de sedimentos em suspensão foi calculado para coleta direta de dados na seção 1 nos dias 23 de fevereiro de 2008 e 31 de março de 2009.

Como resultado dos cálculos foi obtido uma descarga de sólidos em suspensão de 16, 918 kg/s no dia 23 de fevereiro de 2008 e 45,689 kg/s no dia 31 de março de 2009.

Assim para os dois dias de coletas do material em suspensão têm-se os valores de descargas sólidas exibidos na Tabela 14.

Tabela 14-Descargas sólidas para os dias 23/02/2008 e 31/03/2009.

	Vazão (m ³ /s)	Descarga sólida de material de leito por Yang (kg/s)	Descarga sólida em suspensão (kg/s)	Descarga sólida total (kg/s)
23/02/2008	2,33	22,865	16,918	39,783
31/03/2009	3,24	31,796	45,689	77,485

A descarga sólida total também foi calculada aplicando-se o método modificado de Einstein para o dia 31 de março de 2009. Obteve-se o seguinte valor:

$$Q_{\text{total}} = 109,432 \text{ t/dia} = 1,267 \text{ kg/s}$$

Percebe-se que há grande disparidade entre o valor calculado pelo método de Einstein modificado e a somatória da descarga de material de leito e a descarga em suspensão. O método de Einstein modificado apresentou valor muito abaixo do esperado, a discrepância se deve ao fato de ter sido utilizado uma distribuição granulométrica de uma bacia de pequeno porte já que não foram obtidos os dados dessa distribuição no dia 31 de março de 2009. Ou seja, foi utilizada a granulometria do material em suspensão de uma bacia localizada em outro lugar, com outra geomorfologia, tamanho, vegetação etc.

Comparando-se a descarga sólida e suspensão do Rio Claro com rio de grande porte como o Amazonas percebe-se coerência nos valores encontrados. O rio Amazonas possui descarga sólida em suspensão de 5.232kg/s (com uma vazão média da ordem de 109.000 m³/s e 290.000 m³/s na estação de chuva), ou seja, por volta de 116 vezes maior que a descarga do rio Claro no dia 31 de março de 2009 e cerca de 327 vezes maior em comparação a descarga em suspensão no dia 23 de fevereiro de 2008

Outro aspecto notável é a representatividade do transporte de material do leito no transporte total de sedimentos. O fato é esperado uma vez que o rio Claro, no dia 31 de março de 2009, apresentava-se bastante raso, em rios largos e rasos é esperada uma grande proporção do transporte de material do leito em comparação ao transporte do material em suspensão.

10.1 Recomendações

Para obtenção de um estudo mais completo sobre a relação entre a ocorrência de chuvas e o transporte de sedimento no rio Claro seria interessante uma análise quantitativa dos dados que relacionam os índices pluviométricos e as alterações do nível do rio Claro. A relação nível x pluviosidade é útil para a entrada de dado de nível na curva chave já determinada nesse trabalho, dada a dificuldade do equacionamento de uma função $h=f(\text{pluviosidade})$ é indicada uma abordagem baseada em modelamentos.

Além disso, é recomendável a realização de uma grande campanha de coleta de dados para obtenção de medições de descarga sólida em suspensão. Essa campanha torna-se interessante para obtenção de uma curva de transporte de sedimentos em suspensão em função da vazão. Vale ressaltar, que dadas as características de grande alteração de vazão em pequeno intervalo de tempo é recomendável a utilização de coletores de amostras automáticos como o ISCO.

A obtenção dessa curva somando-se a curva de descarga de material do leito já determinada nesse trabalho gera o equacionamento da descarga sólida total em função da vazão. Pode também determinar a granulometria dos sedimentos em suspensão e utilizar o método de Einstein modificado para o cálculo direto da descarga sólida total.

Através desse trabalho e as recomendações citadas pode-se determinar numericamente o transporte de sedimento na seção de estudo do rio Claro para uma dada previsão de chuva.

11 Conclusões

A região do litoral norte paulista costuma sofrer problemas no abastecimento de água principalmente no período de veraneio. Os problemas no abastecimento da região têm relação com o transporte de sedimentos, uma vez que seu excesso na seção de captação no rio Claro danifica o sistema de tratamento de água da concessionária local.

Para uma programação da captação de água bruta a fim de evitar a entrada excessiva de sedimentos na estação de tratamento torna-se interessante quantificar o descarga sólida no rio Claro em função de previsões de chuva.

