

FERNANDO RIBAS TERABE

**ESTUDO SOBRE O USO DO PERFILADOR ACÚSTICO DE
CORRENTE POR EFEITO DOPPLER (ADCP) PARA MEDIÇÃO
DO TRANSPORTE SÓLIDO EM SUSPENSÃO**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental do Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre.

Orientador: Prof. José Junji Ota

CURITIBA
2003

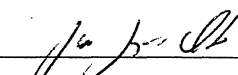
**ESTUDO SOBRE O USO DO PERFILADOR ACÚSTICO DE CORRENTE
POR EFEITO DOPPLER (ADCP) PARA MEDIÇÃO DO TRANSPORTE
SÓLIDO EM SUSPENSÃO**

por


FERNANDO RIBAS TERABE

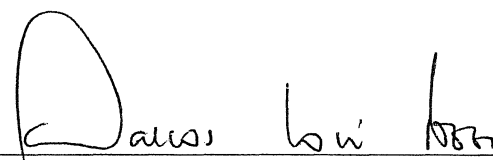
Dissertação aprovada como requisito parcial para a obtenção do Título de Mestre no Curso de Pós-graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental do Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, pela comissão formada pelos professores:

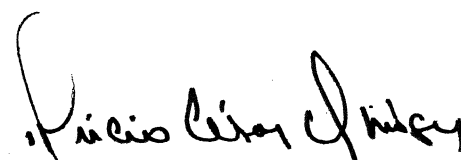
ORIENTADOR:


JOSÉ JUNJI OTA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

MEMBROS:


PÉRICLES ALVES MEDEIROS
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA


MARCOS JOSÉ TOZZI
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ


JULIO CÉSAR OLINGER
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

Curitiba, 26 de setembro de 2003.

A Deus
e a meus pais.

AGRADECIMENTOS

Ao amigo e professor José Junji Ota pelo incentivo para a realização do curso de Mestrado e por sua valiosa orientação neste trabalho.

Ao saudoso amigo e professor Sinildo Hermes Neidert, com quem tive a privilégio de conviver e trabalhar na área de transporte de sedimentos.

Ao Centro de Hidráulica e Hidrologia Professor Parigot de Souza (CEHPAR) que, ao longo de sua história, permitiu o desenvolvimento tecnológico e a formação de profissionais de reconhecida competência, sem a colaboração dos quais o curso não teria o mesmo valor.

Ao professor Ralph Carvalho Groszewicz e ao Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC) pela oportunidade de realização do curso de Mestrado.

À Companhia Paranaense de Energia (COPEL), em especial ao Engenheiro Homero Buba, pela oportunidade do desenvolvimento do tema deste estudo.

Ao professor Roberto Mayerle da Universidade Christian Albrechts (Kiel, Alemanha) pela colaboração repassando-nos sua experiência no assunto deste trabalho.

Aos professores do curso de Mestrado pela sua dedicação e pelos conhecimentos ensinados.

Aos amigos e colegas de trabalho André Fabiani, Márcio Friedrich e Paulo Povh pela amizade, pelo apoio e pelas boas discussões sobre o tema que ajudaram a superar as dificuldades e orientar os rumos deste estudo.

Aos amigos e colegas Irani dos Santos, Edie Taniguchi e Ronaldo da Silva que participaram diretamente dos trabalhos de desenvolvimento de equipamentos e coleta de dados em campo.

À estagiária de Engenharia Civil Mariana Paes pela ajuda no processamento dos dados.

À Márcia Regina Chella pelo apoio e pela ajuda durante a realização do curso.

Aos meus pais Takayuki e Ana Maria pelo apoio e por entenderem a minha ausência durante os anos de realização do curso.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	vii
LISTA DE TABELAS.....	x
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xi
RESUMO.....	xiv
ABSTRACT.....	xv
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 TRANSPORTE DE SEDIMENTOS.....	3
2.1 Processos de Transporte de Sedimentos.....	3
2.2 Propriedades dos Sedimentos.....	4
2.3 Início do Movimento das Partículas.....	6
2.3.1 Tensão tangencial crítica.....	6
2.3.2 Velocidade de corte.....	7
2.3.3 Diagrama de Shields.....	8
2.4 Cálculo do Transporte de Sedimentos.....	10
2.4.1 Transporte sólido por arraste de fundo.....	10
2.4.2 Transporte sólido por suspensão.....	12
2.4.2.1 Modelo Difusão-Dispersão.....	13
2.4.2.2 Consideração de Rouse (1937).....	14
2.4.2.3 Variação da Constante de Von Karmán (k) com a Concentração de Sedimentos.....	16
2.4.2.4 Consideração de Lane et al. (1941).....	17
2.4.2.5 Cálculo da Descarga de Sedimentos por Suspensão.....	18
2.4.3 Transporte total.....	18
2.5 Definição do Modo de Transporte.....	19
3 MÉTODOS DE AMOSTRAGEM PARA DETERMINAÇÃO DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO.....	20
3.1 Amostragem Mecânica.....	20
3.1.1 Amostrador USP-61.....	21
3.1.2 Amostrador USD-49.....	22
3.1.3 Amostrador USD-96 (Amostrador de Saca).....	23
3.1.4 Amostrador por bombeamento.....	23
3.1.5 Limitações da amostragem mecânica.....	23
3.2 Amostragem Óptica.....	24
3.2.1 Amostradores ópticos.....	25
3.2.2 Limitações da amostragem óptica.....	27
3.3 Amostragem Acústica.....	27
3.3.1 Amostradores acústicos.....	27
3.3.1.1 Monitor de Transporte de Areia Ultra-sônico.....	28
3.3.1.2 Sistema de Perfilamento Acústico.....	28
3.3.2 Limitações da amostragem acústica.....	31
3.3.3 Fatores que influenciam a amostragem acústica.....	32

3.3.3.1	Expansão do Feixe Acústico.....	32
3.3.3.2	Absorção da Energia Acústica pela Água.....	32
3.3.3.3	Sedimentos.....	32
3.3.3.4	Presença de Outras Partículas.....	33
3.3.3.5	Salinidade e Temperatura.....	33
3.3.3.6	Bolhas de Ar.....	33
3.3.3.7	Erros do Instrumento.....	33
3.3.4	Conversão do sinal acústico em concentração de sedimentos em suspensão.....	34
3.3.4.1	Método de DEINES [1999].....	34
3.3.4.2	Método de PATINO e BYRNE [2001].....	37
3.3.4.3	Método de GARTNER [2002].....	38
3.3.4.4	Dados de Intensidade do Eco.....	39
3.3.5	Critério para avaliação da eficiência do método de conversão.....	40
4	APLICAÇÃO DA AMOSTRAGEM ACÚSTICA.....	42
4.1	Medição do Fluxo de Sedimentos com ADCP na Bacia Amazônica.....	42
4.2	Amostragem Acústica em Áreas Costeiras.....	43
4.3	Eficiência do Amostrador Acústico na Estimativa da Concentração de Sedimentos em Suspensão.....	46
4.4	Avaliação de Métodos Empíricos para Conversão do Sinal Acústico em Concentração de Sedimentos em Suspensão.....	51
5	ESTUDO DE CASO.....	55
5.1	Local de Coleta dos Dados.....	55
5.2	Equipamentos Utilizados.....	57
5.2.1	Amostradores mecânicos.....	58
5.2.2	Equipamento acústico – ADCP.....	60
5.3	Metodologia Aplicada na Coleta das Amostras.....	61
5.4	Processamento dos Dados.....	63
5.5	Conversão do Sinal Acústico em Concentração de Sedimentos em Suspensão.....	69
5.5.1	Aplicação do método proposto por DEINES [1999].....	70
5.6	Granulometria dos Sedimentos.....	77
5.7	Análise dos Resultados Obtidos.....	79
5.7.1	Dados coletados em campo.....	79
5.7.2	Resultados obtidos pela amostragem acústica.....	80
5.7.3	Comparação com perfis analíticos de concentração de sedimentos em suspensão.....	82
5.7.4	Cálculo da descarga de sedimentos por suspensão.....	86
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	87
6.1	Conclusões.....	87
6.2	Recomendações.....	91
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	93
	ANEXO.....	95

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	– Velocidade de queda de partículas de quartzo.....	5
Figura 2.2	– Diagrama de Shields com dados de White.....	9
Figura 2.3	– Plotagem da função de Einstein.....	11
Figura 2.4	– Comparação entre as equações de Einstein e Meyer-Peter – Chien (1954).....	12
Figura 2.5	– Transporte de sedimentos para dentro e fora do volume de controle.....	13
Figura 2.6	– Distribuição de sedimentos em suspensão - comparação entre dados experimentais e a Equação 2.15 (Vanoni, 1946).....	15
Figura 2.7	– Variação da constante de Von Karmán (k) com a concentração de sedimentos em suspensão (Einstein e Chien, 1955).....	17
Figura 2.8	– Razão entre transporte de sedimentos em suspensão e transporte total.....	19
Figura 3.1	– Amostrador USP-61.....	22
Figura 3.2	– Princípios de medição da amostragem óptica.....	25
Figura 3.3	– Curva de calibragem do “ <i>transmissometer</i> ”.....	26
Figura 3.4	– Comparação entre curvas de calibragem de amostradores ópticos.....	26
Figura 3.5	– ADCP – <i>RD Instruments</i> e ADP – <i>SonTek</i>	29
Figura 3.6	– Esquema de operação do ADCP com quatro transdutores.....	30
Figura 3.7	– Levantamento de uma seção transversal com o ADCP.....	31
Figura 3.8	– Esquema de conversão do sinal acústico em concentração de sedimentos.....	36
Figura 4.1	– Distinção entre rios de águas brancas e rios de águas pretas/claras.....	43
Figura 4.2	– Variação temporal observada em dados coletados em diferentes campanhas de medição em Óbidos.....	43
Figura 4.3	– Plotagem da velocidade contra o tempo e a profundidade.....	44
Figura 4.4	– Intensidades do sinal acústico registradas pelo ADP.....	45
Figura 4.5	– Calibragem da intensidade do sinal acústico registrada pelo ADP com concentrações medidas com OBS.....	46
Figura 4.6	– Mar do Norte da Alemanha – locais de medição.....	47

Figura 4.7	– Comparação entre concentrações de sedimentos obtidas por equipamentos acústico e óptico – nível de referência a 1 m do fundo.....	48
Figura 4.8	– Comparação entre medições ópticas e acústicas considerando diferentes níveis de referência.....	49
Figura 4.9	– Distribuição de concentrações de sedimentos em suspensão uniforme ao longo da vertical.....	50
Figura 4.10	– Distribuição não uniforme de concentrações de sedimentos em suspensão ao longo da vertical.....	50
Figura 4.11	– Comparação entre medições ópticas e acústicas para diferentes níveis de referência – método de DEINES [1999].....	52
Figura 4.12	– Comparação entre medições ópticas e acústicas para diferentes níveis de referência – método da SONTEK [2002].....	52
Figura 4.13	– Comparação entre medições ópticas e acústicas – método proposto por PATINO e BYRNE [2001].....	53
Figura 4.14	– Comparação entre medições ópticas e acústicas – método proposto por GARTNER [2002].....	53
Figura 5.1	– Localização das seções de medição.....	55
Figura 5.2	– Rio Piquiri – seção Balsa Santa Maria.....	56
Figura 5.3	– Rio Ivaí – seção Novo Porto Taquara.....	57
Figura 5.4	– Embarcação utilizada nas coletas de dados de campo.....	57
Figura 5.5	– Amostrador USP-61 – testes no laboratório.....	58
Figura 5.6	– Sistema de amostragem por bombeamento.....	59
Figura 5.7	– Gráfico da velocidade na entrada do amostrador contra o diâmetro do orifício acoplado ao final da mangueira.....	60
Figura 5.8	– Perfilador acústico de corrente (ADCP).....	60
Figura 5.9	– Posição das verticais de amostragem (A, B, C, D e E) ao longo da seção transversal.....	62
Figura 5.10	– Coleta das amostras ao longo das verticais de amostragem.....	62
Figura 5.11	– Velocidades e sinais acústicos registrados no rio Piquiri.....	67
Figura 5.12	– Velocidades e sinais acústicos registrados no rio Ivaí.....	68
Figura 5.13	– Plotagem das concentrações de sedimentos estimadas pelo método de DEINES [1999] contra concentrações de sedimentos medidas com amostrador mecânico.....	70

Figura 5.14	– Perfis de concentrações de sedimentos estimados pelo método de DEINES [1999] – rio Piquiri.....	71
Figura 5.15	– Perfis de concentrações de sedimentos estimados pelo método de DEINES [1999] – rio Ivaí.....	72
Figura 5.16	– Concentrações de sedimentos estimadas pelo método de DEINES [1999], usando a Equação 3.5 e K_M igual a 0,45, contra concentrações de sedimentos medidas com amostrador mecânico.....	73
Figura 5.17	– Perfis de concentrações de sedimentos estimados pelo método de DEINES [1999], usando a Equação 3.5 e K_M igual a 0,45 – rio Piquiri.....	74
Figura 5.18	– Perfis de concentrações de sedimentos estimados pelo método de DEINES [1999], usando a Equação 3.5 e K_M igual a 0,45 – rio Ivaí.....	75
Figura 5.19	– Comparação entre concentrações de sedimentos estimadas pelo método de DEINES [1999] e concentrações de sedimentos medidas com amostrador mecânico.....	76
Figura 5.20	– Curvas granulométricas dos sedimentos do rio Piquiri.....	77
Figura 5.21	– Curvas granulométricas dos sedimentos do rio Ivaí.....	78
Figura 5.22	– Dados históricos de concentração de sedimentos em suspensão nos rios Piquiri e Ivaí.....	79
Figura 5.23	– Plotagem das concentrações de sedimentos contra intensidades dos ecos.....	80
Figura 5.24	– Perfis de velocidades medidos com ADCP e perfis analíticos considerando a distribuição logarítmica de velocidades.....	83
Figura 5.25	– Comparação entre perfis analíticos e perfis medidos de concentração de sedimentos em suspensão – rio Piquiri.....	85
Figura 5.26	– Comparação entre perfis analíticos e perfis medidos de concentração de sedimentos em suspensão – rio Ivaí.....	85
Figura 6.1	– Transporte de sedimentos por suspensão.....	90

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1	– Fator e faixa de variação de r	41
Tabela 4.1	– Comparação dos quatro métodos de conversão (% de resultados corretos).....	54
Tabela 5.1	– Resumo dos dados coletados no rio Piquiri.....	64
Tabela 5.2	– Resumo dos dados coletados no rio Ivaí.....	65
Tabela 5.3	– Resumo dos dados coletados no rio Ivaí.....	66
Tabela 5.4	– Granulometria dos sedimentos do rio Piquiri.....	77
Tabela 5.5	– Granulometria dos sedimentos do rio Ivaí.....	78

LISTA DE SÍMBOLOS

C_i	–	Concentração estimada na célula (<i>bin</i>) número i
C_D	–	Coeficiente de arraste
C_r	–	Concentração de sedimentos em suspensão medida no nível de referência
C_y	–	Concentração de sedimentos a distância y do leito
\bar{C}	–	Concentração média por peso de um dado tamanho de partícula com velocidade de queda ω
d	–	Diâmetro da partícula
d_{50}	–	Diâmetro da partícula para o qual 50% do peso total da amostra têm diâmetro inferior
D	–	Tamanho da célula configurado no ADCP
D_x	–	Coeficiente de difusão turbulenta na direção x
D_y	–	Coeficiente de difusão turbulenta na direção y
D_z	–	Coeficiente de difusão turbulenta na direção z
\bar{D}_y	–	Coeficiente de difusão turbulenta médio ao longo da direção y (vertical)
E_i	–	Intensidade do eco medida na célula (<i>bin</i>) de número i , em <i>counts</i>
E_r	–	Intensidade do eco medida no nível de referência, em <i>counts</i>
Ec_i	–	Intensidade do eco corrigida correspondente a célula de número i , em dB
Ec_r	–	Intensidade do eco corrigida medida no nível de referência, em dB
g	–	Aceleração da gravidade
g'_s	–	Transporte de sedimentos em termos de peso submerso por segundo
h	–	Profundidade do escoamento
k	–	Constante de Von Karmán
K_c	–	Fator de escala de intensidade do eco
K_s	–	Inverso do coeficiente de Manning do canal devido à forma e grãos
K'_s	–	Inverso do coeficiente de Manning devido aos grãos apenas
L	–	Comprimento do pulso acústico
P	–	Potência transmitida pelo transdutor
q_s	–	Taxa de transporte de sedimentos por arraste de fundo
q_{ss}	–	Taxa de transporte de sedimentos por suspensão

R	–	Raio hidráulico
R_i	–	Distância ao longo do feixe acústico, do ADCP até a profundidade na qual está sendo medida a intensidade do eco E_i
R_r	–	Distância ao longo do feixe acústico, do ADCP até o nível de referência
Re^*	–	Número de Reynolds de corte da partícula
s	–	Salinidade
S	–	Declividade da linha de energia
S_0	–	Declividade do leito do canal
$S.F.$	–	Fator de forma
S_s	–	Densidade relativa do sedimento
T	–	Temperatura
u	–	Velocidade local a distância y acima do leito
U	–	Velocidade média
u_x	–	Componente da velocidade na direção x
u_y	–	Componente da velocidade na direção y
u_z	–	Componente da velocidade na direção z
U_*	–	Velocidade de corte
y	–	Distância vertical a partir do leito
y'	–	Distância vertical a partir do leito onde a velocidade local u é igual a zero
α	–	Coefficiente de absorção acústica da água
ε_y	–	Viscosidade de torvelinho
γ	–	Peso específico da água
γ_s	–	Peso específico do sedimento
ν	–	Viscosidade cinemática do fluido (água 20°C – $\nu = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$)
θ	–	Ângulo do feixe acústico em relação ao eixo vertical do ADCP
ρ	–	Massa específica da água
ρ_s	–	Massa específica do sedimento
τ'_0	–	Tensão tangencial no leito devido aos grãos
τ_0	–	Tensão tangencial no leito

- τ_* — Parâmetro de Shields
- ψ_E — Parâmetro adimensional de intensidade de transporte de Einstein
- ω — Velocidade de sedimentação da partícula

RESUMO

A medição do transporte de sedimentos é fundamental para o controle e prevenção de problemas de sedimentação em reservatórios. No entanto, no Brasil, na maioria dos casos, não se dispõe de dados de transporte de sedimentos devido às dificuldades e custos da amostragem mecânica.

O Perfilador Acústico de Corrente por Efeito Doppler (ADCP) tem sido usado com sucesso em medições de vazão, portanto, uma tecnologia de medição de transporte de sedimentos usando o mesmo equipamento é de grande interesse. Este procedimento pode conduzir à obtenção das descargas líquida e sólida ao mesmo tempo. Embora o seu uso em campo esteja ainda em desenvolvimento e as informações disponíveis sejam muito escassas, sabe-se que a análise do sinal acústico pode permitir a determinação da concentração de sedimentos.

Este estudo focaliza o método de DEINES [1999] para conversão do sinal acústico em concentração de sedimentos em suspensão. Um estudo de caso foi realizado usando uma série de dados coletados nos rios Piquiri e Ivaí, ambos no estado do Paraná. O método de DEINES [1999] foi modificado considerando diferentes níveis de referência com o objetivo de obter um bom método de conversão. Este estudo confirmou a eficiência do equipamento acústico na determinação do transporte sólido em suspensão.

ABSTRACT

Measurement of sediment transport is fundamental for controlling and preventing reservoir sedimentation. However sediment transport data are not available in most of cases in Brazil due to the difficulty and cost of mechanical sediment sampling.

Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) has been used with success in measurements of streams, therefore, sediment transport measuring technology using the same equipment is of great interest. This procedure can lead to liquid and solid discharges at the same time. Although its use in the field is still in development and the available information is very poor, it is known that acoustic backscatter analysis can lead to sediment concentration.

This study focus upon DEINES [1999] method for conversion of acoustical backscatter to suspended sediment concentration. A case study was carried out by using a series of data collected in Piquiri and Ivaí rivers, both in Paraná state. DEINES method was modified considering different reference levels for sampling in order to obtain a good conversion method. This study confirmed the effectiveness of acoustic equipment in determination of suspended solid transport.

1. INTRODUÇÃO

A implantação de uma barragem modifica consideravelmente a dinâmica do transporte de sedimentos de um rio. A montante da barragem, o reservatório formado tenderá a reter a carga de sedimentos transportados pelo rio, pela diminuição da velocidade do fluxo. Ao passo que, a jusante da barragem, o fluxo menos carregado de partículas sólidas terá um potencial erosivo mais acentuado. Diversos problemas decorrentes dessa alteração na dinâmica do transporte de sedimentos já foram identificados, entre os quais pode-se destacar: a formação de deltas a montante dos reservatórios, impactos ecológicos a montante e a jusante do barramento e, principalmente, a perda da capacidade de armazenamento dos reservatórios, devido ao assoreamento. É importante considerar que, no Brasil, a energia elétrica é gerada, predominantemente, por usinas hidrelétricas com reservatório capaz de sofrer assoreamento.

O primeiro passo no sentido de prevenir ou controlar os problemas causados por sedimentos é a quantificação da vazão sólida no curso de água em questão. No entanto, as medições de vazão sólida em rios brasileiros são muito escassas, provavelmente, devido aos custos e dificuldades operacionais relativas às metodologias existentes.

Na natureza, a concentração de sedimentos em suspensão em cursos de água apresenta grande variação, podendo chegar a valores da ordem de 10^5 mg/l em alguns rios, como por exemplo, no rio *Puerco*, Novo México [MAYERLE; POERBANDONO, 2001]. Além disso, o tamanho das partículas sólidas e as condições de fluxo podem variar de um ambiente para outro, gerando dificuldades para quantificação precisa do transporte de sedimentos.

Durante a última década ocorreram avanços significativos no desenvolvimento de técnicas de medição de concentração de sedimentos em suspensão, entre as quais destacam-se as baseadas em princípios ópticos e acústicos. Essas técnicas apresentam a grande vantagem de obter medições contínuas de concentração de sedimentos em suspensão. No entanto, ainda necessitam de amostragens com equipamentos mecânicos para o estabelecimento de curvas de calibragem.

O Perfilador Acústico de Corrente por Efeito Doppler (ADCP) é um equipamento acústico bastante eficiente para medição de velocidades de escoamentos. O seu uso em medições de transporte de sedimentos em suspensão encontra-se ainda em estágio de desenvolvimento, porém com possibilidades muito promissoras. Em termos técnicos, a principal vantagem da aplicação do ADCP é possibilitar a realização de medições contínuas de perfis de concentração de sedimentos em suspensão, em conjunto com medições de perfis de velocidades, sem a necessidade de introduzir diretamente o equipamento no fluxo e, dessa forma, sem perturbar as condições locais do escoamento.

O objetivo principal deste estudo é verificar a eficiência do uso do ADCP para a avaliação do transporte de sedimentos em suspensão em rios, aplicando metodologias empíricas para conversão do sinal acústico do ADCP em perfis de concentração de sedimentos em suspensão.

A importância desse estudo deve-se ao fato de que o desenvolvimento do uso do ADCP propiciará a redução dos custos de levantamentos de campo em termos de transporte de sedimentos, permitindo a obtenção de grande quantidade de dados com boa resolução temporal e espacial. Portanto, essa técnica possibilitará a quantificação mais precisa do transporte de sedimentos em suspensão, permitindo a tomada de decisões corretas sobre como prevenir problemas com sedimentos e tornando mais preciso o cálculo da vida útil de reservatórios.

Como o ADCP é um instrumento de uso fácil, a aplicação do processo proposto poderia dar início à obtenção de dados sobre transporte de sedimentos em vários rios onde não se dispõe de informações sobre sedimentos.

2 TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

Os sedimentos são materiais fragmentados, formados principalmente pela desintegração física e química das rochas da crosta terrestre. As partículas de sedimentos variam em tamanho, desde grandes pedregulhos até dimensões coloidais e, em termos de formato, variam de arredondados a angulosos. Apresentam também variação no peso específico e na composição mineral, sendo quartzo o material predominante [VAN RIJN, 1993].

As partículas de sedimentos são desagregadas, portanto podem ser transportadas por gravidade, pelo vento ou pela água. O processo de remoção de sedimentos de sua fonte original ou do seu local de depósito é chamado erosão. O escoamento de água em um canal causa erosão dos materiais disponíveis nas margens e no leito até que o fluxo esteja carregado com tantas partículas de sedimento quanto a energia do escoamento o permita carregar [VAN RIJN, 1993].