Dessa forma, a empresa concessionária, nos momentos que eu houver previsão de carga sólida excessiva no rio Claro nos dias subseqüentes, poderá programar-se e realizar uma reserva de água bruta ou se de água tratada evitando a captação de água prejudicial ao sistema de tratamento de água devido ao excesso de sedimentos.

A equalização da relação entre pluviosidade e transporte de sedimentos pode seguir a sequência:

- a) Obtenção da curva que relacione nível da seção com a pluviosidade;
- b) Obtenção da curva-chave (vazão em função do nível);
- c) Obtenção do transporte de material do leito em função da vazão;
- d) Obtenção do transporte de material em suspensão em função da vazão.

Nesse trabalho foram desenvolvidos os itens b e c. Além disso, foi calculado para um dia específico a descarga sólida em suspensão e a descarga sólida total para fins avaliativos da descarga sólida no rio Claro.

Para o dia 31 de março de 2009 obteve-se uma descarga sólida total de 77,49 kg/s esse é um valor

12 Referências Bibliográficas

Andrade ,M. A. R.; Vendrame , I. & Mendes Filho W. M. 2009. *Determinação do potencial de erosão, na bacia do rio Claro, utilizando a equação universal de perdas de solos.*, 8º Simpósio Nacional de Controle de Erosão, março de 2009.

Andrade, Mateus Augusto Rocha. 2009. *Aplicação de modelos hidrossedimentológicos para estuda da produção e transporte de sedimentos em uma bacia do litoral norte paulista.* São José dos Campos : s.n., 2009.

Avaliação de Métodos de Cálculo do Transporte de Sedimentos em um Pequeno Rio Urbano. **Fábio A Beling, João Batista de Paiva, Juliana Scapin. 2007.** s.l. : revista brasileira de Recursos , 2007, Vol. 12. 4.

B. R. Colby, C. H. Hembree. 1955. *Computation of total sediment discharge: Niobara river near Cody, Nebraska.* Washington D. C. : U. S. Geological survey, Water Supply Paper, 1955. 1357.

B. R. Colby, D. W. Hubbell. 1955. *Simplifield methods for computing total sediment discharge with modified Einstein procedure.* Washington D. C. : U. S. Geological Survey, Water Supply paper., 1955. 593.

Carvalho. 1994. *Hidrossedimentologia Prática.* Rio de Janeiro : s.n., 1994.

Carvalho, N. O. 2008. *Hidrossedimentologia Prática.* Rio de Janeiro-RJ : Interciência, 2008.

Chow, V. T. 1983. *Handbook of Applied Hydrology.* New York : McGraw-Hill, 1983.

Colby, B. R. 1957. *Relationship of unmeasured sediment discharge to mean velocity.* s.l. : Transaction Amer Geophysics Union, 1957.

Delquiario. 2010. *Estudo de Concepção do Sistema de Abastecimento de Água de Caraguatatuba e São Sebastião.* 2010.

Desing of stable channels. **Lane, E. W. 1955.** s.l. : Transaction of American Society of Civil Engineers, 1955, Vol. 120. 2776.

Douglas G.Glysson, Edward. 1999. *Sediment Transport Curves.* Reston, VA : U. S. Geological Survey, 1999.

E. Meyer-Petter, R Müller. 1948. *Formula for Bed-Load Transport.* Stockholm : International Associate for Hydraulic Structure, 1948.

Einstein, H A. 1950. *The load function for sediment transportation in open channels.* Washington D. C. : Technical Bulletin, Soil Conservation Service , U.S.D.A., 1950. 1026.

Engelung, F. 1967. *A Sedimental Transport Model for Strainght Alluvial Channels.* s.l. : Nordic Hydrology, 1967. 7.

K. G. RANGA RAJU, R. J. GARDE. 1985. *Mechanics of sediment transportation and alluvial stream.* Nova York : John Wiley & Sons, 1985.

Luis Eduardo Gregollin Grisotto, Arlindo Philippi Jr. 2003. *Desafios da gestão da água no limiar do século XXI. Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos.* 2003.

Neto, Ary Torres de Araújo. 2008. *Desenvolvimento de prtótipo de coletor automático destinado à coleta de amostrasde água em corpos aquáticos para análise em laboratório.* Natal, RN : s.n., 2008.

Os fundamentos geológicos do relevo paulista. **Almeida, F. F. M. 1964.** s.l. : Boletim do Instituto de Geografia e Geologia, 1964, Vol. 41.