2.1 Processos de Transporte de Sedimentos

As formas de movimento das partículas de sedimentos podem ser descritas considerando o escoamento de água sobre um leito de sedimentos inicialmente aplainado artificialmente. Com velocidades muito baixas nenhum sedimento irá se mover, porém, com velocidades um pouco maiores alguns grãos irão rolar ou deslizar ao longo do leito. Essa forma de deslocamento é chamada de transporte de fundo (*contact load*). Com velocidades ainda maiores alguns grãos vão dar pequenos saltos, deixando o leito por curtos instantes de tempo, e retornarão para se depositar ou continuar em movimento sobre o leito ou executar outros saltos (*saltation load*). A carga de sedimentos movimentada das duas formas, acima citadas, compõe o chamado de transporte por arraste de fundo (*bed load*). Se a velocidade do fluxo for aumentada gradualmente, os saltos executados pelas partículas vão ocorrer mais frequentemente e algumas partículas serão arrastadas para a região principal do fluxo pelas componentes ascendentes da turbulência, onde serão mantidas em suspensão por consideráveis períodos de tempo. Esse modo de transporte de sedimentos é conhecido como transporte em suspensão (*suspended load*) [VANONI, 1975].

O transporte em suspensão pode incluir também uma parcela composta por finas partículas de silte e argila, trazidas em suspensão de outros locais que não do leito do rio, provenientes, por exemplo, de erosões ou de desmoronamentos ao longo da bacia. Essa parcela formada por erosões de solo é chamada de transporte por lavagem (*wash load*).

O transporte por arraste de fundo e o transporte em suspensão podem ocorrer simultaneamente, mas a zona de transição entre os dois modos de transporte não é bem definida [VAN RIJN, 1993].

O transporte de sedimentos em cursos de água está fortemente ligado a erosão superficial do solo devido à chuva. As infiltrações de água no solo podem contribuir para deslizamentos de terra, que podem se tornar a maior fonte de sedimentos para rios [VAN RIJN, 1993].

2.2 Propriedades dos Sedimentos

O transporte e deposição dos sedimentos não dependem somente de características do escoamento envolvido, mas também das propriedades dos sedimentos. A propriedade mais importante dos sedimentos é o tamanho da partícula. Porém, para a obtenção de resultados corretos em estudos de transporte de sedimentos é necessária uma descrição precisa da forma, densidade e distribuição granulométrica dos sedimentos em questão.

A velocidade de queda de uma partícula caracteriza diretamente sua reação ao fluxo, portanto é também uma das propriedades mais importantes. Para uma esfera de diâmetro d , a velocidade de queda ω , para números de Reynolds $Re = \omega d / \nu$ menores que 1 é dada pela lei de Stokes:

$$\omega = \frac{gd^2}{18\nu} \left(\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \right) \quad (2.1)$$

na qual, ν e γ são, respectivamente, a viscosidade cinemática e o peso específico do fluido, g é a aceleração da gravidade e γ_s é o peso específico da esfera.

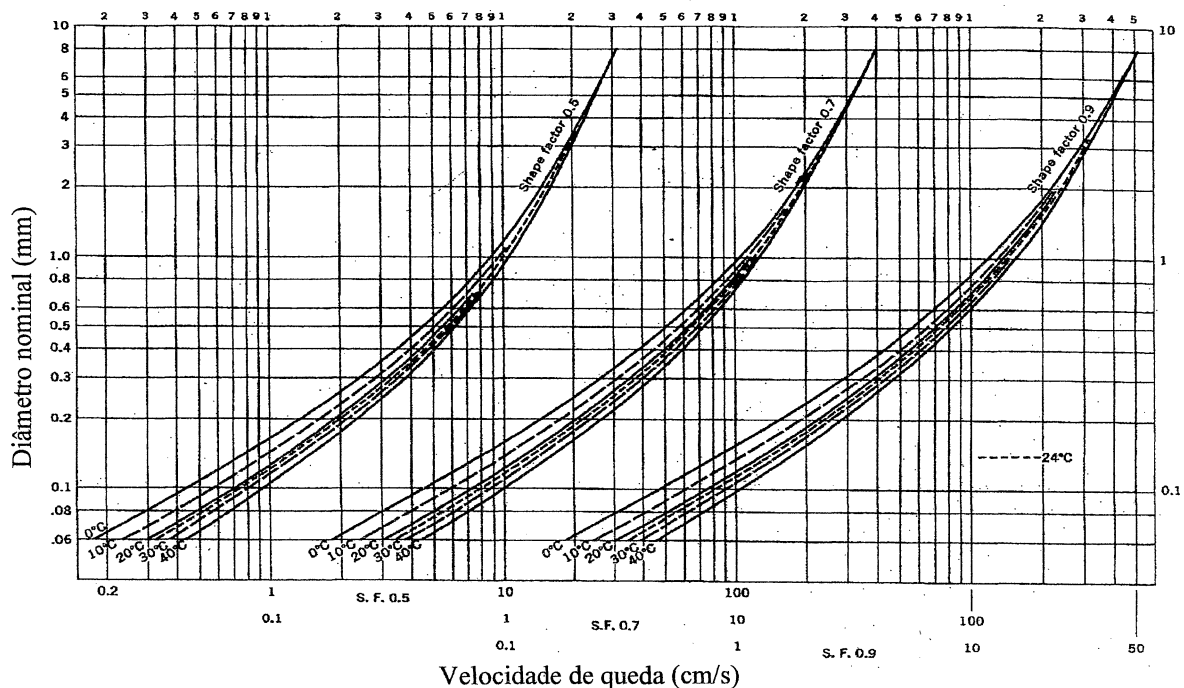
A velocidade de queda em função do coeficiente de arraste C_D é dada pela Equação 2.2:

$$\omega^2 = \frac{4}{3} \frac{gd}{C_D} \left(\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \right) \quad (2.2)$$

O coeficiente de arraste C_D na faixa de validade da lei de Stokes ($Re < 1$) é dado por $C_D = 24/Re$, deduzido teoricamente – ver DAILY e HARLEMAN [1966], e a substituição deste na Equação 2.2 conduz a Equação 2.1. Para números de Reynolds maiores que 1, o coeficiente de arraste C_D é função de Re e não pode ser expresso analiticamente, portanto deve ser determinado experimentalmente [VANONI, 1975].

Os sedimentos naturais não são verdadeiramente esféricos e a velocidade de queda depende do seu formato. Para partículas de areia a velocidade de queda na água pode ser obtida a partir do gráfico da Figura 2.1, em função do diâmetro, da temperatura e do fator de forma $S.F. = c/\sqrt{ab}$, sendo a a maior dimensão, b a dimensão intermediária e c a menor dimensão do elipsóide que se assemelha a partícula considerada. Para sedimentos o fator de forma é da ordem de 0,7.

FIGURA 2.1 – VELOCIDADE DE QUEDA DE PARTÍCULAS DE QUARTZO



FONTE: MORRIS, FAN [1997]

2.3 Início do Movimento das Partículas

O escoamento de água em um canal aberto exerce esforços tangenciais sobre o fundo, tendendo a mover o material do leito. A condição crítica ocorre quando o limite de estabilidade das partículas é atingido, ou seja, as forças hidráulicas exercidas sobre o leito são tais que as partículas estão no limiar do movimento. Essa condição crítica, ou condição incipiente, é normalmente computada em termos de velocidade média crítica do fluxo ou tensão tangencial crítica no leito. Na realidade, essa condição crítica, que tem sido definida de forma diferente por vários pesquisadores, pode referir-se à condição que ocorre uma taxa de transporte muito pequena.

Em leitos sem coesão, o movimento do sedimento é iniciado por uma partícula que rola ou salta por uma curta distância. Esse movimento é seguido pelo movimento similar de outra partícula, e com o aumento da velocidade do fluxo, o número de partículas em movimento e a distância alcançada pelos saltos aumentam, até que com velocidades maiores o leito inteiro estará em movimento. Em 1936, Shields definiu a condição crítica de movimento incipiente como o ponto de *transporte zero*, extrapolada a partir de resultados de ensaios, em que foi possível determinar com precisão o transporte de sedimentos. Outros pesquisadores definiram este ponto usando termos como *movimento fraco*, porém as condições de movimento incipiente ficaram um tanto subjetivas. Em um leito contendo sedimentos de tamanhos variados, com velocidades intermediárias, somente as partículas menores do leito serão transportadas, enquanto as partículas maiores permanecerão em repouso [MORRIS; FAN, 1997], levando à ocorrência de um selecionamento de partículas na superfície do leito, fenômeno conhecido como “*armouring*” (EUA) ou “*armoring*” (Inglaterra), palavra traduzida como “encouraçamento” pelos pesquisadores paulistas.

2.3.1 Tensão tangencial crítica

Considerando um fluxo permanente e uniforme em um canal, o peso de uma coluna de água pode ser dividido em dois vetores: um orientado perpendicularmente ao leito e outro, orientado paralelamente ao leito, na direção do fluxo. Sob condições de escoamento permanente e uniforme, a componente da força gravitacional na direção

da declividade, que causa o movimento do fluxo para jusante, é equilibrada pela tensão tangencial no leito τ_0 , que é a força friccional exercida sobre o fluxo em movimento no contato com o leito. A tensão tangencial no leito não é uma força que atua sobre uma única partícula, mas é exercida sobre uma área do leito ou margens do canal. Para pequenas declividades, como normalmente ocorre em problemas hidráulicos, a tensão tangencial no leito τ_0 é dada pela seguinte expressão:

$$\tau_0 = \rho g R S \quad (2.3)$$

onde, ρ é a massa específica da água, g é a aceleração da gravidade, R é o raio hidráulico e S é a declividade da linha de energia. Para o caso de canais de grande largura em que o raio hidráulico R é aproximadamente igual a profundidade h , tem-se a seguinte expressão:

$$\tau_0 = \rho g h S \quad (2.4)$$

2.3.2 Velocidade de Corte

A velocidade de corte U_* representa uma medida da intensidade das flutuações turbulentas do fluxo [GRAF, 1983], e o seu valor é obtido da seguinte equação:

$$U_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} \quad (2.5)$$

onde τ_0 é a tensão tangencial (obtida pela Equação 2.3) e ρ é a massa específica do fluido.

Devido à existência da superfície livre no escoamento em canais, a tensão tangencial não é uniformemente distribuída ao longo de todo o perímetro molhado, e o

valor da velocidade de corte em uma determinada vertical pode ser obtido a partir da distribuição logarítmica de velocidades.

$$\frac{u}{U_*} = \frac{1}{k} \ln \frac{y}{y'} \quad (2.6)$$

onde u é a velocidade local a distância y do leito, U_* é a velocidade de corte na vertical considerada, y' é a distância a partir do leito na qual a velocidade é zero (para o escoamento turbulento rugoso $y' = K/30$, sendo K o valor da rugosidade, em metro) e k é a constante de Von Karmán normalmente aceito como sendo igual a 0,4. Segundo GRAF [1983], o valor de k pode ser menor na presença de sedimentos.

2.3.3 Diagrama de Shields

O diagrama de Shields, mostrado na Figura 2.2 é um método muito usado para determinar a condição incipiente de movimento baseado na tensão tangencial no leito. Pontos situados acima da curva representam a condição correspondente a sedimentos em movimento, e pontos abaixo da curva correspondem a partículas em repouso. Shields determinou que a condição crítica poderia ser relacionada com dois parâmetros adimensionais: a tensão tangencial adimensional τ_* (também conhecida como parâmetro de Shields) e o número de Reynolds de corte da partícula (Re_*), dado pela expressão:

$$Re_* = U_* d / \nu \quad (2.7)$$

na qual, U_* é a velocidade de corte, d é diâmetro da partícula de sedimento e ν é a viscosidade cinemática do fluido.

O parâmetro de Shields pode ser interpretado como a razão entre a força que produz o movimento da partícula e a força que resiste ao movimento. A força que produz o movimento é expressa pelo produto da tensão tangencial no leito τ_0 pela área da seção transversal da partícula exposta ao fluxo, representada pelo quadrado do

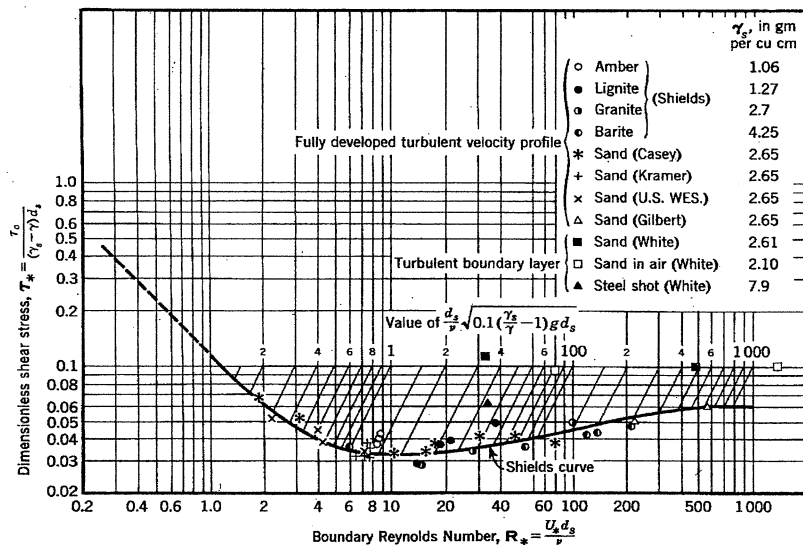
diâmetro da partícula d^2 . A força que resiste ao movimento é o produto do peso específico submerso do sedimento $(\gamma_s - \gamma)$ pelo volume da partícula, representada pelo cubo do diâmetro da partícula d^3 . O parâmetro de Shields é calculado pela seguinte expressão:

$$\tau_* = \frac{\tau_0 d^2}{(\gamma_s - \gamma) d^3} = \frac{\tau_0}{(\gamma_s - \gamma) d} \quad (2.8)$$

A relação entre o parâmetro de Shields e o número de Reynolds de corte da partícula para a condição crítica foi determinada experimentalmente através de testes com sedimentos uniformemente graduados em canais hidráulicos. Em leitos com sedimentos misturados normalmente é usado o diâmetro d_{50} para representar o comportamento do leito [MORRIS; FAN, 1997].

White (1940), Kurihara (1948) e Iwagaki (1956) procuraram uma explicação teórica para o diagrama de Shields, conforme é exposto em GARDE e RAJU [1985].

FIGURA 2.2 – DIAGRAMA DE SHIELDS COM DADOS DE WHITE



FONTE: VANONI [1975]

2.4 Cálculo do Transporte de Sedimentos

As equações que determinam a capacidade do fluxo de água de transportar sedimentos podem ser divididas em três grupos: equações de transporte sólido por arraste de fundo, equações de transporte sólido em suspensão e equações de transporte total de material do leito.

2.4.1 Transporte sólido por arraste de fundo

A primeira formulação para o cálculo do transporte de sólido por arraste de fundo foi elaborada por Dubois (1897), baseando-se em um modelo no qual considerava-se que os sedimentos se moviam em camadas devido à tensão tangencial no leito. Em 1930, Schoklitsch desenvolveu uma equação baseada em experimentos de laboratório, a qual relaciona a taxa de transporte de sedimentos com características das partículas, com a declividade da linha de energia e com a vazão.

Em 1942 e 1950, Einstein propôs duas formulações com a mesma relação funcional, sendo que o primeiro modelo era mais empírico, ao passo que o segundo foi baseado em uma detalhada derivação matemática. A unicidade da contribuição de Einstein reside no fato de que ele foi o primeiro a reconhecer a influência das flutuações das forças hidrodinâmicas no transporte de sedimentos nas equações que propôs. Ambas as equações relacionam a probabilidade de movimento da partícula de sedimento a um parâmetro adimensional de intensidade de transporte (ψ_E), equivalente ao inverso do parâmetro de Shields. As equações diferem entre si na maneira de calcular a probabilidade do movimento e também nos fatores considerados na influência do movimento das partículas [ANNANDALE, 1987]. O parâmetro adimensional de intensidade de transporte definido por Einstein é dado pela seguinte equação:

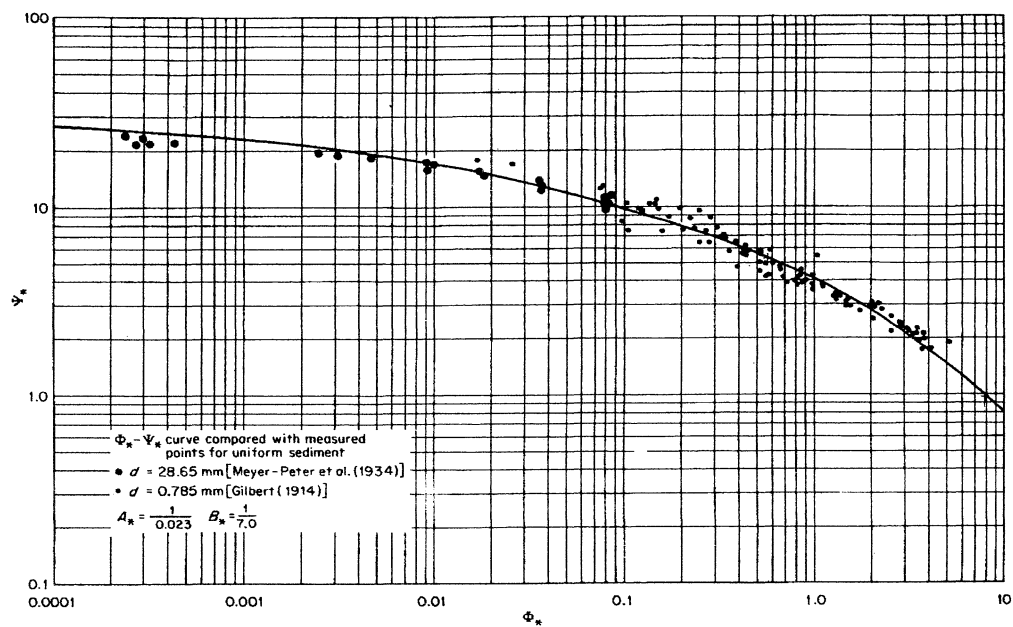
$$\psi_E = \frac{\gamma d (S_s - 1)}{\tau_0'} \quad (2.9)$$

na qual, τ_0' é a tensão tangencial no leito devido aos grãos. A taxa de transporte de sedimentos por arraste de fundo q_s é obtida da Equação 2.10:

$$\Phi = \frac{q_s}{d^{\frac{3}{2}} \sqrt{g(S_s - 1)}} \quad (2.10)$$

na qual o parâmetro Φ é relacionado com o parâmetro adimensional de intensidade de transporte (ψ_E) analiticamente ($\Phi = f(\psi_E)$), que mostrou resultados satisfatórios ao comparar com os resultados experimentais – Figura 2.3.

FIGURA 2.3 – PLOTAGEM DA FUNÇÃO DE EINSTEIN



FONTE: GRAF [1983]

A Equação 2.11, proposta por Meyer-Peter e Mueller (1948), obtida a partir de resultados de testes em laboratório, é provavelmente a mais utilizada para transporte de fundo.

$$\rho g h \left(\frac{K_s}{K_s'} \right)^{\frac{3}{2}} S = A g (\rho_s - \rho) d + B \rho^{\frac{1}{3}} g_s^{\frac{2}{3}} \quad (2.11)$$

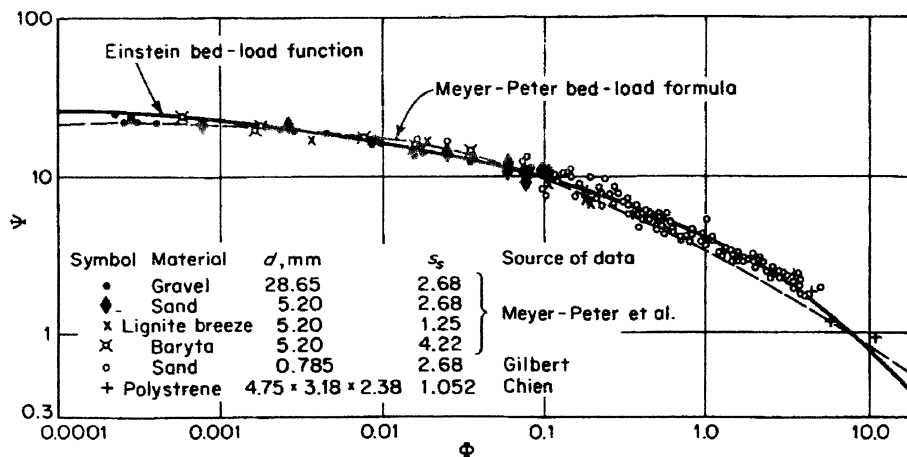
na qual A e B são coeficientes experimentais iguais a 0,047 e 0,25, respectivamente. K_s é o inverso do coeficiente de Manning do canal devido à forma do leito e aos grãos, K_s' é o inverso do coeficiente de Manning do canal devido aos grãos apenas, ρ_s é a

massa específica do sedimento, ρ é a massa específica da água, d é o diâmetro médio do grão, h é a profundidade do escoamento e g_s' é o transporte de sedimentos em termos de peso específico submerso por segundo.

Em 1954, Chien comparou a equação proposta por Meyer-Peter e Mueller (1948) com a formulação proposta por Einstein (1950) e concluiu que são praticamente coincidentes (ver Figura 2.4).

Além dos pesquisadores anteriormente citados, outros propuseram equações de transporte de sedimentos por arraste de fundo: Shields (1936), Kalinske (1947), Levi (1948), Einstein-Brown (1950), Frijlink (1952), Bagnold (1956), Egiazaroff (1957), Sato et al. (1950), Garde e Albertson (1961), Yalin (1963), Parker et al. (1982), Browmlie (1982) e Van Rijn (1984) [ANNANDALE, 1987].

FIGURA 2.4 - COMPARAÇÃO ENTRE AS EQUAÇÕES DE EINSTEIN E MEYER-PETER - CHIEN (1954)



FONTE: GRAF [1983]

2.4.2 Transporte sólido por suspensão

Nesse modo de transporte as partículas sólidas são mantidas em suspensão devido à turbulência do escoamento, cujo efeito sobre as partículas pode ser suposto análogo ao processo de difusão-dispersão. Embora tal modelo não considere adequadamente todas as influências, tem sido verificado que explica satisfatoriamente os problemas de suspensão [GRAF, 1983].

2.4.2.1 Modelo Difusão-Dispersão

No escoamento turbulento em canais, a difusividade turbulenta é bem maior que a difusividade molecular, de modo que esta pode ser desprezada. O fluxo de massa no processo de difusão turbulenta ocorre em função do gradiente de concentração na direção considerada, e pode expresso pelas seguintes expressões:

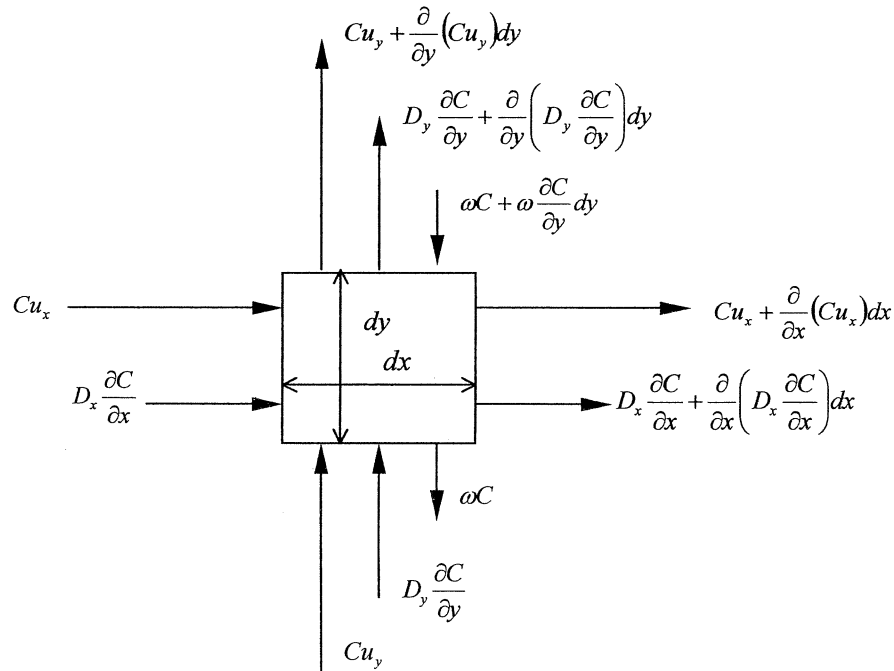
$$D_x \frac{\partial C}{\partial x} \quad D_y \frac{\partial C}{\partial y} \quad D_z \frac{\partial C}{\partial z} \quad (2.12)$$

onde D_x , D_y e D_z são os coeficientes de difusão turbulenta, nas direções x , y e z , respectivamente, os quais tem analogia com a viscosidade cinemática de torvelinho, e $\partial C/\partial x$, $\partial C/\partial y$ e $\partial C/\partial z$ são os gradientes de concentração nas direções consideradas.

A equação diferencial para a distribuição de sedimentos em suspensão é obtida baseando-se no princípio de conservação da massa aplicado a um volume de controle arbitrário, conforme mostrado na Figura 2.5, para o caso bidimensional.

A Figura 2.5 mostra um volume de controle infinitesimal de fluido no qual estão indicadas as parcelas correspondentes ao transporte da concentração (parcelas com componente de velocidade) e as parcelas correspondentes a difusão turbulenta.

FIGURA 2.5 – TRANSPORTE DE SEDIMENTOS PARA DENTRO E FORA DO VOLUME DE CONTROLE



Para o caso bidimensional, a equação diferencial para distribuição de concentração de sedimentos em suspensão pode ser escrita da seguinte forma:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u_x \frac{\partial C}{\partial x} + u_y \frac{\partial C}{\partial y} - \omega \frac{\partial C}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) \quad (2.13)$$

onde ω é a velocidade de queda da partícula e as componentes horizontal e vertical da velocidade u_x e u_y definem o campo de velocidades.

Considerando o escoamento permanente ($\partial C / \partial t = 0$) e uniforme em um canal aberto, no qual não ocorrem variações de concentração na direção x (direção do fluxo), a Equação 2.13 pode ser expressa como:

$$0 = \omega C_y + D_y \frac{\partial C_y}{\partial y} \quad (2.14)$$

2.4.2.2 Consideração de Rouse (1937)

Considerando o coeficiente de difusão turbulenta D_y , da Equação 2.14, equivalente à viscosidade de torvelinho ε_y (variável ao longo da vertical), Rouse (1937) introduziu a equação da distribuição vertical de concentrações.

$$\frac{C_y}{C_a} = \left(\frac{h-y}{y} \frac{a}{h-a} \right)^z \quad (2.15)$$

onde, C_y e C_a são as concentrações de sedimentos, com velocidade de queda ω , em distâncias verticais y e a acima do leito e h é a profundidade total do escoamento. O expoente z (também conhecido como número de suspensão) é dado pela seguinte equação:

$$z = \frac{\omega}{kU_*} \quad (2.16)$$

onde k é a constante de Von Karmán e U_* é a velocidade de corte.

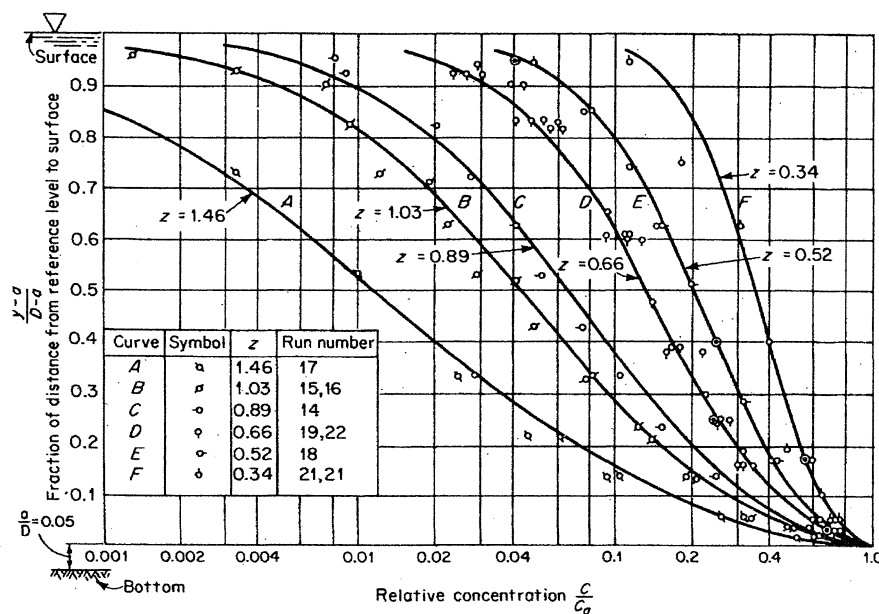
A Equação 2.15 pode ser usada para determinar a concentração C_y em qualquer altura y acima do fundo, a partir da concentração conhecida C_a na altura de

referência a acima do leito. A Equação 2.16 ressalta a importância do parâmetro ω/U_* no processo de transporte de sedimentos por suspensão. O valor de z decresce com a diminuição da velocidade de queda da partícula, indicando que sedimentos mais finos produzem distribuições verticais de concentrações mais uniformes. Portanto, existirá uma distribuição vertical de concentração diferente para cada tamanho de sedimento. O tamanho da partícula, expresso pela sua velocidade de queda ω , é diretamente responsável pelo tipo de distribuição.

A Equação 2.15 foi aplicada por vários pesquisadores, entre eles Anderson (1942), Lane (1941), Vanoni (1953), Harrison (1963), Colby (1955), para dados experimentais de laboratório e de campo. Em todos os casos os pesquisadores concluíram que a Equação 2.15 descreve muito bem a distribuição vertical de concentrações [GRAF, 1983].

A distribuição vertical de concentrações de acordo com a Equação 2.15 está mostrada na Figura 2.6, na qual as distribuições teóricas são mostradas por linhas contínuas e os dados experimentais indicados por círculos.

FIGURA 2.6 – DISTRIBUIÇÃO DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO – COMPARAÇÃO ENTRE DADOS EXPERIMENTAIS E A EQUAÇÃO 2.15 – VANONI (1946)



FONTE: GRAF [1983]

Na realidade, a Equação 2.15 é somente um ajuste de forma, porque os valores do expoente z que conduzem aos melhores ajustes são freqüentemente diferentes dos obtidos pela Equação 2.16. Essa diferença entre os valores do expoente z teóricos e observados deve-se: 1) à diferença entre o coeficiente de difusão turbulenta da partícula sólida (D_y) e a viscosidade de torvelinho (ε_y) - consideração de Rouse (1937) na obtenção da Equação 2.15, e 2) aos efeitos da turbulência e concentração de sedimentos sobre a constante de Von Karmán (k) e sobre a velocidade de queda da partícula [GRAF, 1983].

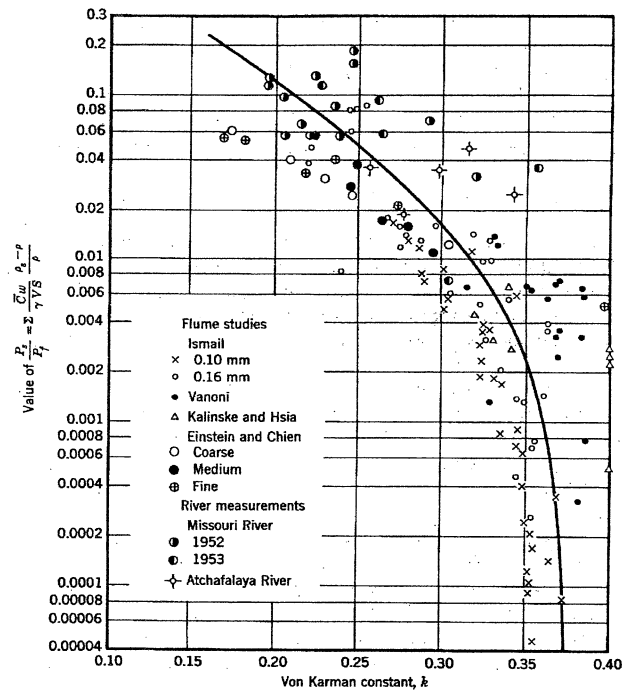
2.4.2.3 Variação da Constante de Von Karmán (k) com a Concentração de Sedimentos

Em canais com fluxos sem sedimentos, o valor da constante de Von Karmán (k - constante universal na lei de velocidade logarítmica) é considerado igual a 0,4. Na presença de sedimentos, o valor de k varia, com tendência a diminuir com o aumento da concentração. Segundo Vanoni (1963), a redução do valor de k significa que a mistura é menos efetiva e, aparentemente, a presença de sedimentos suprime ou abafa a turbulência. Segundo Einstein et. al. (1954), a taxa de energia gasta para suportar o sedimento em suspensão por unidade de peso do fluido e unidade de tempo é dada pela expressão:

$$\sum \frac{\bar{C} \omega \rho_s - \rho}{US_0 \rho} \quad (2.17)$$

onde S_0 é a declividade do canal e \bar{C} é a concentração média por peso de um dado tamanho de partícula com velocidade de queda ω . O sinal de somatório indica a soma de todas as partículas em suspensão. O argumento obtido pela expressão 2.17 pode ser correlacionado com o valor de k , conforme apresentado na Figura 2.7, na qual fica evidente a dispersão. Contudo, é obtida uma correlação razoável, com dados de estudos em canais e medições em rios [GRAF, 1983].

FIGURA 2.7 – VARIAÇÃO DA CONSTANTE DE VON KARMÁN (k) COM A CONCENTRAÇÃO DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO – EINSTEIN E CHIEN (1955)



FONTE: VANONI [1975]

2.4.2.4 Consideração de Lane et al. (1941)

Lane et al. (1941) sugere a utilização de um coeficiente de difusão turbulenta médio, constante ao longo de toda profundidade, dado pela seguinte expressão:

$$\overline{D}_y = \frac{kU_*}{h^2} \int_0^h (hy - y^2) dy = \frac{kU_*h}{6} \quad (2.18)$$

Considerando que esse coeficiente de difusão turbulenta médio seja constante ao longo da profundidade e aplicando na Equação 2.14, obtém-se a seguinte equação:

$$\frac{C_y}{C_a} = e^{-[\omega(y-a)]/\overline{D}_y} \quad (2.19)$$

A Equação 2.19 permite determinar a concentração de um dado sedimento, em qualquer ponto da vertical, se for conhecida a concentração em um simples ponto nesta vertical.

Comparando com dados de campo, principalmente de rios de grande largura, Lane et al. (1941) concluíram que a Equação 2.19 apresenta precisão suficiente para propósitos práticos [GRAF, 1983].

2.4.2.5 Cálculo da Descarga de Sedimentos por Suspensão

A descarga de sedimentos por suspensão por unidade de largura do canal pode ser obtida pela seguinte expressão:

$$q_{ss} = \int_0^h C_y u dy \quad (2.20)$$

onde a concentração C_y e a velocidade u (assumindo função logarítmica) são funções de y , e q_{ss} é a descarga de sedimentos em suspensão por unidade de largura.

2.4.3 Transporte total

A taxa de transporte total de sedimentos é dada pela soma da parcela transportada por arraste de fundo e da parcela transportada por suspensão. Em condições com baixas taxas de transporte, nas quais a maior parte dos sedimentos se movem em contato com o leito, a taxa de transporte por arraste de fundo conduz a uma boa aproximação do transporte total [GRAF, 1983].

Os métodos em que o transporte por arraste de fundo e o transporte por suspensão são estimados separadamente e somados para compor o transporte total são considerados como métodos indiretos, dos quais fazem parte o método proposto por Einstein (1950), o Método de Einstein Modificado (1955) e o método de Bagnold (1966) [ANNANDALE, 1987].

Outros pesquisadores concluíram que não é necessário separar o transporte por arraste de fundo do transporte em suspensão porque, em ambos os casos, as forças envolvidas em levantar o material do leito são as mesmas, ou seja, consideraram o processo de suspensão como um estágio avançado de tração ao longo do leito. Dessa forma, foram desenvolvidos os métodos diretos, nos quais os pesquisadores estabeleceram relações que fornecem diretamente as estimativas para o transporte

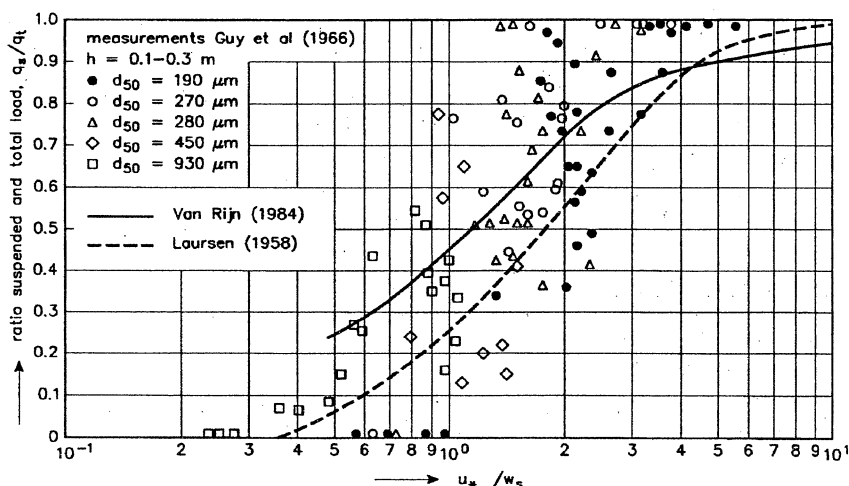
total. Os métodos diretos são os mais utilizados, podendo ser citados os métodos propostos por: Laursen (1958), que salienta a importância do parâmetro U_*/ω e da tensão tangencial crítica para o cálculo do transporte total, Garde e Albertson (1958), Bishop, Simons e Richardson (1965), Graf e Acaroglu (1968) e Ackers e White (1973) [ANNANDALE, 1987]. Este último possui maior credibilidade por envolver maior quantidade de dados processados por computador.

As formulações desenvolvidas para o cálculo do transporte total consideram somente o transporte dos materiais existentes no leito. Portanto, não consideram a carga de sólidos transportados por lavagem (*washload*), na maioria dos casos composta por partículas mais finas que as existentes no leito.

2.5 Definição do Modo de Transporte

Segundo VAN RIJN [1993] a importância do transporte sólido por suspensão em relação ao transporte sólido por arraste de fundo pode ser estimada em função da razão entre a velocidade de corte do fluxo e a velocidade de queda da partícula de sedimento. A Figura 2.8 mostra a plotagem da razão entre transporte sedimentos em suspensão e transporte total como uma função da velocidade de corte e da velocidade de queda da partícula.

FIGURA 2.8 – RAZÃO ENTRE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO E TRANSPORTE TOTAL



FONTE: VAN RIJN [1993]

3 MÉTODOS DE AMOSTRAGEM PARA DETERMINAÇÃO DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO

3.1 Amostragem Mecânica

A amostragem mecânica consiste na coleta de amostras de água para determinação da concentração de sedimentos em suspensão. Os amostradores mecânicos podem ser de integração pontual ou de integração vertical, e o processo de amostragem pode ser direto ou indireto. Na amostragem direta, a taxa média temporal do transporte de sedimentos é determinada em um ponto ou ao longo de uma vertical da seção transversal. Na amostragem indireta, a velocidade média do fluxo e a concentração média de sedimentos são medidas separadamente e a taxa média de transporte de sedimentos é obtida pelo produto desses dois valores.

Atualmente, no Brasil, o método mecânico mais aplicado é o método indireto de amostragem por integração vertical. Nesse método, o amostrador é baixado da superfície da água até o fundo do rio e içado de volta até a superfície, percorrendo a vertical de amostragem com velocidade constante, próxima a um valor previamente calculado denominado velocidade de trânsito. Após a coleta em diversas verticais, as amostras são misturadas para determinação da concentração média na seção. A taxa média do transporte de sedimentos em suspensão na seção transversal é obtida pelo produto da concentração média pela vazão.

Segundo YUQIAN [1989], os requisitos básicos para um amostrador mecânico ideal são os seguintes:

- a) A velocidade do fluxo na entrada do amostrador deve ser igual ou próxima da velocidade ambiente. Experimentos mostram que quanto maior o tamanho das partículas, maior o erro na concentração de sedimentos, devido à diferença entre essas duas velocidades. Foi provado experimentalmente que o erro na medição da concentração de sedimentos em suspensão é menor que 5% se a razão entre a velocidade na entrada do amostrador e a velocidade ambiente for mantida entre 0,8 e 1,2;

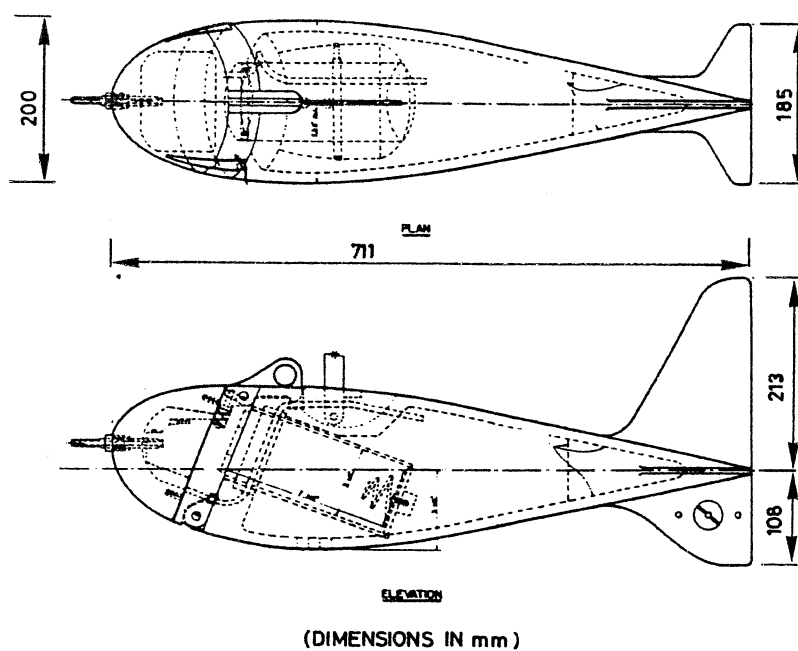
- b) O amostrador deve permitir a coleta de amostras próximo ao leito de forma a tornar a zona não amostrada a menor possível;
- c) As perturbações criadas pelo amostrador, particularmente próximo ao bico de entrada devem ser minimizadas;
- d) Ter peso suficiente para manter a sua estabilidade;
- e) O volume de amostragem deve ser suficiente para determinação da concentração, bem como, análise granulométrica.

Existe disponível uma grande variedade de modelos de amostradores mecânicos baseados em diferentes princípios de funcionamento. Na sequência são descritos os modelos de amostradores mecânicos de interesse ao presente estudo.

3.1.1 Amostrador USP-61

Este amostrador, ilustrado na Figura 3.1, consiste de um corpo de bronze com formato hidrodinâmico, de aproximadamente 50 kg, no interior do qual é colocada uma garrafa de 500 ml. A parte superior do amostrador é dotada de um sistema de abertura que permite o acesso à garrafa. Esse equipamento pode ser usado para amostragem por integração pontual ou amostragem por integração vertical. A abertura de entrada da mistura de água e sedimento é apontada diretamente para o fluxo de aproximação e pode ser controlada através de uma válvula operada eletricamente. Após a abertura da válvula, o ar da garrafa escapa através de um tubo direcionado para jusante, localizado lateralmente ao amostrador, permitindo a entrada da amostra de água e sedimentos. O tempo de enchimento varia entre 10 a 50 segundos. Para evitar a circulação do fluxo, a amostra não deve ser maior que 75% do volume da garrafa [VAN RIJN, 1993].

FIGURA 3.1 – AMOSTRADOR USP-61



FONTE: VAN RIJN [1993]

3.1.2 Amostrador USD-49

Este amostrador é usado somente para amostragem por integração vertical, sendo adequado para escoamentos com profundidade inferior a 5 m, nos quais as velocidades não excedam 2 m/s. O modelo é composto de um corpo hidrodinâmico, feito de bronze, dentro do qual é colocada uma garrafa para coletar a amostra de água e sedimentos. O equipamento é dotado de um sistema de abertura, que permite o acesso ao compartimento de amostragem. A entrada da amostra ocorre através de um furo na parte frontal do amostrador, que permite o ajuste de bicos calibrados com diâmetros de 1/8", 3/16" e 1/4". A velocidade de percurso ao longo da vertical, ou razão de trânsito, é função da velocidade média do fluxo, da profundidade e do diâmetro do bico.

Uma desvantagem desse equipamento é que o período de amostragem em cada ponto da vertical é muito curto, de forma que as flutuações de concentração não são consideradas [VAN RIJN, 1993].

3.1.3 Amostrador USD-96 (Amostrador de Saca)

Este equipamento é composto de um corpo de plástico rígido todo perfurado, no interior do qual é colocada uma saca de plástico, isenta de ar, que serve como recipiente para coleta da amostra. É utilizado para amostragem por integração vertical e pode ser operado com bicos calibrados com diâmetros de 1/8", 3/16" e 1/4". O funcionamento deste amostrador é baseado no princípio de que a pressão hidrostática, agindo sobre a superfície da saca de plástico vazia, conduz a uma pressão no bico de entrada igual a pressão hidrostática local, de forma que a velocidade do fluxo no bico resulta igual a velocidade do escoamento na posição amostrada.

O volume da saca utilizada é em torno de 3 litros, que possibilita amostragens em rios com profundidades superiores a 5 m. Devido ao fato de ser um amostrador leve, deve ser utilizado com lastro em rios com altas velocidades [SANTOS et al., 2001].

3.1.4 Amostrador por bombeamento

O amostrador por bombeamento consiste em uma estrutura submersível com um bico amostrador, conectado a um sistema de bombeamento através de uma mangueira flexível. O diâmetro da mangueira deve ser o menor possível para reduzir a força de arraste. Utilizando uma mangueira com diâmetro de 3 mm a 16 mm, a vazão bombeada deve ser de 0,3 a 30 litros por minuto.

Amostradores por bombeamento são bastante adequados para coletar amostras de grande volume (25 a 50 litros), necessárias para análise granulométrica dos sedimentos em suspensão.

A aplicação deste tipo de amostrador é limitada a fluxos com velocidades de aproximadamente 2 m/s, devido à excessiva força de arraste sobre a mangueira.

3.1.5 Limitações da amostragem mecânica

Os amostradores mecânicos obtêm resultados precisos, porém são limitados em termos de resolução espacial e temporal. Para obtenção de distribuições de concentrações de sedimentos ao longo de uma vertical ou seção transversal de um rio devem ser coletadas e analisadas um grande número de amostras. A determinação da

concentração de sedimentos em suspensão de uma amostra é um processo trabalhoso e demorado.

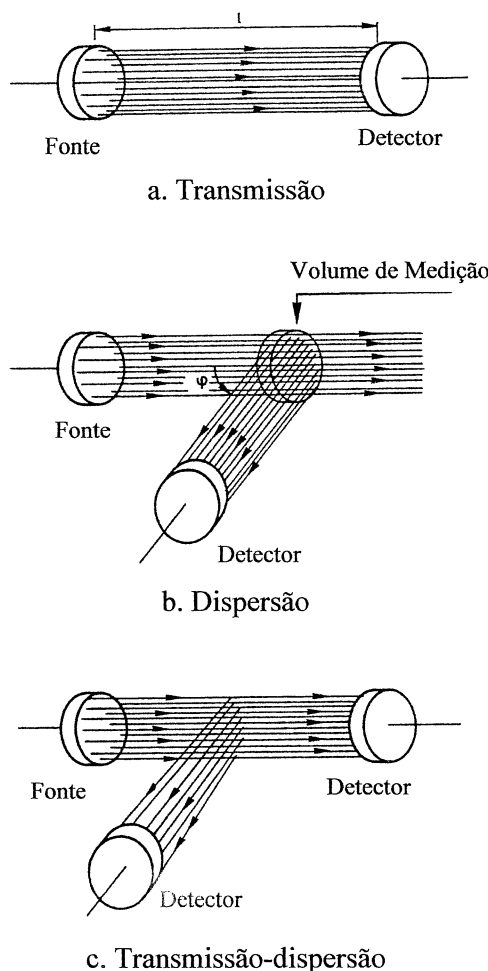
3.2 Amostragem Óptica

Quando um feixe de luz passa através de uma amostra de fluido, os sólidos suspensos dispersam a luz em todas as direções e, além disso, a absorção pelas substâncias dissolvidas, também reduz a sua intensidade. A absorção da luz é a transformação da energia luminosa em calor devido à incidência do raio de luz sobre o material em suspensão na água. A dispersão é a refração do raio de luz devido à presença do material em suspensão. Ambos os efeitos dependem da quantidade de material em suspensão, ou seja, quanto maior a quantidade material em suspensão na água, maior será a absorção da energia luminosa e a dispersão do raio de luz, e menor será a quantidade de luz recebida pelo detector.