Perdomo, Carolina. 2010. *Influência das Propriedades Físico-Mecânicas e Hídricas do Solo na Susceptibilidade a Escorregamentos em Vertente Declivosa na Serra do Mar emCaraguatatuba.* São Paulo : s.n., 2010.

Pereira, Marco Alésio figueiredo. 2010. *Processos hidrossedimentológicos em diferentes escalas espaço temporais no bioma Mata Atlântica.* Santa Maria : s.n., 2010.

R. C. V. Vieira da Silva, G Wilson-Jr. 2005. *Hidráulica Fluvial.* Rio de Janeiro : COPE/ UFRJ, 2005.

S.Cheng, N. 2004. *Analysis of Bed-Load Transport in Laminar Flows.* 2004.

Santos. 2001. *Hidrometria Aplicada.* Curitiba-PR : EHPA, 2001.

Secondary currents in straight channels. **Einstein, H. A. 1958.** s.l. : Transaction of American Geophysics Union, 1958, Vol. 39.

Sefione, André Luiz. 2002. *Estudo comparativo de métodos de extrapolação superior de curvas-chaves.* Porto Alegre : s.n., 2002.

Vendrame, 2010.I..Relatório parcial do projeto FEHIDRO CBH-LN, CETESB, 2010

2010. www.cobrape.com.br/det_noticia. *Cobrape.* [Online] Plátamo Comunicação Ltda., maio 6, 2010. [Cited: junho 25, 2010.]

2010.walderiapoliticaecidadania.blogspot.com/2010/09/berlusconi-descarta-eleicoes.html., Da Reuters. [Online] [Cited: novembro 26,2010]

2010. www.hidromechc.com.br/hidrometria[Online][Cited: novembro 26, 2010]

FOLHA DE REGISTRO DO DOCUMENTO

1. CLASSIFICAÇÃO/TIPO <p style="text-align: center;">TC</p>	2. DATA <p style="text-align: center;">25 de novembro de 2010</p>	3. REGISTRO N° <p style="text-align: center;">DCTA/ITA/TC-139/2010</p>	4. N° DE PÁGINAS <p style="text-align: center;">98</p>
5. TÍTULO E SUBTÍTULO: Análise do transporte de Sedimentos na Bacia do Rio			
6. AUTOR(ES): Joice Faria Amaral			
7. INSTITUIÇÃO(ÕES)/ÓRGÃO(S) INTERNO(S)/DIVISÃO(ÕES): Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA			
8. PALAVRAS-CHAVE SUGERIDAS PELO AUTOR: Transporte de sedimento, curva-chave, fórmula de Yang para areias			
9. PALAVRAS-CHAVE RESULTANTES DE INDEXAÇÃO:			
10. APRESENTAÇÃO: <div style="text-align: right; margin-right: 50px;"> <input checked="" type="checkbox"/> Nacional </div> <div style="text-align: right; margin-right: 50px;"> <input type="checkbox"/> Internacional </div> <p>ITA, São José dos Campos. Curso de Graduação em Engenharia Civil-Aeronáutica. Orientadora: Íria Fernandes Vendrame. Publicado em 2010.</p>			
11. RESUMO: <p style="text-indent: 40px;">O transporte de sedimentos na bacia do Rio Claro interfere na vida da população na região do litoral norte paulista. O estudo da descarga sólida no Rio Claro possui grande utilidade em programas que visam evitar os problemas causados por descargas sólidas excessivas.</p> <p style="text-indent: 40px;">Em contribuição a esse estudo, no trabalho apresentado foi determinada a função que descreve a descarga sólida de material de leito a partir da utilização do método indireto de cálculo desenvolvido por Yang (1973) para areias.</p> <p style="text-indent: 40px;">Além disso, foi determinada a curva-chave para a seção do Rio Claro em estudo e avaliado qualitativamente a relação das ocorrências de chuvas com as alterações do nível do Rio Claro</p> <p style="text-indent: 40px;">Para realização do trabalho foi realizada uma ampla revisão bibliográfica sobre tópicos relacionados a sedimentologia.</p> <p style="text-indent: 40px;">Por fim, o trabalho exemplifica o cálculo da descarga sólida total para dados coletados no dia 31 de março de 2009 no Rio Claro.</p>			
12. GRAU DE SIGILO: <input checked="" type="checkbox"/> OSTENSIVO <input type="checkbox"/> RESERVADO <input type="checkbox"/> CONFIDENCIAL <input type="checkbox"/> SECRETO			