Os princípios de medição da amostragem óptica (e acústica) podem ser classificados em transmissão, dispersão e transmissão-dispersão da luz (som, no caso de amostragem acústica). A Figura 3.2 ilustra os três princípios de medição. A maior vantagem da amostragem óptica em relação à amostragem mecânica é a capacidade de obter medições contínuas da concentração de sedimentos em suspensão.

No caso da transmissão, a fonte e o detector são posicionados em direções opostas, um de frente para o outro, a uma certa distância. As partículas de sedimentos no volume de medição causam uma redução na intensidade do sinal recebido pelo detector. No caso da dispersão, o detector é posicionado com um determinado ângulo em relação à fonte. O detector recebe uma parte da radiação dispersa (refletida) pelas partículas de sedimentos no volume de medição. O método de transmissão-dispersão é baseado na combinação da transmissão e dispersão [VAN RIJN, 1993].

FIGURA 3.2 – PRINCÍPIOS DE MEDIÇÃO DA AMOSTRAGEM ÓPTICA



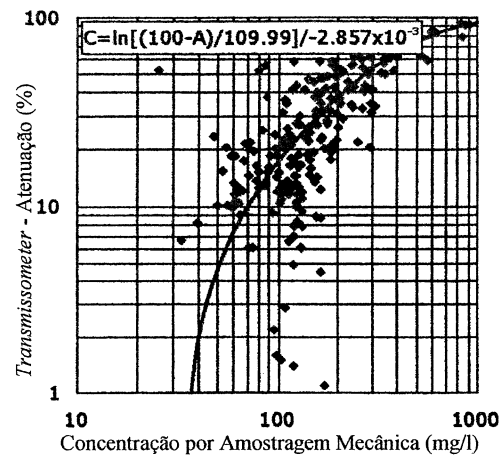
FONTE: VAN RIJN [1993]

3.2.1 Amostradores ópticos

Há um grande número de amostradores ópticos disponíveis no mercado. A maioria é baseada nos princípios de transmissão (*Transmissometer*) e de dispersão (*Optical Backscatter Sensor – OBS*).

Os “*Transmissometers*” medem a razão entre a luz emitida e a luz detectada ao longo de uma certa distância. São principalmente recomendados para condições com baixas concentrações de sedimentos (50 mg/l a 100 mg/l). A Figura 3.3 mostra a curva de calibração de um “*Transmissometer*”, no qual a distância entre a fonte e o detector é de 2 cm. A calibração foi feita a partir de dados coletados com amostrador mecânico.

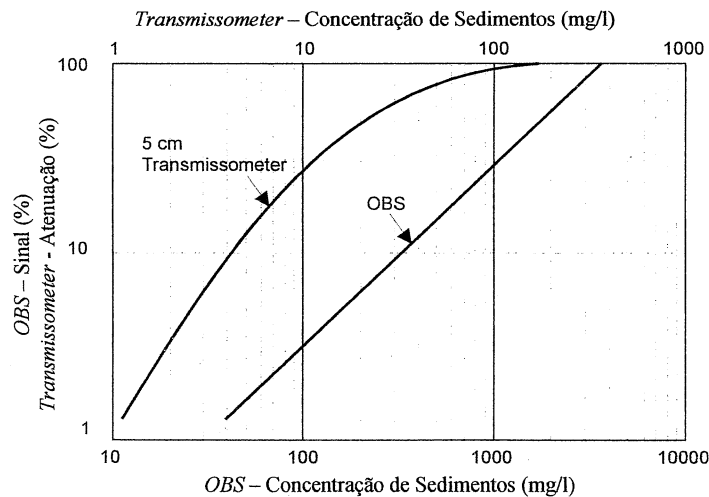
FIGURA 3.3 – CURVA DE CALIBRAGEM DO “TRANSMISSOMETER”



FONTE: MAYERLE, POERBANDONO [2002]

O “*Optical Backscatter Sensor*” (*OBS*) emite um feixe de raios infravermelho e mede a radiação refletida pelas partículas em suspensão na água. O *OBS* permite a medição de concentrações com relações lineares até aproximadamente 2.000 mg/l, conforme mostrado no gráfico da Figura 3.4. Seu desempenho é considerado superior à maior parte dos outros equipamentos ópticos, devido ao seu tamanho reduzido e pequeno volume de amostragem, sua insensibilidade a bolhas e plânctons, sua capacidade de desconsiderar a luz ambiente e seu baixo custo [VAN RIJN, 1993].

FIGURA 3.4 – COMPARAÇÃO ENTRE CURVAS DE CALIBRAGEM DE AMOSTRADORES ÓPTICOS



FONTE: VAN RIJN [1993]

Os amostradores ópticos tem sido usados com sucesso e com a vantagem, sobre os amostradores mecânicos, de realizar medições de perfis de concentração. A calibragem é direta e as curvas de calibragem não são tão dependentes do local de medição.

3.2.2 Limitações da amostragem óptica

Os métodos ópticos são mais convenientes para partículas de silte (menores que 50 μm). Os equipamentos ópticos não são recomendados para condições com ampla variação de tamanho de partículas (argila, silte e areia).

É necessária a calibragem do amostrador óptico usando amostrador mecânico.

Segundo VAN RIJN [1993], a concentração limite máxima para medição com equipamento óptico é da ordem de 30.000 mg/l, no entanto, MAYERLE e POERBANDONO [2001], recomendam que, para concentrações de sedimentos acima de 2.000 mg/l, sejam feitas medições comparativas por outros métodos.

3.3 Amostragem Acústica

De modo similar à amostragem óptica, os princípios de medição da amostragem acústica podem também ser classificados em transmissão, dispersão e transmissão-dispersão do som emitido (ver Figura 3.2). Embora a aplicação deste sistema de amostragem esteja ainda em estágios de desenvolvimento, ela oferece possibilidades muito promissoras para medição de perfis de concentração de sedimentos em conjunto com medições de perfis de velocidades. Uma das principais vantagens da amostragem acústica é a possibilidade de realizar medições contínuas de sedimentos em suspensão, sem precisar introduzir o equipamento no fluxo e, dessa forma, sem afetar a região do escoamento a ser amostrada.

3.3.1 Amostradores acústicos

Na seqüência são apresentados os dois principais equipamentos utilizados para amostragem acústica, que são: o Monitor de Transporte de Areia Ultra-sônico e o Sistema de Perfilamento Acústico.

3.3.1.1 Monitor de Transporte de Areia Ultra-sônico

A medição da concentração de sedimentos em suspensão é baseada na transmissão e dispersão de ondas de ultra-som pelas partículas em suspensão no volume de medição (amostragem pontual). A concentração de sedimentos e a velocidade do fluxo são determinadas continuamente através da variação na amplitude e na frequência do sinal refletido.

O Monitor de Transporte de Areia Ultra-sônico é composto de um sensor com uma unidade pré-amplificada, montado em um suporte submersível, e um conversor com painel de instrumentos e interruptores. A medição de velocidade é uni ou bidimensional e relativa à orientação do suporte submersível, a qual é medida através de uma bússola. A posição vertical é determinada por um medidor de pressão (altura até a superfície da água) e um eco batímetro (altura acima do leito), montado em um suporte. A transmissão de uma frequência de 4,5 MHz é usada para minimizar a dependência do tamanho da partícula e tornar o instrumento insensível a partículas de silte (menores que 50 μm). As influências da temperatura e variações de salinidade são negligenciáveis [VAN RIJN, 1993].

3.3.1.2 Sistema de Perfilamento Acústico

Provavelmente o equipamento acústico mais conhecido é o “*Acoustic Doppler Current Profiler*” (Perfilador Acústico de Corrente por Efeito Doppler). A Figura 3.5 mostra fotografias de equipamentos produzidos por dois fabricantes. O equipamento produzido pela *RD Instruments* é chamado de ADCP e opera com quatro transdutores (unidades capazes de emitir e captar ondas sonoras). A *SonTek* produz um equipamento denominado ADP, que opera com três transdutores.

Estes equipamentos, desenvolvidos para medição de vazão, permitem a determinação das componentes da velocidade do fluxo nas direções norte, leste e vertical, e da intensidade do sinal acústico refletido devido à concentração dos sedimentos em suspensão.

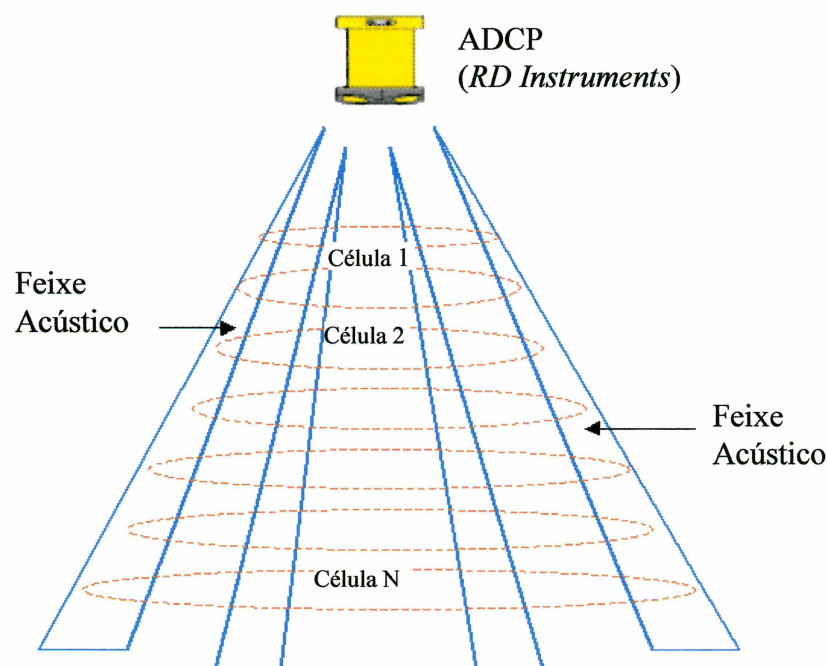
FIGURA 3.5 – ADCP – *RD INSTRUMENTS* (ESQUERDA) E ADP – *SONTEK* (DIREITA)

Para medição de velocidades do escoamento o ADCP utiliza o efeito Doppler, transmitindo uma onda sonora a uma frequência fixa e captando os ecos que retornam, refletidos por partículas em suspensão na água. Dessa forma, assume-se que, em média, as partículas se deslocam com a mesma velocidade horizontal do fluxo de água [GORDON, 1996]. Quando as partículas se movem em direção ao ADCP, o som captado pelo transdutor tem sua frequência aumentada devido ao efeito Doppler. Essa diferença de frequência é proporcional à velocidade relativa entre o ADCP e as partículas.

Conforme ilustrado na Figura 3.6, os transdutores do ADCP emitem feixes acústicos apontados para diferentes direções, permitindo a obtenção de diferentes componentes da velocidade que podem ser convertidas, por trigonometria, para componentes norte e leste. É necessário um transdutor para cada componente da velocidade.

A medição da concentração de sedimentos em suspensão é baseada na reflexão das ondas de ultra-som pelas partículas em suspensão. O transdutor emite um pulso acústico curto (período de 10 μ s) de alta frequência. Parte dessa energia acústica é refletida pelas partículas de sedimentos em suspensão e retorna para o transdutor. A magnitude do sinal acústico refletido é relacionada com a concentração, com o tamanho das partículas e com o tempo entre a transmissão e a recepção [VAN RIJN, 1993].

FIGURA 3.6 - ESQUEMA DE OPERAÇÃO DO ADCP COM QUATRO TRANSDUTORES



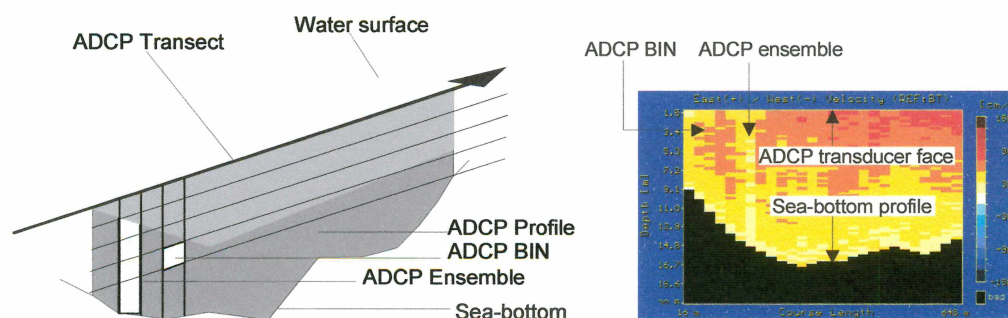
FONTE: LU [2003]

O ADCP permite a realização de medições em locais fixos, com o equipamento ancorado, ou ao longo de seções transversais, com o equipamento montado em uma embarcação. Nas medições em local fixo o equipamento pode ser ancorado no leito apontando para a superfície livre, ou ancorado próximo à superfície livre e direcionado para o fundo, neste caso são obtidas séries temporais de perfis de velocidades e concentrações. Quando montados sobre embarcações, permitem a medição de perfis de velocidades e de concentrações ao longo do trajeto da embarcação.

A Figura 3.7 mostra a forma na qual o ADCP, montado em uma embarcação, realiza o levantamento de uma seção transversal. O “*transect*” corresponde ao caminho seguido pela embarcação durante as medições, normalmente a seção transversal de um rio ou canal. Os dados de cada *transect* são armazenados em um arquivo. Um *transect* é composto de “*ensembles*”, que são colunas de dados ao longo

do caminho da embarcação. Cada *ensemble* é formado por “*bins*”, que são as células para as quais o ADCP mede a velocidade (magnitude e direção) e a intensidade do eco refletido pelas partículas em suspensão. O tamanho e o número máximo de células (*bin*) por *ensemble* pode ser configurado no equipamento.

FIGURA 3.7 - LEVANTAMENTO DE UMA SEÇÃO TRANSVERSAL COM ADCP



FONTE: MAYERLE, POERBANDONO [2001]

3.3.2 Limitações da amostragem acústica

Segundo VAN RIJN [1993], a amostragem acústica é em geral recomendada para partículas de areia (maiores que 50 μm) e concentrações até 10.000 mg/l. A conversão dos dados de intensidade do eco em concentração de sedimentos em suspensão apresenta incertezas consideráveis, as quais impõem limites quanto à precisão e confiabilidade das concentrações medidas.

São necessárias calibrações usando amostradores mecânicos ou ópticos. A calibração é complicada, considerando que o sinal acústico precisa ser corrigido. A presença de sedimentos com tamanhos variáveis e condições com sedimentos misturados, causam grandes dificuldades para amostragem acústica. A resolução vertical é limitada pelo comprimento do pulso acústico e pela velocidade com a qual os sinais são digitalizados e gravados.

3.3.3 Fatores que influenciam a amostragem acústica

Os principais fatores que afetam os resultados de amostragens acústicas são apresentados na sequência.

3.3.3.1 Expansão do Feixe Acústico

Quando o pulso acústico é transmitido através da coluna de água, sua intensidade é diminuída devido à expansão do feixe acústico. A expansão esférica do feixe acústico é uma função geométrica simples e pode ser facilmente considerada durante o processamento dos dados.

3.3.3.2 Absorção da Energia Acústica pela Água

A absorção da energia acústica resulta da ocorrência de processos físicos e químicos na água, reduzindo a intensidade do eco. A absorção em água salgada é mais rápida do que na água doce, principalmente por causa de reações químicas. A absorção causa redução linear, com o aumento da distância, na intensidade do eco, quando medida em dB [GORDON, 1996].

A absorção do som aumenta, de modo geral, em proporção à frequência na qual o ADCP opera (75 kHz a 1.200 kHz). Isso produz uma relação inversa entre frequência e alcance. Os equipamentos que operam com frequências menores têm maior alcance [GORDON, 1996].

O coeficiente de absorção acústica é função da temperatura e da salinidade da água e da frequência do equipamento.

3.3.3.3 Sedimentos

Parte da energia acústica é perdida devido à absorção e à dispersão causada pelo sedimento. O mecanismo pelo qual ocorre essa perda depende principalmente do tamanho das partículas de sedimento, ou seja, partículas pequenas tendem a absorver energia acústica, ao passo que partículas grandes dispersam a energia. O fator mais influente é o tamanho do sedimento, entretanto, a densidade e a compressibilidade também afetam os resultados. Sedimentos com tamanhos variados e condições com

sedimentos misturados em variadas proporções são provavelmente os principais obstáculos associados a amostragens acústicas.

3.3.3.4 Presença de Outras Partículas

A presença de outras partículas como plânctons e outros contaminantes também podem causar erros. Além disso, alterações no grau de flocculação do sedimento, devido às variações na concentração, na química da água ou na turbulência do fluxo, também podem causar erros.

3.3.3.5 Salinidade e Temperatura

As variações de temperatura e salinidade ao longo da profundidade afetam o coeficiente de absorção de energia acústica da água e a velocidade do som na água.

3.3.3.6 Bolhas de Ar

Bolhas de ar ao longo da coluna de água também refletem a energia acústica. Considerando que são raras as situações em que a coluna de água está completamente livre de bolhas de ar, esse problema ocorre na maioria das medições. O efeito pode ser facilmente reconhecido, mas é muito difícil corrigi-lo. Ainda que as bolhas de ar estejam presentes somente próximo à superfície, os dados de posições mais profundas não podem ser processados precisamente porque o pulso acústico deve passar duas vezes através da região com bolhas.

3.3.3.7 Erros do Instrumento

O próprio instrumento produz erros. A incerteza estatística dos sinais acústicos medidos varia de acordo com o tipo de instrumento utilizado e de um instrumento para outro.

3.3.4 Conversão do sinal acústico em concentração de sedimentos em suspensão

A relação entre a intensidade do eco e a concentração de sedimentos em suspensão é bastante dependente do tamanho das partículas. Por esse motivo, a correlação entre a intensidade do eco e a concentração de sedimentos em suspensão deve ser calibrada com medições de concentração de sedimentos feitas por outro equipamento (amostrador mecânico ou óptico). Quando há grande variação no tamanho das partículas, pode não ser possível uma calibragem satisfatória dessa relação [GORDON, 1996].

Neste estudo são apresentados três métodos empíricos para conversão da intensidade do eco em concentração de sedimentos em suspensão: métodos de DEINES [1999], PATINO e BYRNE [2001] e GARTNER [2002].

O método proposto por DEINES [1999] considera a proporcionalidade entre incrementos de intensidade do sinal acústico e razão entre concentrações. As intensidades do eco registradas pelo ADCP são convertidas em concentrações de sedimentos através de uma correlação estabelecida a partir de uma intensidade do eco e uma concentração de sedimentos em suspensão correspondentes (determinadas simultaneamente no mesmo local, denominado nível de referência).

Os métodos propostos por PATINO e BYRNE [2001] e GARTNER [2002] sugerem relações diretas entre a intensidade do eco e a concentração de sedimentos, obtidas por regressão.

3.3.4.1 Método de DEINES [1999]

A aplicação do método proposto por DEINES [1999] requer a medição simultânea da intensidade do eco e da concentração de sedimentos em suspensão (com equipamento mecânico ou óptico) em uma determinada posição ao longo da vertical, definida como nível de referência.

A equação para estimar a concentração de sedimentos em suspensão a partir dos registros de intensidades do eco é obtida a partir da seguinte formulação:

$$C_v = 10 \log (C_i) \quad (3.1)$$

na qual, C_i é a concentração de sedimentos estimada, em mg/l, correspondente a célula número i e C_v é determinado pela Equação 3.2, a partir das características do sistema, das intensidades dos ecos registrados pelo ADCP e da concentração de sedimentos medida no nível de referência.

$$C_v = C + 20\log(R_i) - L_{DBM} - P_{DBW} + 2\alpha R_i + K_c (E_i - E_r) \quad (3.2)$$

na qual, a constante C é definida pela Equação (3.3) com dados do nível de referência.

$$C = C_{vr} - 20\log(R_r) - 2\alpha R_r + L_{DBM} + P_{DBW} \quad (3.3)$$

onde:

- C_{vr} = $10\log(C_r)$;
- C_r = concentração de sedimentos em mg/l, medida no nível de referência;
- R_i = distância ao longo do feixe acústico, do ADCP até a profundidade na qual foi medida a intensidade do eco E_i ;
- R_r = distância ao longo do feixe acústico, do ADCP até o nível de referência;
- L_{DBM} = $10\log L$;
- P_{DBW} = $10\log P$;
- L = comprimento do pulso transmitido (m);
- P = potência transmitida (W);
- α = coeficiente de absorção acústica da água (dB/m);
- K_c = fator de escala de intensidade do eco (dB/counts);
- E_i = intensidade do eco registrada pelo ADCP (counts);
- E_r = intensidade do eco registrada pelo ADCP no nível de referência (counts).

Nas Equações 3.2 e 3.3, os termos $20\log(R_r)$ e $20\log(R_i)$ representam a perda logarítmica na intensidade do eco com o aumento da distância, devido à

expansão do feixe acústico. Os termos $2\alpha R_r$ e $2\alpha R_i$ representam a redução na intensidade do eco causada pela absorção acústica na água.

Substituindo a Equação 3.3 na Equação 3.2 e retornando à Equação 3.1 obtém-se a Equação 3.4, que é usada para estimar as concentrações de sedimentos a partir das intensidades dos ecos, registradas pelo ADCP, já convertidas para dB e corrigidas para as perdas devidas à expansão do feixe acústico e à absorção acústica na água.

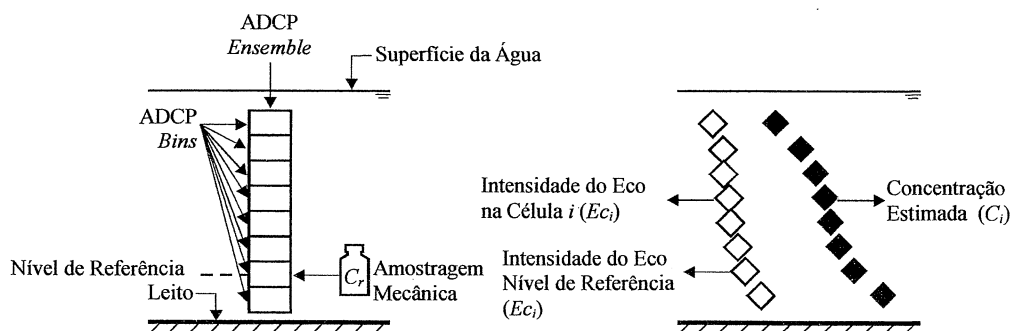
$$C_i = 10^{\left[\log C_r + \frac{(Ec_i - Ec_r)}{10}\right]} \quad (3.4)$$

na qual:

- C_i = concentração de sedimentos em suspensão estimada na célula número i (mg/l);
- C_r = concentração de sedimentos em suspensão medida no nível de referência para calibragem (mg/l);
- Ec_i = intensidade do eco correspondente a célula de número i (dB);
- Ec_r = intensidade do eco correspondente ao nível de referência (dB).

A Figura 3.8 mostra esquematicamente uma coluna de dados do ADCP (*ensemble*), indicando as variáveis consideradas no método de conversão e o nível de referência, local onde é medida a concentração de sedimentos em suspensão, por amostragem mecânica ou óptica para calibragem, simultaneamente com o registro do sinal acústico.

FIGURA 3.8 - ESQUEMA DE CONVERSÃO DO SINAL ACÚSTICO EM CONCENTRAÇÃO DE SEDIMENTOS



FONTE: MAYERLE, POERBANDONO [2002]

A Equação 3.4, obtida pela formulação proposta por DEINES [1999], é equivalente a relação apresentada em SONTEK [2002], a qual considera que um aumento na intensidade do eco de 3 dB, irá corresponder a um aumento equivalente ao dobro na concentração de sedimentos em suspensão.

MAYERLE e POERBANDONO [2002] concluíram, através da análise de dados de campo, que os resultados do método proposto por DEINES [1999] são significativamente melhores quando o incremento da intensidade do eco ($Ec_i - Ec_r$) da Equação 3.4 é multiplicado por um coeficiente, que no presente estudo será chamado de K_M , conforme indicado na seguinte equação:

$$C_i = 10^{\left[\log C_r + \frac{K_M (Ec_i - Ec_r)}{10}\right]} \quad (3.5)$$

Segundo MAYERLE e POERBANDONO [2002] o valor do coeficiente K_M varia entre 0,35 e 0,55 e recomendam um valor padrão de 0,45.

LU [2003] realizou testes com dados coletados no *Mar de Wadden* (Mar do Norte da Alemanha) considerando valores do coeficiente K_M iguais a 0,35, 0,45 e 0,55 e constatou não haver diferenças significativas nos resultados obtidos.

3.3.4.2 Método de PATINO e BYRNE [2001]

PATINO e BYRNE [2001] aplicaram técnicas de análise de regressão para desenvolver uma relação empírica entre a intensidade do eco e a concentração de sedimentos em suspensão para o canal *North Fork*, localizado no sul da Flórida. A Equação 3.6 mostra a forma geral da equação usada para estabelecer a correlação.

$$C_i = 10^{\{Ec_i[a+b\log_{10}(s)-c\log_{10}(T)]+d\log_{10}(V)+e\}} \quad (3.6)$$

na qual, a , b , c e d são coeficientes da regressão e e é o ponto onde a reta intercepta o eixo das ordenadas, C_i é a concentração de sedimentos correspondente a célula i , Ec_i é

a intensidade do eco medida na célula i em dB, s é a salinidade em ppt, T é a temperatura em graus *Celsius* e V é a velocidade do escoamento.

O canal *North Fork* é um canal de maré que deságua em *St. Lucie River Estuary*. Nesse canal, com largura de 85 m e profundidade média de 2,43 m, as velocidades do escoamento são da ordem de 0,46 m/s e a salinidade varia entre 0,2 mg/l e 15 mg/l [PATINO; BYRNE, 2001]. No estudo em questão, as amostras de água foram coletadas com amostrador pontual e as concentrações de sedimentos em suspensão variaram entre 3 mg/l e 25 mg/l. A Equação 3.7 proposta por Patino e Byrne para o canal *North Fork*, considera variações de temperatura e salinidade.

$$C_i = 10^{\{Ec_i[0,07462+0,00084\log_{10}(s)-0,02957\log_{10}(T)]-1,4615\}} \quad (3.7)$$

na qual, C_i é a concentração de sedimentos, Ec_i é a intensidade do eco medida em dB, s é a salinidade em ppt e T é a temperatura em graus *Celsius*.

3.3.4.3 Método de GARTNER [2002]

GARTNER [2002] sugere a seguinte equação para conversão da intensidade do eco em concentração de sedimentos em suspensão:

$$C_i = 10^{(Ec_i A + B)} \quad (3.8)$$

na qual, C_i é a concentração de sedimentos correspondente a célula i , Ec_i é a intensidade do eco medida na célula i em dB, A e B são, respectivamente, o coeficiente angular e o ponto onde a reta intercepta o eixo das ordenadas, determinados por regressão dos valores correspondentes de intensidade do eco e concentração de sedimentos, medidos simultaneamente, em uma plotagem mono-log na forma $\log_{10}(C_i) = Ec_i A + B$.

3.3.4.4 Dados de Intensidade do Eco

A intensidade do eco é derivada do sinal recebido pelos receptores do ADCP, registrado em *counts* (unidade interna do ADCP) e convertido em decibéis através da multiplicação pelo fator de escala de intensidade do eco K_c .

O processamento do sinal acústico registrado pelo ADCP é feito por *softwares* desenvolvidos especificamente para esse fim. O presente estudo utiliza um *software* chamado *WinRiver*, produzido pela *RD Instruments*.

O valor do fator de escala de intensidade do eco K_c é calculado pelo *WinRiver* pela seguinte equação:

$$K_c = \frac{127,3}{(T + 273)} \quad (3.9)$$

na qual, T é a temperatura no transdutor em graus *Celsius*.

O *WinRiver* considera as perdas devidas à expansão do feixe acústico e à absorção acústica (mencionadas nos itens 3.3.3.1 e 3.3.3.2, respectivamente) no cálculo da intensidade do eco de três maneiras distintas, em função da distância do local amostrado em relação ao transdutor do ADCP. Para isso, utiliza um parâmetro denominado *Near Zone Distance* (d_{NZD}), definido como sendo a distância a partir do transdutor onde o feixe acústico transforma-se de cilíndrico para cônico [RD INSTRUMENTS, 2003]. Para o equipamento utilizado no presente estudo (*Workhorse* Rio Grande 1200 kHz) o valor padrão da *Near Zone Distance* (d_{NZD}) é 2,10 m.

a) Para posições localizadas a distâncias inferiores a $0,85d_{NZD}$ do transdutor:

$$Ec_i = K_c E_i + 20 \log(d_{NZD}) + 2\alpha R_i - 10 \log\left(\frac{L}{\cos \theta}\right) \quad (3.10)$$

na qual:

$$R_i = \frac{r_i + 0,5L}{\cos\theta} \quad (3.11)$$

- Ec_i = intensidade do eco corrigida correspondente à célula número i em dB;
 E_i = intensidade do eco registrada pelo ADCP, correspondente à célula número i , em *counts*;
 r_i = distância do transdutor ao meio da célula (*bin*) número i ;
 θ = ângulo do feixe acústico relativo ao eixo vertical do perfilador;
 L = comprimento do pulso transmitido (m);
 α = coeficiente de absorção acústica da água (dB/m);
 K_c = fator de escala de intensidade do eco (dB/*counts*).

b) Para posições localizadas em distâncias entre $0,85d_{NZD}$ e $2d_{NZD}$ do transdutor:

$$Ec_i = K_c E_i + 20\log(R_i) + 2\alpha R_i - 10\log\left(\frac{L}{\cos\theta}\right) + 4\log\left(3 - \frac{R_i}{d_{NZD}}\right) \quad (3.12)$$

c) Para posições localizadas em distâncias do transdutor maiores que $2d_{NZD}$:

$$Ec_i = K_c E_i + 20\log(R_i) + 2\alpha R_i - 10\log\left(\frac{L}{\cos\theta}\right) \quad (3.13)$$

Nas fórmulas 3.10, 3.12 e 3.13 o termo $2\alpha R_i$ representa a redução na intensidade do eco causada pela absorção acústica na água. O coeficiente de absorção acústica na água α (em dB/m) é calculado pelo *WinRiver* em função da temperatura, da salinidade e da frequência do equipamento.

3.3.5 Critério para avaliação da eficiência do método de conversão

Para avaliar a eficiência dos métodos de conversão do sinal acústico em concentração de sedimentos em suspensão, diversos autores têm se baseado na razão de discrepância definida por VAN RIJN [1984] pela Equação 3.14.

$$r = \frac{C_{estimada}}{C_{medida}} \quad (3.14)$$

na qual, $C_{estimada}$ é a concentração estimada pela amostragem acústica e C_{medida} é a concentração medida através de amostragem mecânica ou óptica.

A avaliação é feita com base na porcentagem dos resultados obtidos que resultam dentro de uma determinada faixa de variação de r , chamada de fator. A Tabela 3.1 relaciona o fator com a respectiva faixa de variação de r .

TABELA 3.1 – FATOR E FAIXA DE VARIAÇÃO DE r

	fator 1,25	fator 1,5	fator 2	fator 3	fator 5
r	0,8 ~ 1,25	0,75 ~ 1,5	0,5 ~ 2	0,33 ~ 3	0,2 ~ 5

FONTE: LU [2003]

LU [2003] considerou aceitável um resultado em que 70 % (ou mais) das concentrações estimadas resultaram dentro do fator 2. No mesmo trabalho, resultados com mais de 85 % das estimativas dentro do fator 2 foram considerados apropriados.

No presente trabalho, todas as figuras que fazem confronto das concentrações possuem as delimitações do fator 2 (2 vezes e ½ vez).

4 APLICAÇÃO DA AMOSTRAGEM ACÚSTICA

4.1 Medição do Fluxo de Sedimentos com ADCP na Bacia Amazônica

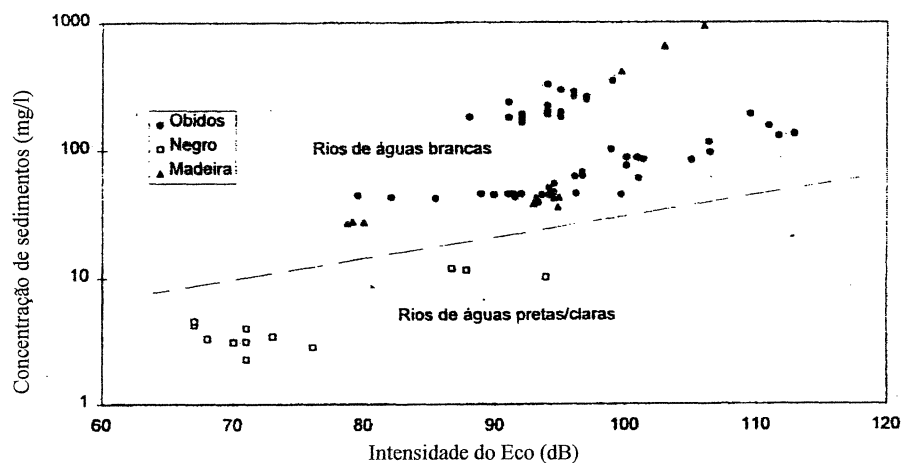
No Brasil, o primeiro relato de utilização do ADCP para a medição do transporte de sedimentos em suspensão, realizada no ano de 1995, foi apresentada por FILIZOLA e GUYOT [1996]. O estudo foi realizado na bacia Amazônica, em uma região na qual encontram-se os mais importantes tributários do rio Amazonas (rios Solimões, Negro, Madeira e Tapajós). Nos rios selecionados, além da importância em termos de quantidade de água, existe também grande quantidade de sedimentos em suspensão. Os rios Solimões/Amazonas e Madeira, classificados como de águas brancas (origem andina), são responsáveis pela maior parte da carga de sedimentos em suspensão do rio Amazonas em Óbidos (estação situada a jusante no trecho estudado), ao passo que os rios Negro e Tapajós, classificados como de águas pretas e claras, transportam bem menos sedimentos em suspensão.

Os autores verificaram, através da análise de gráficos de intensidade do sinal acústico do ADCP, que o fluxo de sedimentos nas seções levantadas apresentou comportamento padrão. No entanto, a relação entre concentração de sedimentos em suspensão e intensidade do sinal acústico do ADCP apresentou famílias de pontos graficamente distintas (ver Figuras 4.1 e 4.2 onde é mostrada a relação entre a intensidade do eco e a concentração de sedimentos), tanto numa mesma estação, quando analisada sua variação dentro do ciclo hidrológico, quanto numa comparação entre estações, no que se refere a tipos de água diferentes (pretas, claras ou brancas).

Quanto à variação espacial da relação entre concentração de sedimentos e intensidade do sinal, foi verificada uma distinção bastante pronunciada entre os rios de águas brancas e os rios de águas pretas ou claras, mostrada na Figura 4.1.

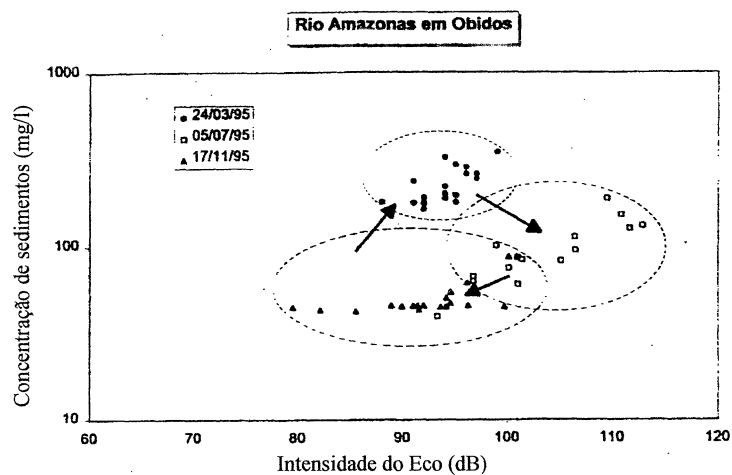
A variação temporal foi verificada pela análise isolada dos dados de uma única estação (Óbidos), conforme mostrado na Figura 4.2.

FIGURA 4.1 — DISTINÇÃO ENTRE RIOS DE ÁGUAS BRANCAS E RIOS DE ÁGUAS PRETAS/CLARAS



FONTE: FILIZOLA, GUYOT [1996]

FIGURA 4.2 — VARIAÇÃO TEMPORAL OBSERVADA EM DADOS COLETADOS EM DIFERENTES CAMPANHAS DE MEDIÇÃO EM ÓBIDOS



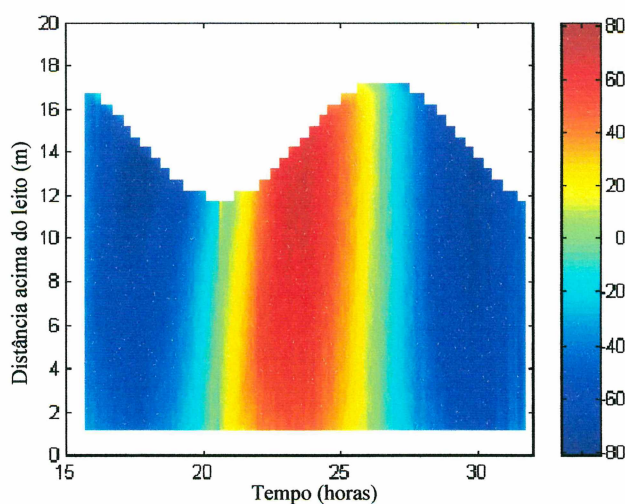
FONTE: FILIZOLA, GUYOT [1996]

4.2 Amostragem Acústica em Áreas Costeiras

SONTEK [2002] apresenta os resultados obtidos por um perfilador acústico ADP (fabricado pela *SonTek*), no Golfo da Califórnia, próximo à San Felipe (México), em abril de 1996.

A região estudada fica aproximadamente 16 km a noroeste de *San Felipe* (México). A profundidade observada nos períodos de maré alta foi da ordem de 18,5 m e a amplitude das marés foi superior a 5 m. As medições foram realizadas com um equipamento ADP 1,5 MHz *Stand-Alone* durante um período de 16 horas. O ADP foi configurado para registrar 50 células de 0,50 m por vertical, garantindo que o perfil registrado incluísse toda a coluna de água e a reflexão de superfície. Os perfis de velocidades foram registrados a cada 5 minutos. A Figura 4.3 apresenta variações temporais e espaciais na velocidade do escoamento. A cor mostrada em cada célula, para cada hora, indica a velocidade do fluxo, em cm/s, pela escala indicada no lado direito do gráfico.

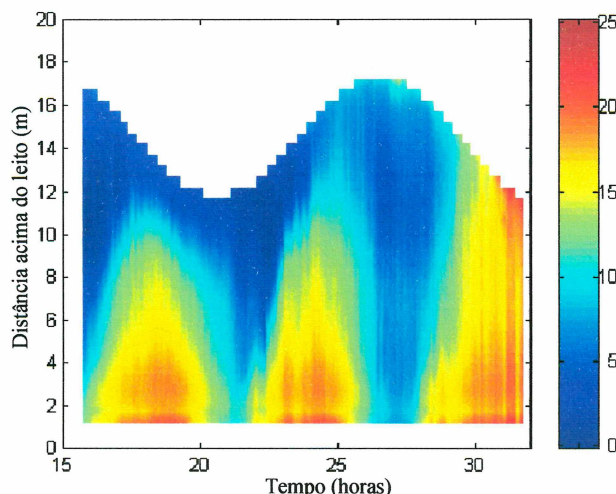
FIGURA 4.3 – PLOTAGEM DA VELOCIDADE CONTRA O TEMPO E A PROFUNDIDADE



FONTE: SONTEK [2002]

A Figura 4.4 mostra a plotagem da intensidade do sinal acústico registrada pelo ADP ao longo de todo o período de medição. A escala à direita do gráfico indica a intensidade do sinal acústico, em dB, em cada célula. Os dados foram corrigidos para as perdas devidas à distância (absorção acústica e expansão do feixe acústico) e convertidos para uma escala de referência arbitrária. Observou-se uma variação de mais de 20 dB nos valores de intensidade do sinal acústico corrigido.

FIGURA 4.4 – INTENSIDADES DO SINAL ACÚSTICO REGISTRADAS PELO ADP



FONTE: SONTEK [2002]

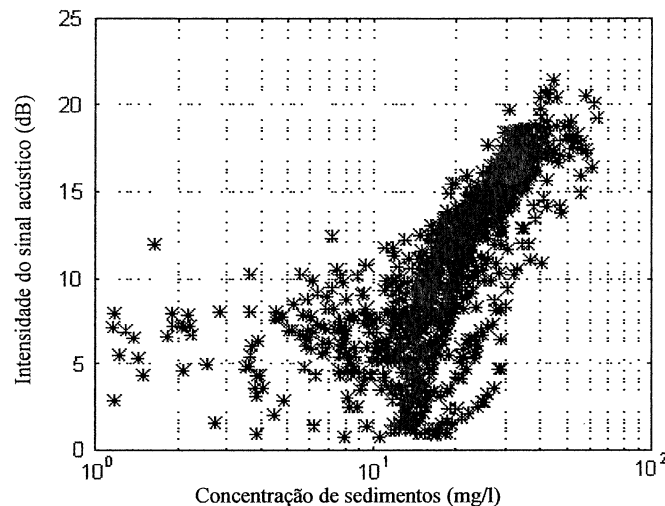
Na Figura 4.4, os sinais acústicos de maior intensidade indicam maiores concentrações de sedimentos junto ao fundo. Durante os períodos de velocidade alta, as concentrações de sedimentos ao longo da coluna de água resultaram maiores. Os sinais acústicos mais intensos verificados próximos à superfície livre (após a trigésima hora da medição) foram, provavelmente, devidos à presença de bolhas de ar geradas pelo vento e quebra de ondas.

A cada hora, durante a amostragem com o ADP, a concentração de sedimentos em suspensão foi medida com um amostrador óptico (OBS – *Optical Backscatter Sensor*). A Figura 4.5 mostra a plotagem da concentração medida pelo OBS contra as intensidades do sinal acústico registradas pelo ADP. Observou-se uma boa correlação entre os dados para altas concentrações de sedimentos. Entretanto, para baixas concentrações foram constatadas grandes variações, as quais podem estar associadas à presença de outras partículas (material biológico, bolhas, etc.) ou diferentes sensibilidades das técnicas de medição.

SONTEK [2002] concluiu que os dados apresentados na Figura 4.5 podem ser usados para obter a correlação entre a intensidade do sinal acústico registrada pelo ADP e a concentração de sedimentos em suspensão, a qual permitiria a determinação da concentração de sedimentos em suspensão ao longo de todo o período de

amostragem. A dispersão observada na Figura 4.5 indica que essas estimativas de concentração de sedimentos em suspensão seriam corretas para aproximadamente um fator 2 (valores estimados resultando entre a metade e o dobro da concentração medida).

FIGURA 4.5 — CALIBRAGEM DA INTENSIDADE DO SINAL ACÚSTICO REGISTRADA PELO ADP COM CONCENTRAÇÕES MEDIDAS COM OBS



FONTE: SONTEK [2002]

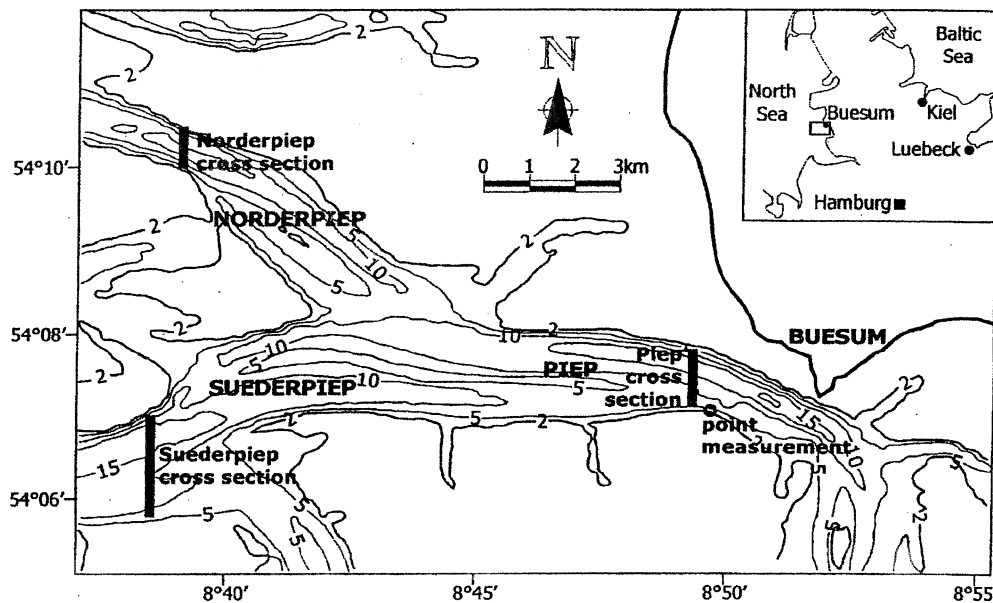
4.3 Eficiência do Amostrador Acústico na Estimativa da Concentração de Sedimentos em Suspensão

MAYERLE e POERBANDONO [2002] analisaram a eficiência da amostragem acústica para estimativa da concentração de sedimentos em suspensão a partir de medições realizadas no Mar do Norte da Alemanha. As medições foram realizadas com perfilador acústico e amostradores ópticos e mecânicos instalados em uma embarcação. Foram feitas medições ao longo das seções transversais *Norderpiep*, *Suederpiep* e *Piep* e medições pontuais em uma estação próxima à *Buesum*, conforme indicado na Figura 4.6.

A área em estudo é dominada principalmente por forças de marés, com amplitude média de 3,5 m, na qual observam-se ondas de até 3 m de altura ao longo dos limites externos. As condições de escoamento apresentaram profundidades variando entre 4 m e 20 m e velocidades de 0,1 m/s a 0,9 m/s. Os sedimentos em

suspensão apresentaram diâmetros variando entre 5 μm e 90 μm e as distribuições de concentrações de sedimentos resultaram em geral bastante uniformes. As concentrações de sedimentos em suspensão atingiram valores de até, aproximadamente, 1.000 mg/l.

FIGURA 4.6 – MAR DO NORTE DE ALEMANHA - LOCAIS DE MEDIÇÃO



FONTE: POERBANDONO, MAYERLE [2002]

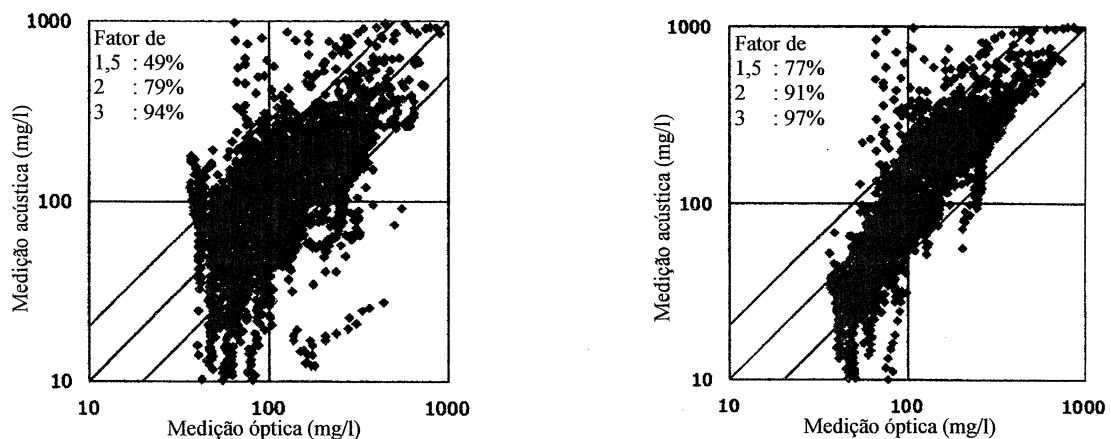
Foram analisados dados de, aproximadamente, duzentos perfis verticais, nos quais foram medidos perfis de concentrações com equipamento óptico (*Transmissometer*) e concentrações de sedimentos com amostrador mecânico próximo ao fundo, simultaneamente com medições de sinais acústicos com ADCP. As medições acústicas foram feitas com um perfilador modelo 1200 kHz *Direct Reading Broadband Acoustic Doppler Current Profiler* produzido pela *RD Instruments*.

O método utilizado para conversão do sinal acústico em concentração de sedimentos em suspensão foi o método proposto por DEINES [1999], considerando a multiplicação do incremento da intensidade do eco ($Ec_i - Ec_r$), da Equação 3.4, pelo coeficiente K_M igual a 0,45, conforme mencionado no item 3.3.4.1. A eficiência da amostragem acústica foi verificada através de comparações entre os resultados obtidos

e as concentrações de sedimentos em suspensão estimadas simultaneamente pela amostragem óptica. O efeito da escolha da concentração de referência e do nível de referência sobre as concentrações de sedimentos em suspensão resultantes, estimadas pelo método acústico, também foi investigado.

O efeito da concentração de referência foi avaliado através da comparação entre resultados obtidos considerando como concentração de referência os valores de concentração medidos com o amostrador mecânico e com o equipamento óptico. Neste caso, o nível de referência foi considerado a 1 m acima do fundo (posição onde foi feita a amostragem mecânica). A Figura 4.7 mostra que os melhores resultados foram obtidos considerando como concentração de referência os valores medidos com equipamento óptico - a considerar que o ajuste foi testado contra concentrações de sedimentos estimadas por equipamento óptico. Aproximadamente 80% e 90% das concentrações estimadas resultaram dentro do fator 2, considerando como concentração de referência as concentrações medidas com amostrador mecânico e com equipamento óptico, respectivamente. As discrepâncias mais significativas resultaram em baixas concentrações para as quais ambos os equipamentos parecem ser incapazes de fazer estimativas adequadas.

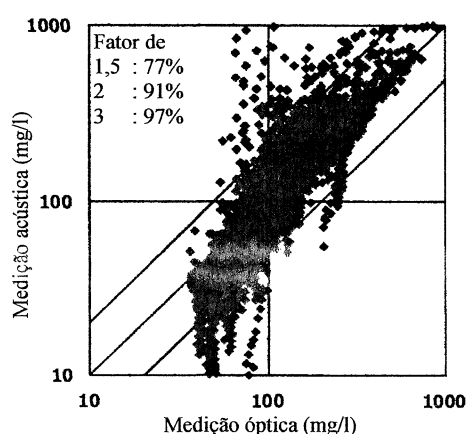
FIGURA 4.7 — COMPARAÇÃO ENTRE CONCENTRAÇÕES DE SEDIMENTOS OBTIDAS POR EQUIPAMENTOS ACÚSTICO E ÓPTICO – NÍVEL DE REFERÊNCIA A 1 m ACIMA DO FUNDO



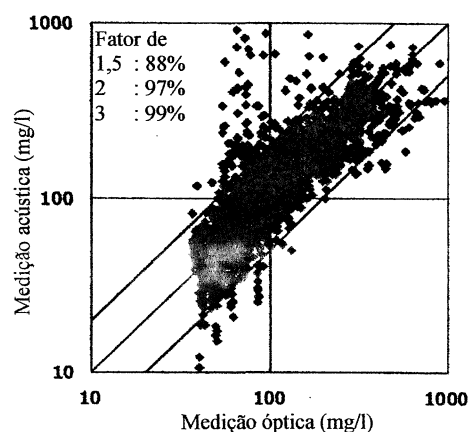
FONTES: MAYERLE, POERBANDONO [2002]

Para investigar o efeito do nível de referência sobre os resultados foram feitas comparações entre concentrações de sedimentos em suspensão estimadas considerando níveis de referência próximo ao fundo (1 m) e a meia profundidade. A Figura 4.8 mostra a comparação das concentrações de sedimentos em suspensão estimadas por amostragem óptica e acústica, considerando os dois níveis de referência. Foi observada uma importante dependência do nível de referência nos resultados obtidos. Considerando o nível de referência a meia profundidade, aproximadamente 97% das concentrações estimadas resultaram dentro do fator 2, ao passo que para o nível de referência próximo ao leito, 91% dos valores estimados resultaram dentro do fator 2.

FIGURA 4.8 — COMPARAÇÃO ENTRE MEDIÇÕES ÓPTICAS E ACÚSTICAS CONSIDERANDO DIFERENTES NÍVEIS DE REFERÊNCIA



a) Nível de referência 1m acima do fundo

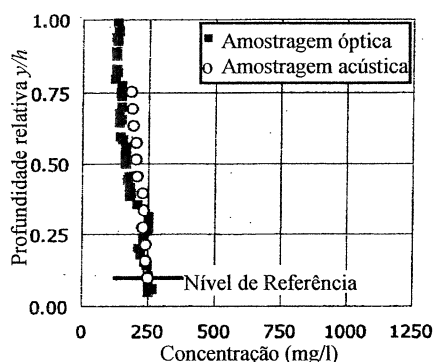


b) Nível de referência a meia profundidade

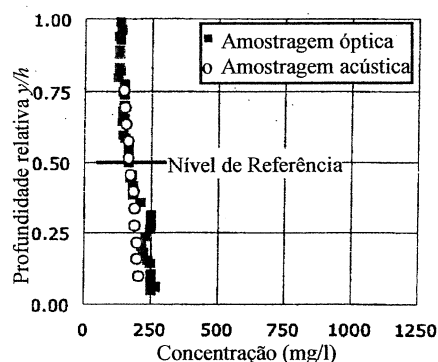
FONTE: MAYERLE, POERBANDONO [2002]

MAYERLE e POERBANDONO [2002] concluíram que a influência do nível de referência nas concentrações de sedimentos em suspensão estimadas pelo método de DEINES [1999] é mais importante no caso de distribuições não uniformes de concentrações ao longo da vertical. As Figuras 4.9 e 4.10 mostram, respectivamente, perfis de concentrações de sedimentos em suspensão com distribuições uniforme e não uniforme ao longo da profundidade, obtidos considerando concentrações de referência medidas com equipamento óptico.

FIGURA 4.9 — DISTRIBUIÇÃO UNIFORME DE CONCENTRAÇÕES DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO AO LONGO DA VERTICAL



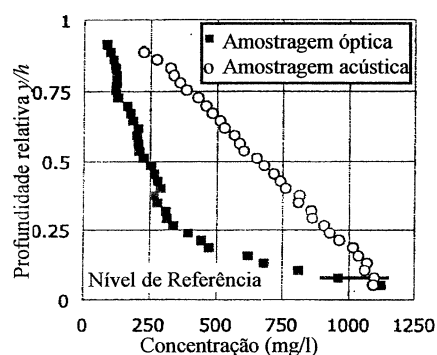
a) Nível de referência 1m acima do fundo



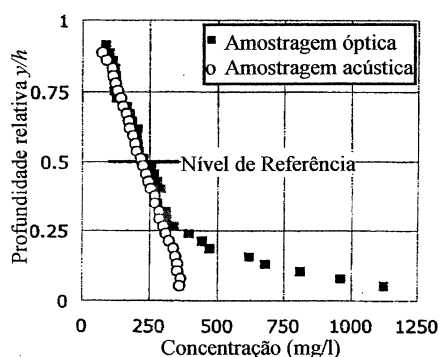
b) Nível de referência a meia profundidade

FONTE: MAYERLE, POERBANDONO [2002]

FIGURA 4.10 — DISTRIBUIÇÃO NÃO UNIFORME DE CONCENTRAÇÕES DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO AO LONGO DA VERTICAL



a) Nível de referência 1m acima do fundo



b) Nível de referência a meia profundidade

FONTE: MAYERLE, POERBANDONO [2002]

Os perfis apresentados na Figura 4.9 mostraram que, no caso de distribuições uniformes de concentrações ao longo da vertical, o perfil estimado pelo método acústico resultou bastante próximo do perfil obtido pelo equipamento óptico, independentemente do nível de referência considerado. No entanto, para o caso de distribuição não uniforme de concentrações, apresentado na Figura 4.10, observou-se uma grande melhora nos resultados considerando o nível de referência a meia profundidade.

4.4 Avaliação de Métodos Empíricos para Conversão do Sinal Acústico em Concentração de Sedimentos em Suspensão

LU [2003] avaliou a aplicação dos métodos propostos por DEINES [1999], SONTEK [2002], PATINO e BYRNE [2001] e GARTNER [2002]. O estudo foi realizado a partir de dados coletados no estuário *Eider* e no canal *Piep*, localizados no mar de *Wadden* (Mar do Norte da Alemanha).

Os equipamentos utilizados foram: um ADCP 1.200 kHz da *RD Instruments*, um amostrador óptico tipo *transmissometer* e um amostrador mecânico tipo *trap sampler*.

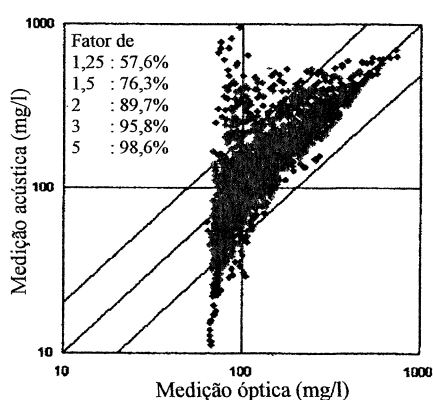
No estuário *Eider*, o tamanho do sedimentos em suspensão variou entre 8 μm e 40 μm . As medições foram realizadas em uma posição fixa durante um período de 7 horas. As profundidades do escoamento variaram entre 4,4 m e 7,2 m, as velocidades médias resultaram entre 0,044 m/s e 1,084 m/s. As temperaturas medidas foram entre 15,9 °C e 16,7 °C e as salinidades entre 23,8 ppt e 25,2 ppt (partes por mil).

No canal *Piep*, os sedimentos em suspensão apresentaram diâmetros entre 6 μm e 86 μm . As medições foram realizadas ao longo da seção transversal com aproximadamente 1250 m. As profundidades do escoamento variaram entre 4,7 m e 19,9 m, as velocidades médias resultaram entre 0,046 m/s e 1,116 m/s. As temperaturas registradas foram entre 15,1 °C e 15,6 °C e as salinidades entre 25,3 ppt e 27,1 ppt.

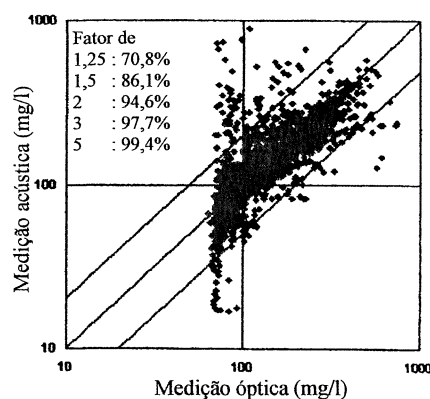
Os gráficos das Figuras 4.11 e 4.12 mostram os resultados obtidos pela aplicação dos métodos de conversão propostos por DEINES [1999] e SONTEK [2002], respectivamente. LU [2003], baseando-se na experiência de MAYERLE e POERBANDONO [2002], aplicou o método de DEINES [1999] considerando um coeficiente K_M igual a 0,45, multiplicado ao incremento de intensidade do eco. A equação da SONTEK [2002] no estudo em questão é igual a Equação 3.4, proposta pelo método de DEINES [1999], sem o coeficiente K_M . A concentração de referência foi determinada com o amostrador óptico e os níveis de referência foram considerados a 1 m do fundo e a meia profundidade. O método de DEINES [1999], considerando o coeficiente K_M igual a 0,45, apresentou melhores resultados que a equação da

SONTEK [2002]. Observou-se que, em ambos os casos, os resultados melhores foram obtidos considerando o nível de referência a meia profundidade, da mesma forma que já havia sido constatado por MAYERLE e POERBANDONO [2002].

FIGURA 4.11 – COMPARAÇÃO ENTRE MEDIÇÕES ÓPTICAS E ACÚSTICAS PARA DIFERENTES NÍVEIS DE REFERÊNCIA – MÉTODO DE DEINES [1999]



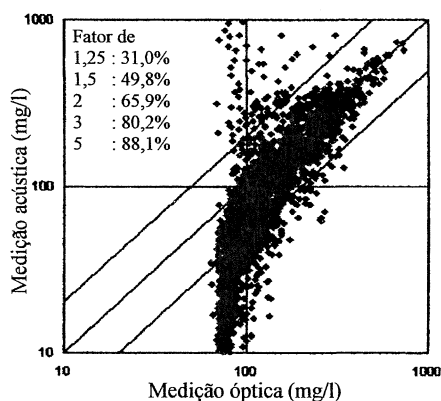
a) Nível de referência 1m acima do fundo



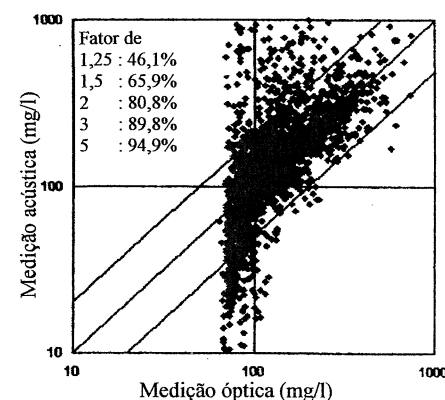
b) Nível de referência a meia profundidade

FONTE: LU [2003]

FIGURA 4.12 – COMPARAÇÃO ENTRE MEDIÇÕES ÓPTICAS E ACÚSTICAS PARA DIFERENTES NÍVEIS DE REFERÊNCIA – MÉTODO DA SONTEK [2002]



a) Nível de referência 1m acima do fundo

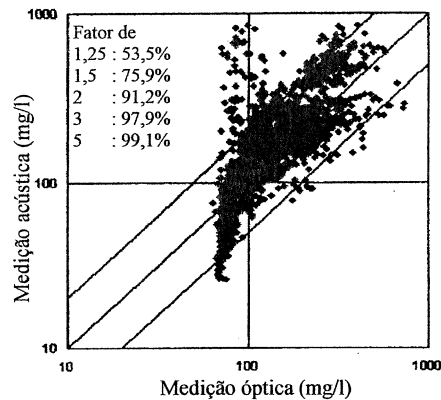


b) Nível de referência a meia profundidade

FONTE: LU [2003]

LU [2003] aplicou a Equação 3.7, proposta por PATINO e BYRNE [2001] para o canal *North Fork*, localizado no sul da Flórida, aos dados que coletou e obteve bons resultados, como pode ser visto na Figura 4.13.

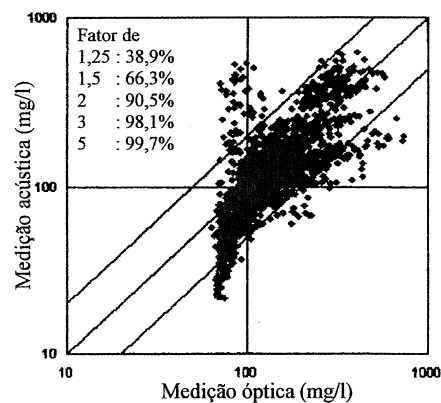
FIGURA 4.13 — COMPARAÇÃO ENTRE MEDIÇÕES ÓPTICAS E ACÚSTICAS – MÉTODO PROPOSTO POR PATINO E BYRNE [2001]



FONTE: LU [2003]

LU [2003] obteve os coeficientes da Equação 3.8, proposta no método de GARTNER [2002], por regressão de 102 concentrações de sedimentos medidas por amostragem mecânica simultaneamente com registros de intensidade do sinal acústico. A equação obtida foi aplicada aos demais dados de intensidade do eco e os resultados foram comparados a concentrações de sedimentos medidas com amostrador óptico. Este método de conversão também obteve bons resultados, a considerar que 90,5% das estimativas resultaram dentro do fator 2, conforme mostrado na Figura 4.14.

FIGURA 4.14 — COMPARAÇÃO ENTRE MEDIÇÕES ÓPTICAS E ACÚSTICAS – MÉTODO PROPOSTO POR GARTNER [2002]



FONTE: LU [2003]

Analisando separadamente os resultados obtidos no canal *Piep* e no estuário *Eider* e considerando razões de discrepância dentro do fator 2, as aplicações dos métodos de DEINES [1999], SONTEK [2002], PATINO e BYRNE [2001] e GARTNER [2002] conduziram às seguintes porcentagens de resultados considerados corretos:

TABELA 4.1 - COMPARAÇÃO DOS QUATRO MÉTODOS DE CONVERSÃO
(% DE RESULTADOS CORRETOS)

	DEINES [1999]	SONTEK [2002]	PATINO e BYRNE [2001]	GARTNER [2002]
Estuário <i>Eider</i>	100	99	92	100
Canal <i>Piep</i>	93	76	91	88

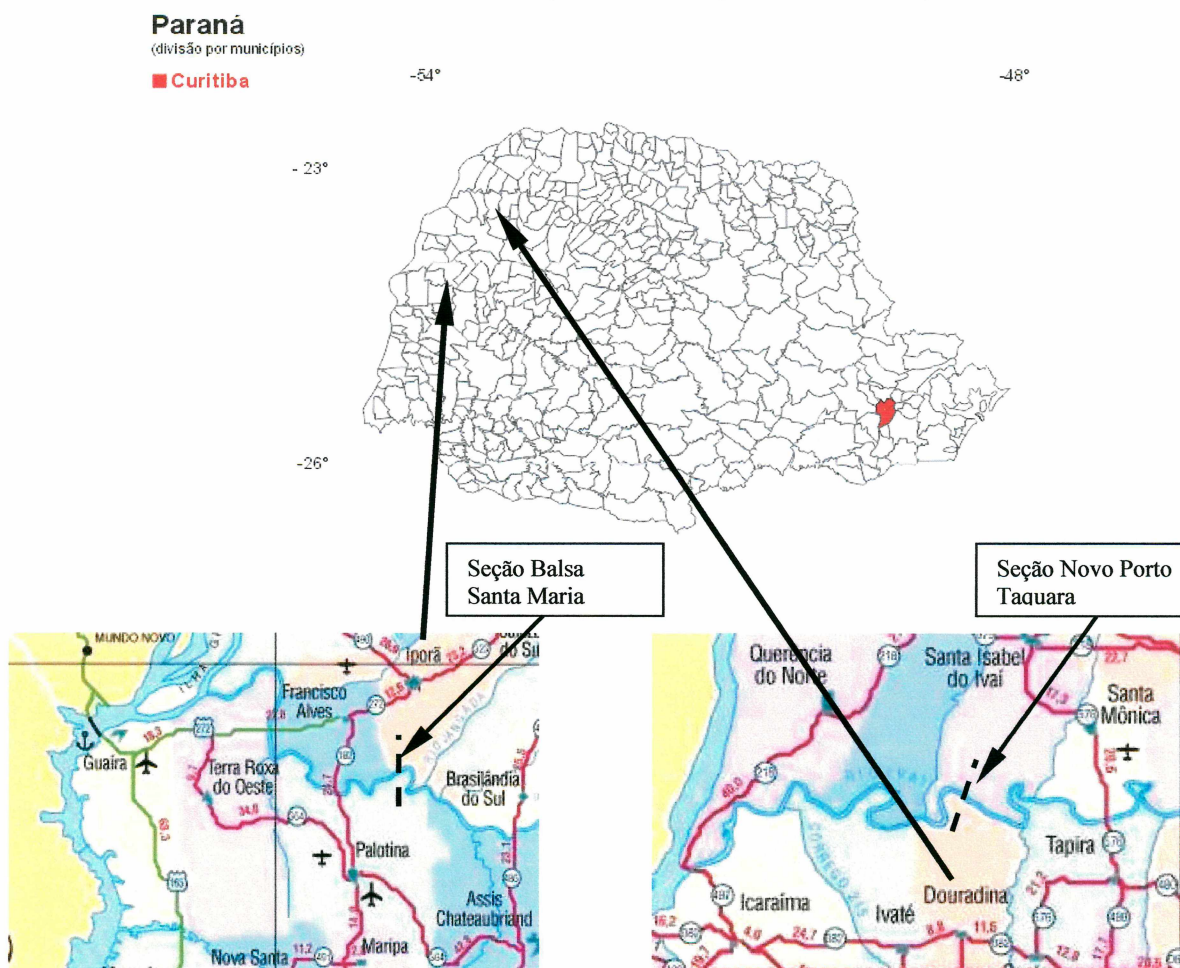
LU [2003] investigou separadamente os efeitos referentes ao local da medição, à profundidade do escoamento, à velocidade média e à variação da concentração de sedimentos ao longo da vertical, porém constatou que não ocorreram influências significativas nos resultados obtidos pelos métodos de conversão. No entanto, verificou que os melhores ajustes ocorreram nos casos com menor profundidade, baixas velocidades e medição em posição fixa (estuário *Eider* – ver Tabela 4.1). Observou, também, que para condições com variação da concentração de sedimentos ao longo da vertical superiores a 250 mg/l (distribuições não uniformes de concentrações) os resultados foram um pouco piores.

5 ESTUDO DE CASO

5.1 Local de Coleta dos Dados

Os dados foram coletados nos rios Piquiri e Ivaí, localizados no oeste e no noroeste do estado do Paraná, respectivamente. Em ambos os casos, as seções de medição foram escolhidas buscando locais com grande vazão, profundidade e potencial para existência de sedimentos. Para tanto, as seções foram escolhidas próximas ao desembocamento desses rios no rio Paraná, conforme indicado na Figura 5.1. No rio Piquiri, as amostras foram coletadas na seção Balsa Santa Maria, localizada no Município de Iporã. No rio Ivaí, a seção transversal escolhida foi Novo Porto Taquara, no Município de Douradina.

FIGURA 5.1 – LOCALIZAÇÃO DAS SEÇÕES DE MEDIÇÃO



No rio Piquiri a largura da seção transversal medida foi 207 m. A vazão medida foi de 332 m³/s e a velocidade média do escoamento da ordem de 0,46 m/s. As profundidades do escoamento nas verticais amostradas variaram entre 2,20 m e 5,10 m. A temperatura da água medida foi de 19°C. Os sedimentos em suspensão nas amostras coletadas apresentaram predominantemente partículas de silte. A seção Balsa Santa Maria está ilustrada na fotografia da Figura 5.2.

FIGURA 5.2 – RIO PIQUIRI – SEÇÃO BALSA SANTA MARIA



No rio Ivaí a largura da seção transversal medida foi 155 m. A vazão medida foi de 392 m³/s e a velocidade média do escoamento foi de 0,65 m/s. Nas verticais amostradas as profundidades do escoamento variaram entre 3,80 m e 4,80 m. A temperatura da água medida foi de 19,5°C. A análise granulométrica indicou que a maior parte dos sedimentos em suspensão é composta por partículas de silte. A seção Novo Porto Taquara pode ser vista na Figura 5.3.

FIGURA 5.3 – RIO IVAÍ – SEÇÃO NOVO PORTO TAQUARA



5.2 Equipamentos Utilizados

Para realizar as amostragens ao longo das seções transversais dos rios foi utilizada uma embarcação equipada com motor de popa, sobre a qual foram montados os equipamentos de amostragem (ver Figura 5.4).

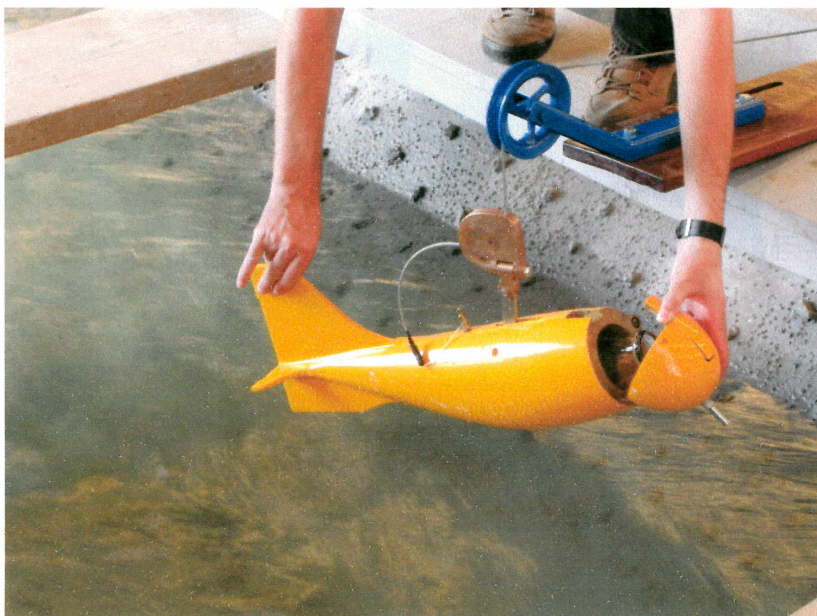
FIGURA 5.4 – EMBARCAÇÃO UTILIZADA NAS COLETAS DOS DADOS DE CAMPO



5.2.1 Amostradores mecânicos

As características do presente estudo conduziram à necessidade da utilização de amostradores mecânicos que permitissem a coleta de amostras pontuais de água com sedimentos. Inicialmente, planejava-se fazer a coleta das amostras através de um amostrador mecânico USP-61, apresentado no item 3.1.1 e mostrado na Figura 5.5. No entanto, durante os estudos, constatou-se que este amostrador não funciona adequadamente em fluxos com velocidades inferiores a 0,6 m/s e o uso desse amostrador ficou restrito a alguns pontos no rio Ivaí. Por esse motivo e pela necessidade de coletar grandes amostras de água com sedimentos, com volume em torno de 50 litros (destinadas a análise granulométrica dos sedimentos), optou-se pelo desenvolvimento de um amostrador por bombeamento.

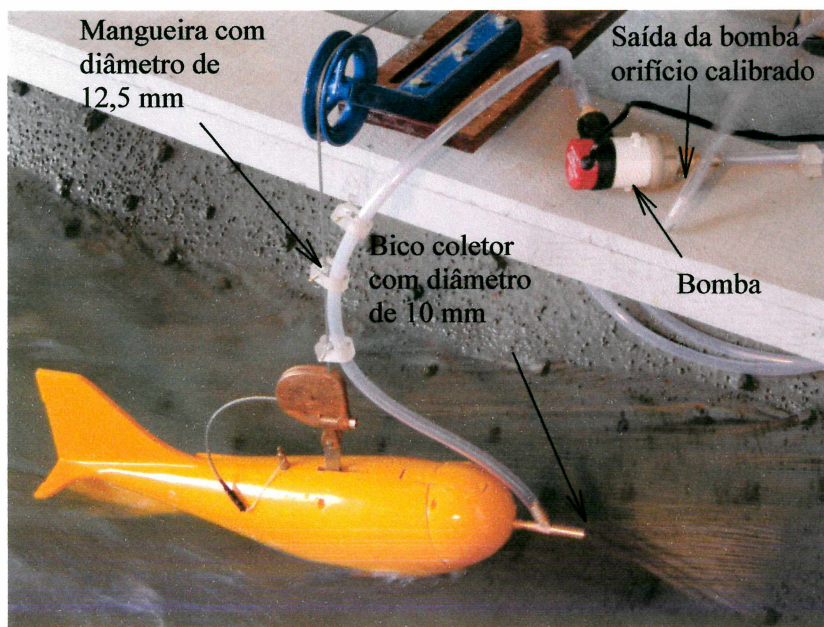
FIGURA 5.5 – AMOSTRADOR USP-61 – TESTES NO LABORATÓRIO



O amostrador por bombeamento desenvolvido, testado e calibrado no laboratório do Centro de Hidráulica e Hidrologia Professor Parigot de Souza - CEHPAR, foi composto de: uma bomba com motor de 6 ampéres (alimentada por uma bateria de 12 volts), um trecho de 8 metros de mangueira flexível com diâmetro interno de 12,5 mm, e um bico coletor com diâmetro de 10 mm fabricado em latão.

Para coletar a amostra na profundidade desejada, o bico coletor foi instalado no amostrador USP-61, conforme ilustrado na Figura 5.6.

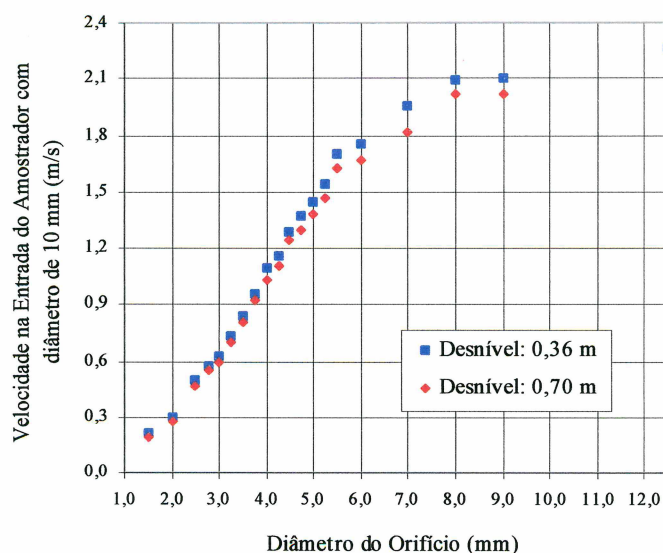
FIGURA 5.6 — SISTEMA DE AMOSTRAGEM POR BOMBEAMENTO



O ajuste da velocidade do fluxo na entrada do amostrador, de forma a mantê-la próxima à velocidade ambiente do escoamento no local amostrado, foi feito pelo controle da vazão na saída da bomba, através da colocação de orifícios calibrados no final da mangueira, conforme o gráfico mostrado na Figura 5.7. Em todas as coletas realizadas a velocidade na entrada do amostrador foi imposta entre 0,8 e 1,2 vezes a velocidade ambiente, atendendo ao estudo de YUQIAN [1989] para que o erro na medição da concentração de sedimentos local não resultasse superior a 5% (citado no item 3.1).

Durante o bombeamento das amostras, a velocidade do fluxo no interior da mangueira de 12,5 mm foi mantida superior a 0,30 m/s, de forma a garantir que não ocorresse perda de concentração devido à velocidade de queda das partículas. Esse valor é equivalente a dez vezes a velocidade de queda de uma partícula com diâmetro de 0,25 mm (ver Figura 2.1 – T : 20 °C e $S.F.$:0,7).

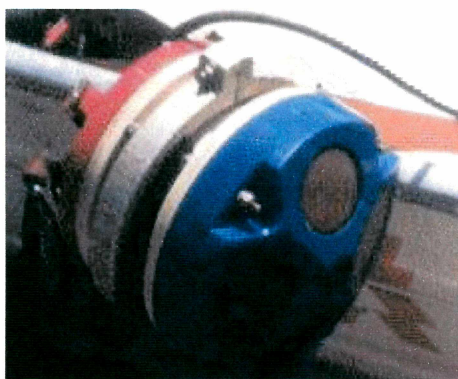
FIGURA 5.7 – GRÁFICO DA VELOCIDADE NA ENTRADA DO AMOSTRADOR CONTRA O DIÂMETRO DO ORIFÍCIO ACOPLADO AO FINAL DA MANGUEIRA



5.2.2 Equipamento Acústico - ADCP

A amostragem acústica foi realizada com um ADCP, modelo *Workhorse* Rio Grande 1.200 kHz, produzido pela *RD Instruments*, mostrado na Figura 5.8 abaixo.

FIGURA 5.8 – PERFILADOR ACÚSTICO DE CORRENTE (ADCP)



As características do perfilador ADCP usado estão descritas abaixo:

- Modelo : *Workhorse* Rio Grande ADCP 1.200 kHz
- Tipo : *Broad Band*
- Ângulo do feixe acústico : 20°
- Tamanho das células : 0,25 m a 2,00 m

- Número de células : 1 a 128
- Alcance : 21 m
- Resolução da velocidade : 1 mm/s
- Faixa de velocidades : ± 3 m/s (padrão) e ± 20 m/s (máximo)
- Precisão da intensidade do eco : 1,5 dB

FONTE: RD INSTRUMENTS [2003]

Durante as amostragens o ADCP foi operado com a seguinte configuração:

- Tamanho das células : 0,25 m
- Número de células por *ensemble* : 50
- Pulsos por *ensemble* : 5
- Comprimento do pulso transmitido : 0,25 m
- Potência transmitida : 255 *counts*

5.3 Metodologia Aplicada na Coleta das Amostras

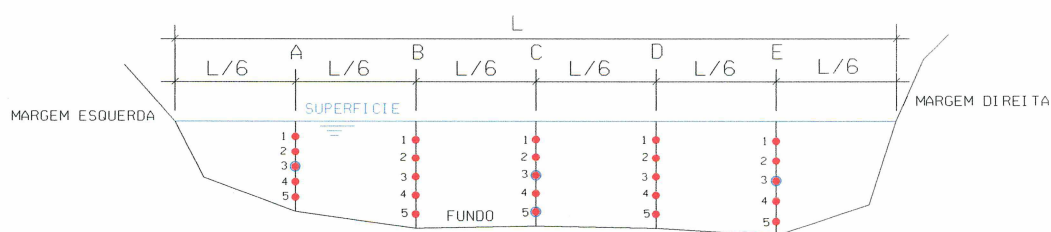
A metodologia aplicada na coleta dos dados de campo, incluindo amostras de água e sedimentos (amostragem mecânica) e amostras de sinais acústicos (ADCP), compreendeu três etapas:

1. Inicialmente, foi esticado um cabo de aço transversalmente ao rio, para permitir a ancoragem da embarcação durante a coleta de dados em uma determinada posição da seção transversal;
2. A seção transversal do rio foi dividida em seis partes iguais, definindo cinco posições igualmente distanciadas (verticais de amostragem), nas quais foram coletadas as amostras, conforme mostrado na Figura 5.9;
3. Ao longo de cada uma das cinco verticais de amostragem foram coletadas cinco amostras de água e sedimentos (amostragem mecânica com volume aproximado de 1 litro), simultaneamente com as amostras de sinais acústicos registrados pelo ADCP. Das cinco amostras, coletadas em cada vertical, uma foi coletada a 0,60 m acima do leito do rio e as outras quatro foram coletadas em posições igualmente espaçadas ao longo da coluna de água restante, acima dos primeiros 0,60 m,

conforme ilustrado na Figura 5.10. A amostra próxima ao leito foi coletada a 0,60 m de distância para garantir uma posição na qual o ADCP conseguiria registrar o sinal acústico com precisão.

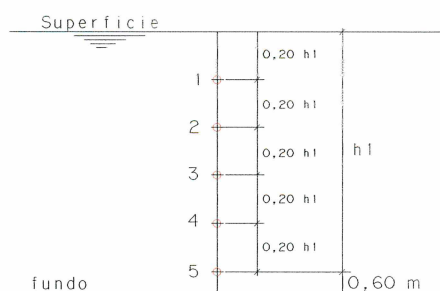
Para a análise granulométrica dos sedimentos, foram coletadas quatro amostras em cada seção, duas, a meia profundidade, nas verticais próximas às margens do rio (verticais A e E) e, duas na vertical central da seção (vertical C), sendo uma próxima ao leito do rio e outra a meia profundidade, conforme mostrado na Figura 5.9.

FIGURA 5.9 – POSIÇÃO DAS VERTICAIS DE AMOSTRAGEM (A, B, C, D, E) AO LONGO DA SEÇÃO TRANSVERSAL



Na Figura 5.9 os pontos vermelhos indicam as posições onde foram coletadas as amostras para determinação dos perfis de concentração de sedimentos. Os pontos vermelhos com círculos azuis (pontos número: 3 da vertical A, 3 e 5 da vertical C e 3 da vertical E) indicam as posições onde foram coletadas as amostras de grande volume (50 litros) para análise granulométrica dos sedimentos.

FIGURA 5.10 – COLETA DAS AMOSTRAS AO LONGO DAS VERTICAIS DE AMOSTRAGEM



Durante o tempo em que foi realizada a coleta de cada amostra de água com sedimentos, foram anotados o arquivo de dados e os números dos *ensembles* (colunas de sinais acústicos) registrados pelo ADCP.

5.4 Processamento dos Dados

Após a coleta, as amostras de água com sedimentos foram enviadas ao laboratório para determinação da concentração de sedimentos e análise granulométrica. O método da filtração foi utilizado para determinação da concentração de sedimentos suspensos. A granulometria do sedimento foi determinada em laboratório pelo método do Tubo de Retirada pelo Fundo.

A aquisição e processamento dos dados registrados pelo ADCP foram feitos através do *software WinRiver*. Após o processamento, este programa forneceu, para cada *ensemble*, a profundidade correspondente a cada célula, a velocidade do escoamento em cada célula, e as intensidades dos ecos, registradas pelos quatro transdutores em cada célula. As intensidades dos ecos fornecidas pelo *WinRiver* já são convertidas em decibéis e corrigidas para as perdas devido à expansão do feixe acústico e absorção acústica pela água, conforme a formulação apresentada no item 3.3.4.5.

O valor representativo da intensidade do eco, correspondente a cada amostra de água e sedimentos, foi tomado como média dos valores registrados na célula correspondente a posição em que foi coletada amostra de água, durante o tempo da coleta.

Nesse estudo foram utilizados somente os dados acústicos considerados 100% bons (100% *good*) pelo equipamento. *Percent-good* é a fração dos dados aprovados em critérios próprios do fabricante. Os critérios para rejeição incluem: baixa correlação, grande erro de velocidade e detecção de peixes ou outros corpos submersos [GORDON, 1996].

As concentrações de sedimentos em suspensão e as intensidades dos sinais acústicos correspondentes a cada amostra coletada nos rios Piquiri e Ivaí estão indicados nas Tabelas 5.1 a 5.3, apresentadas na sequência.

Os perfis de velocidades do escoamento, medidos ao longo das verticais de amostragem (A, B, C, D e E), nos rios Piquiri e Ivaí, estão apresentados no Anexo.

TABELA 5.1 – RESUMO DOS DADOS COLETADOS NO RIO PIQUIRI

Vertical	Amostra	Distância do Leito (y) (m)	Profundidade Relativa (y/h)	Concentração de Sedimentos (mg/l)	Intensidade do Eco (dB)
A $h = 2,2$ m	1	1,88	0,85	23,5	82,67
	2	1,56	0,71	23,0	83,07
	3	1,24	0,56	23,0	86,61
	4	0,92	0,42	24,5	87,19
	5	0,60	0,27	22,5	85,58
B $h = 3,2$ m	1	2,68	0,84	24,0	81,57
	2	2,16	0,68	21,5	84,23
	3	1,64	0,51	21,5	82,35
	4	1,12	0,35	21,5	81,83
	5	0,60	0,19	24,5	81,44
C $h = 3,9$ m	1	3,24	0,83	22,0	81,87
	2	2,58	0,66	24,0	81,08
	3	1,92	0,49	23,5	81,83
	4	1,26	0,32	27,0	81,06
	5	0,60	0,15	24,0	80,51
D $h = 5,1$ m	1	4,20	0,82	15,5	84,65
	2	3,30	0,65	17,0	81,07
	3	2,40	0,47	16,5	81,31
	4	1,50	0,29	15,5	80,37
	5	0,60	0,12	16,0	80,20
E $h = 3,7$ m	1	3,08	0,83	14,5	80,72
	2	2,46	0,66	15,0	82,96
	3	1,84	0,50	15,5	80,81
	4	1,22	0,33	15,0	82,34
	5	0,60	0,16	15,4	81,49

NOTAS:

- Todas as amostras de água e sedimentos foram coletadas com amostrador por bombeamento;
- A localização das verticais A, B, C, D e E, onde foram feitas as amostragens, encontra-se indicada na Figura 5.9;
- A localização dos pontos 1, 2, 3, 4 e 5, onde foram coletadas as amostras de água e sedimentos, encontra-se indicada na Figura 5.10.

TABELA 5.2 – RESUMO DOS DADOS COLETADOS NO RIO IVAÍ

Vertical	Amostra	Distância do Leito (y) (m)	Profundidade Relativa (y/h)	Concentração de Sedimentos (mg/l)	Intensidade do Eco (dB)
A $h = 3,8$ m	1	3,16	0,83	12,5	82,34
	2	2,52	0,66	12,0	84,83
	3	1,88	0,49	8,0	82,69
	4	1,24	0,33	11,0	82,83
	5	0,60	0,16	11,5	82,96
B $h = 4,5$ m	1	3,72	0,83	9,5	83,16
	2	2,94	0,65	9,0	86,74
	3	2,16	0,48	12,0	84,07
	4	1,38	0,31	8,5	87,82
	5	0,60	0,13	9,5	92,02
C $h = 4,4$ m	1	3,64	0,83	8,5	83,40
	2	2,88	0,65	9,5	85,41
	3	2,12	0,48	8,5	84,25
	4	1,36	0,31	11,0	86,31
	5	0,60	0,14	14,0	88,34
D $h = 4,5$ m	1	3,72	0,83	8,5	81,95
	2	2,94	0,65	13,5	84,11
	3	2,16	0,48	11,5	83,96
	4	1,38	0,31	9,5	85,12
	5	0,60	0,13	12,5	90,13
E $h = 4,8$ m	1	3,96	0,83	11,0	82,73
	2	3,12	0,65	8,5	83,96
	3	2,28	0,48	11,5	83,96
	4	1,44	0,30	9,5	83,98
	5	0,60	0,13	15,0	85,46

NOTAS:

- Todas as amostras de água e sedimentos foram coletadas com amostrador por bombeamento;
- A localização das verticais A, B, C, D e E, onde foram feitas as amostragens, encontra-se indicada na Figura 5.9;
- A localização dos pontos 1, 2, 3, 4 e 5, onde foram coletadas as amostras de água e sedimentos, encontra-se indicada na Figura 5.10.

TABELA 5.3 – RESUMO DOS DADOS COLETADOS NO RIO IVAÍ

Vertical	Amostra	Distância do Leito (y) (m)	Profundidade Relativa (y/h)	Concentração de Sedimentos (mg/l)	Intensidade do Eco (dB)
A $h = 3,8$ m	1	3,16	0,83	17,0	81,83
	2	2,52	0,66	15,0	83,21
B $h = 4,5$ m	1	3,72	0,83	19,0	83,49
	2	2,94	0,65	20,0	85,56
C $h = 4,4$ m	1	3,64	0,83	18,0	83,02
	2	2,88	0,65	21,0	84,63
D $h = 4,5$ m	1	3,72	0,83	16,5	82,66
	2	2,94	0,65	19,5	83,79
E $h = 4,8$ m	1	3,96	0,83	18,0	82,63
	2	3,12	0,65	18,5	83,03

NOTAS:

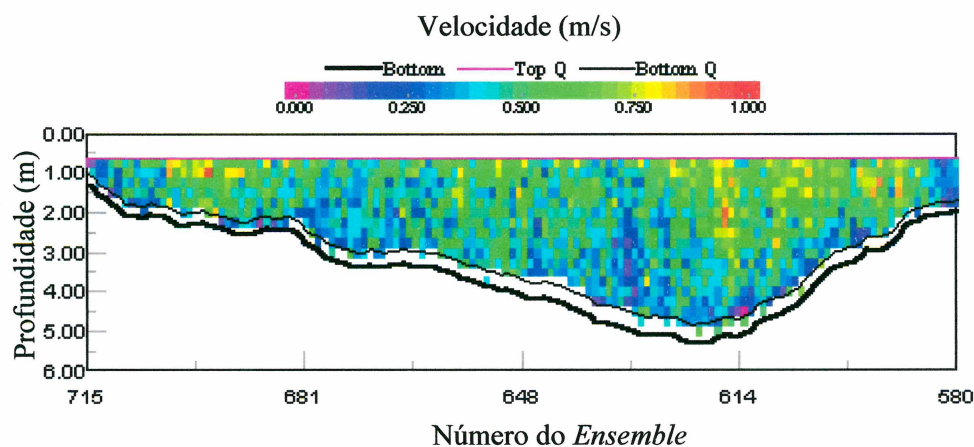
- Todas as amostras de água e sedimentos foram coletadas com amostrador USP-61;
- A localização das verticais A, B, C, D e E, onde foram feitas as amostragens, encontra-se indicada na Figura 5.9;
- A localização dos pontos 1 e 2 onde foram coletadas as amostras de água e sedimentos, encontra-se indicada na Figura 5.10.

Observa-se, nas Tabelas 5.2 e 5.3, que as amostras coletadas pelo sistema de bombeamento apresentaram valores de concentração de sedimentos mais baixos que as amostras coletadas com o amostrador USP-61, considerando as mesmas posições na seção transversal. No presente estudo, foram consideradas somente as amostras coletadas pelo sistema de bombeamento, visando obter uniformidade no processo de amostragem.

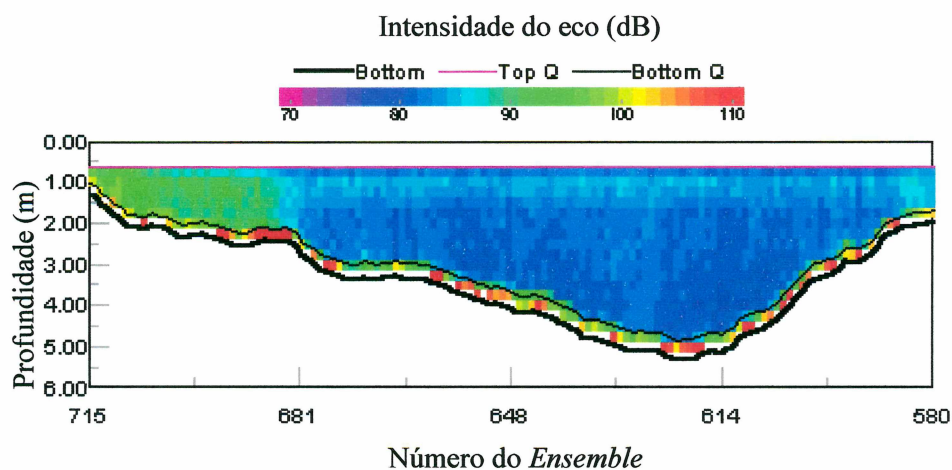
As Figuras 5.11 e 5.12 mostram gráficos de velocidades do escoamento e intensidades dos ecos registrados pelo ADCP nos rios Piquiri e Ivaí, respectivamente. Esses gráficos, plotados pelo *WinRiver*, representam resultados de medições ao longo da seção transversal dos rios. No eixo horizontal estão indicados os números dos *ensembles* registrados e no eixo vertical as profundidades. As velocidades do escoamento e as intensidades dos ecos (*backscatters*), correspondentes a cada célula, estão indicados através de cores, conforme a escala gráfica apresentada acima de cada gráfico.

Nas Figuras 5.11 e 5.12, as regiões do escoamento definidas acima da linha *Top Q* (próxima à superfície da água) e abaixo da linha *Bottom Q* (próximo ao leito) são posições nas quais o ADCP não é capaz de registrar os sinais acústicos com precisão.

FIGURA 5.11 – VELOCIDADES E SINAIS ACÚSTICOS REGISTRADOS NO RIO PIQUIRI

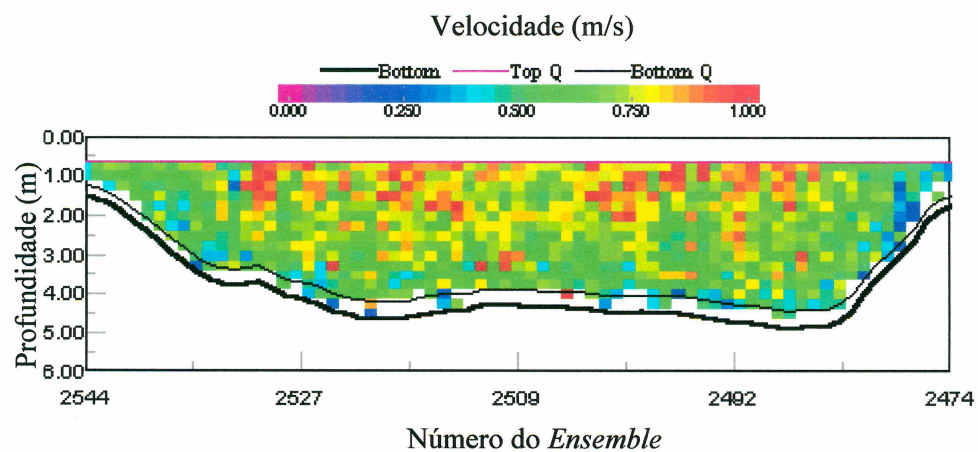


a) Velocidades do escoamento

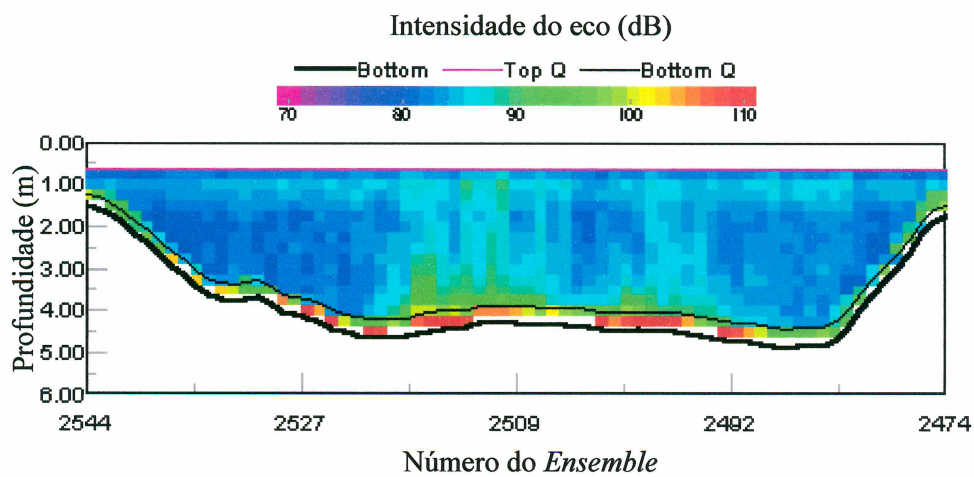


b) Intensidades dos ecos (*backscatter*)

FIGURA 5.12 – VELOCIDADES E SINAIS ACÚSTICOS REGISTRADOS NO RIO IVAÍ



a) Velocidades do escoamento

b) Intensidades dos ecos (*backscatter*)

5.5 Conversão do Sinal Acústico em Concentração de Sedimentos em Suspensão

O método proposto por DEINES [1999] foi aplicado aos dados coletados nos rios Piquiri e Ivaí. Para a avaliação da eficiência deste método de conversão, as concentrações de sedimentos em suspensão estimadas pela amostragem acústica foram comparadas com as concentrações medidas por amostragem mecânica.

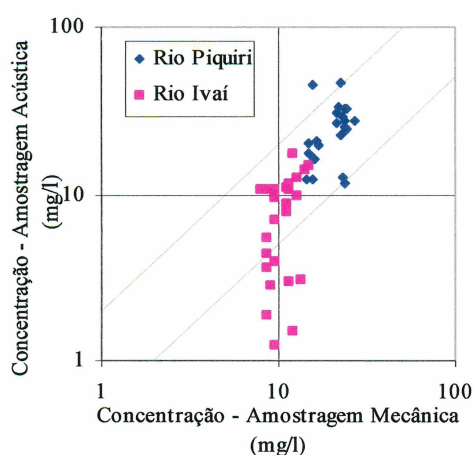
Os métodos de PATINO e BYRNE [2001] e GARTNER [2002] são baseados no uso de regressão para estabelecer a correlação entre intensidades do eco e concentração de sedimentos em suspensão. A aplicação correta desses métodos, de modo a obter correlações que sejam realmente representativas para os rios estudados, requer uma grande quantidade de dados, distribuídos em diversas faixas de concentrações de sedimentos em suspensão. Os dados coletados no presente estudo resultaram muito uniformes, ou seja, apresentaram pouca variação nos valores de concentração de sedimentos. Além disso, o grande mérito desses métodos está no fato de estabelecerem correlações válidas permanentemente para cada seção, sem a necessidade de calibrações, com outras técnicas de amostragem, em cada medição com o ADCP. Portanto, para o estudo da eficiência desses métodos seria necessário dispor de dados coletados nas mesmas seções transversais, em diversas épocas do ano. Por esse motivo, os métodos de PATINO e BYRNE [2001] e GARTNER [2002] não serão aplicados aos dados coletados no presente estudo.

5.5.1 Aplicação do método proposto por DEINES [1999]

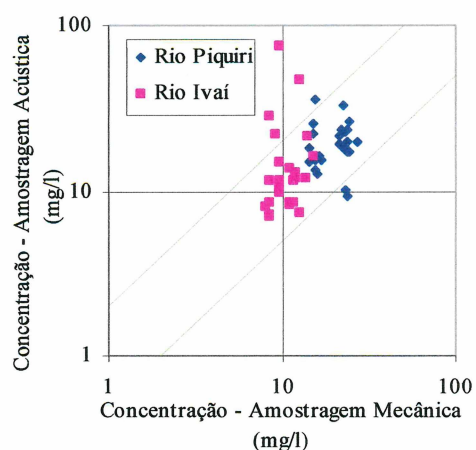
O método de DEINES [1999] foi aplicado aos dados coletados nos rios Piquiri e Ivaí. A conversão das intensidades do sinal acústico em concentração de sedimentos em suspensão foi feita considerando como referência as concentrações medidas com amostrador mecânico. Foram considerados dois níveis de referência: um próximo ao fundo do rio a 0,60 m do leito e outro próximo a meia a profundidade do escoamento.

O método de DEINES [1999] produziu resultados satisfatórios para ambos os rios estudados. A Figura 5.13 mostra a comparação entre as concentrações de sedimentos em suspensão estimadas pelo método de DEINES [1999] e as concentrações medidas simultaneamente com amostrador mecânico. As linhas paralelas indicadas nos gráficos correspondem ao fator 2. Observa-se que considerando o nível de referência próximo ao fundo, 78% dos valores estimados resultaram dentro do fator 2, ao passo que, considerando o nível de referência próximo à meia profundidade, 86% das concentrações estimadas resultaram dentro do fator 2.

FIGURA 5.13 – PLOTAGEM DAS CONCENTRAÇÕES DE SEDIMENTOS ESTIMADAS PELO MÉTODO DE DEINES [1999] CONTRA CONCENTRAÇÕES DE SEDIMENTOS MEDIDAS COM AMOSTRADOR MECÂNICO



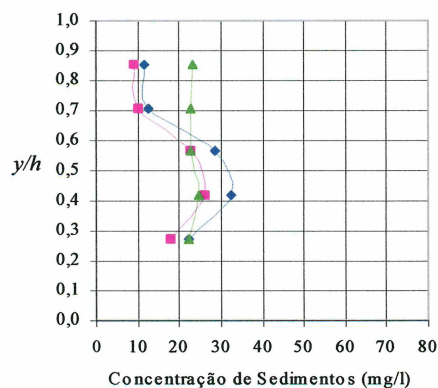
a) Nível de referência próximo ao fundo (0,60 m)



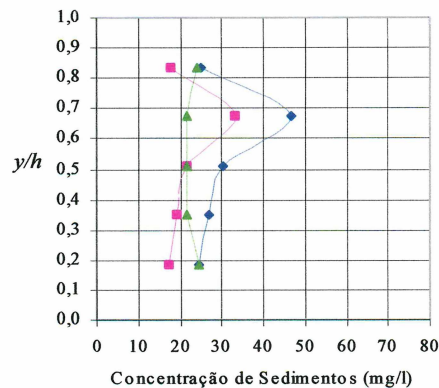
b) Nível de referência próximo a meia profundidade

Os perfis verticais de concentração de sedimentos em suspensão estimados pelo método de DEINES [1999] para o rio Piquiri estão apresentados na Figura 5.14.

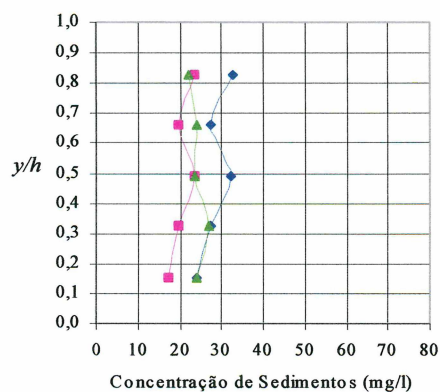
FIGURA 5.14 – PERFIS DE CONCENTRAÇÕES DE SEDIMENTOS ESTIMADOS PELO MÉTODO DE DEINES [1999] – RIO PIQUIRI



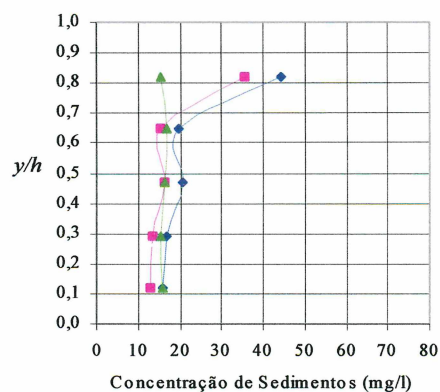
a) Vertical A



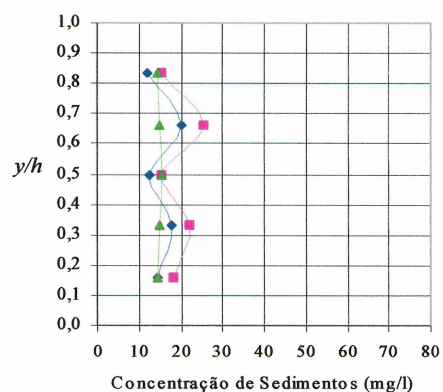
b) Vertical B



c) Vertical C



d) Vertical D

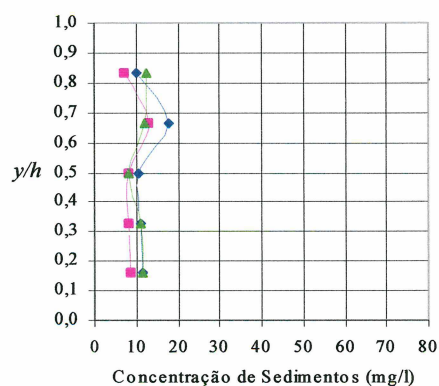


e) Vertical E

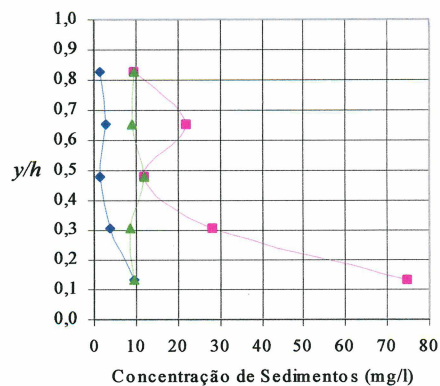
—●— Amostragem acústica - Nível de referência próximo ao fundo
—■— Amostragem acústica - Nível de referência próximo à meia profundidade
—▲— Amostragem mecânica

Na Figura 5.15 estão indicados os perfis de concentrações de sedimentos em suspensão obtidos pelo método de DEINES [1999] para os dados do rio Ivaí.

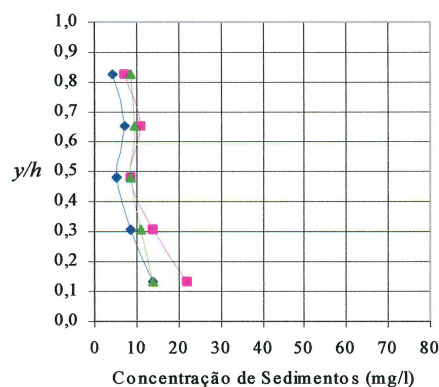
FIGURA 5.15 — PERFIS DE CONCENTRAÇÕES DE SEDIMENTOS ESTIMADOS PELO MÉTODO DE DEINES [1999] - RIO IVAÍ



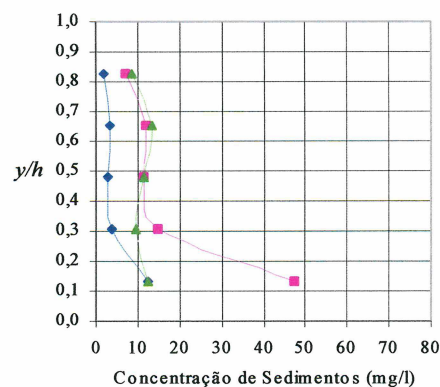
a) Vertical A



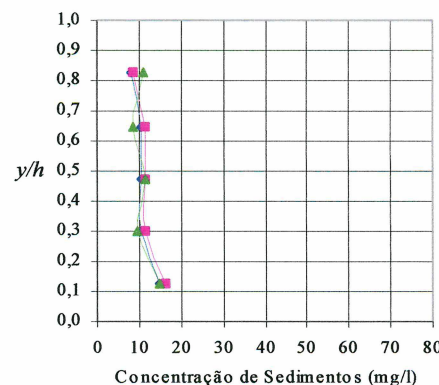
b) Vertical B



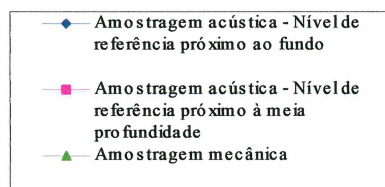
c) Vertical C



d) Vertical D

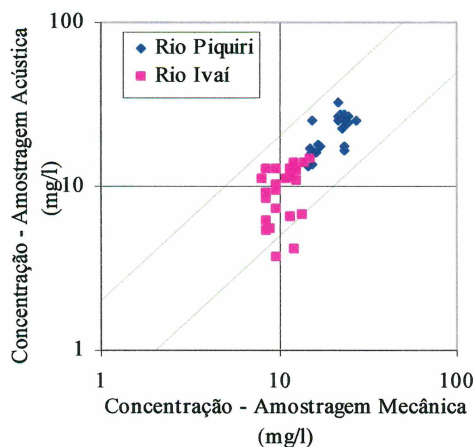


e) Vertical E

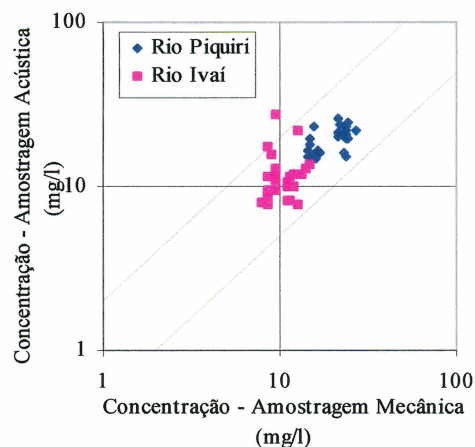


Baseando-se nos estudos realizados por MAYERLE e POERBANDONO [2002], o método proposto por DEINES [1999] também foi aplicado com a Equação 3.5, considerando o coeficiente K_M igual a 0,45. Comparando com os resultados obtidos na aplicação do método de DEINES [1999] usando a Equação 3.4, mostrados na Figura 5.13, observa-se que neste caso, os resultados obtidos foram consideravelmente melhores. A Figura 5.16 mostra o confronto entre as concentrações de sedimentos em suspensão estimadas pelo método de DEINES [1999], usando a Equação 3.5 e o coeficiente K_M igual a 0,45, e as correspondentes concentrações medidas com amostrador mecânico. As linhas paralelas indicadas nos gráficos correspondem ao fator 2. Na Figura 5.16 verifica-se que, para ambos os níveis de referência, 96% das concentrações estimadas resultaram dentro do fator 2.

FIGURA 5.16 – CONCENTRAÇÕES DE SEDIMENTOS ESTIMADAS PELO MÉTODO DE DEINES [1999], USANDO EQUAÇÃO 3.5 E K_M IGUAL A 0,45, CONTRA CONCENTRAÇÕES DE SEDIMENTOS MEDIDAS COM AMOSTRADOR MECÂNICO



a) Nível de referência próximo ao fundo (0,60 m)

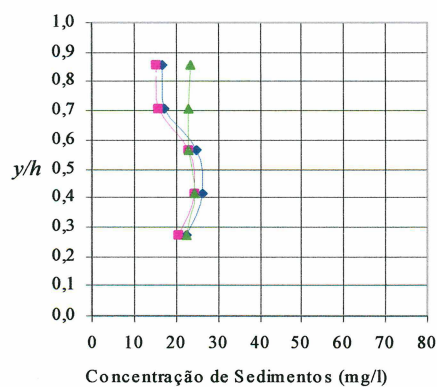


b) Nível de referência próximo a meia profundidade

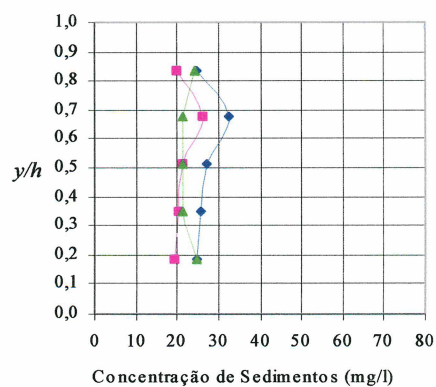
As Figuras 5.17 e 5.18 mostram os perfis verticais de concentrações de sedimentos em suspensão estimados pelo método de DEINES [1999], usando a Equação 3.5 com coeficiente K_M igual a 0,45, para os rios Piquiri e Ivaí, respectivamente. Observa-se que a concordância entre os perfis estimados pela

amostragem acústica e os perfis determinados por amostragem mecânica é significativamente melhor que nos perfis apresentados nas Figuras 5.14 e 5.15.

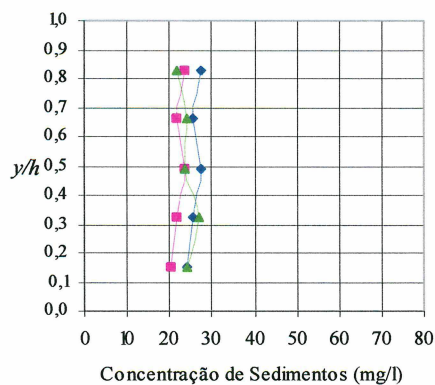
FIGURA 5.17 — PERFIS DE CONCENTRAÇÕES DE SEDIMENTOS ESTIMADOS PELO MÉTODO DE DEINES [1999], USANDO EQUAÇÃO 3.5 E K_M IGUAL A 0,45 – RIO PIQUIRI



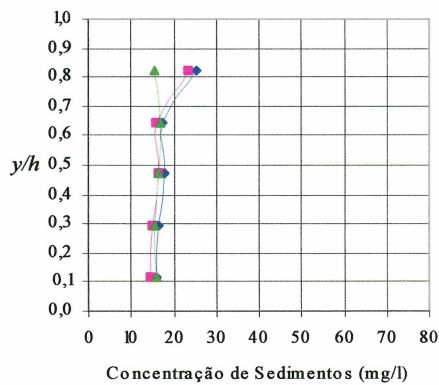
a) Vertical A



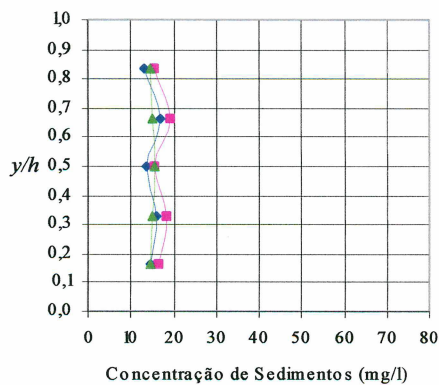
b) Vertical B



c) Vertical C



d) Vertical D



e) Vertical E

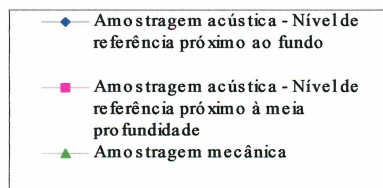
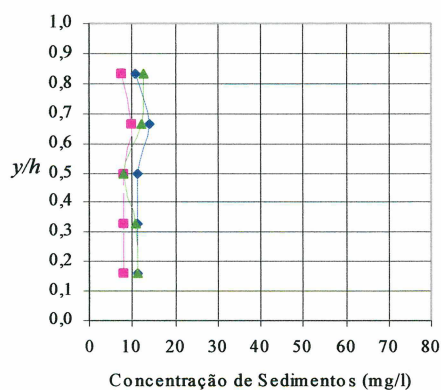
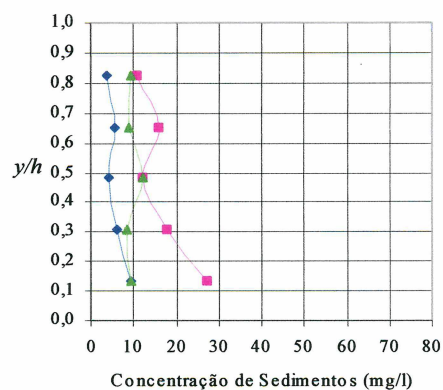


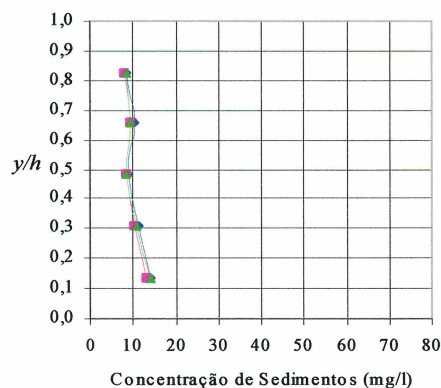
FIGURA 5.18 – PERFIS DE CONCENTRAÇÕES DE SEDIMENTOS ESTIMADOS PELO MÉTODO DE DEINES [1999], USANDO EQUAÇÃO 3.5 E K_M IGUAL A 0,45 – RIO IVAÍ



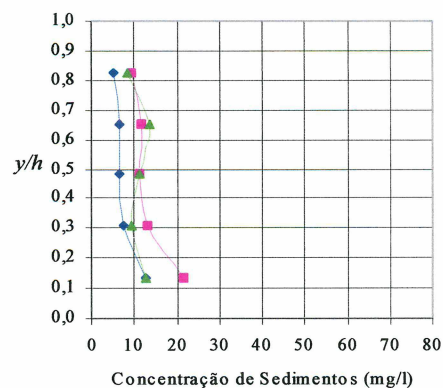
a) Vertical A



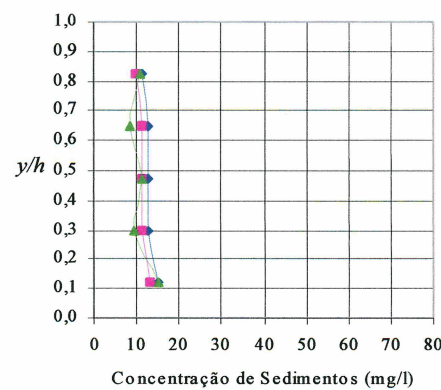
b) Vertical B



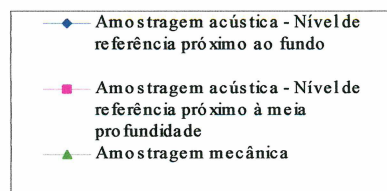
c) Vertical C



d) Vertical D



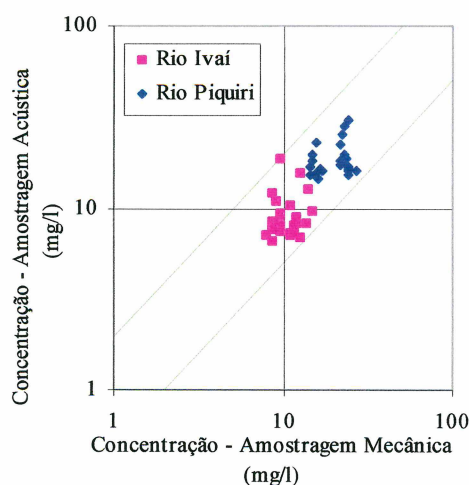
e) Vertical E



Até o presente momento, o método de DEINES [1999] foi aplicado para estimar as concentrações de sedimentos em suspensão ao longo da vertical, considerando uma concentração de referência medida na mesma vertical. No presente estudo foi verificada a aplicação do método proposto por DEINES [1999] para a estimar as concentrações de sedimentos em suspensão nas cinco verticais amostradas da seção transversal dos rios Piquiri e Ivaí, usando como referência a concentração de sedimentos medida em um único ponto da seção. Optou-se pela aplicação do método de DEINES [1999] com a Equação 3.5 e o coeficiente K_M igual 0,45, considerando que, desse modo foram obtidos os melhores resultados. A concentração de sedimentos considerada como referência foi medida a meia profundidade do escoamento na vertical D para o rio Piquiri e na vertical C para o rio Ivaí.

Os resultados obtidos foram tão bons quanto aos observados nas aplicações convencionais do método proposto por DEINES [1999], mostrados na Figura 5.16. A Figura 5.19 mostra o confronto entre as concentrações medidas por amostrador mecânico e as concentrações estimadas pela amostragem acústica. Observa-se que, neste caso, todas as concentrações estimadas resultaram dentro do fator 2.

FIGURA 5.19 – COMPARAÇÃO ENTRE CONCENTRAÇÕES DE SEDIMENTOS ESTIMADAS PELO MÉTODO DE DEINES [1999] E CONCENTRAÇÕES DE SEDIMENTOS MEDIDAS COM AMOSTRADOR MECÂNICO

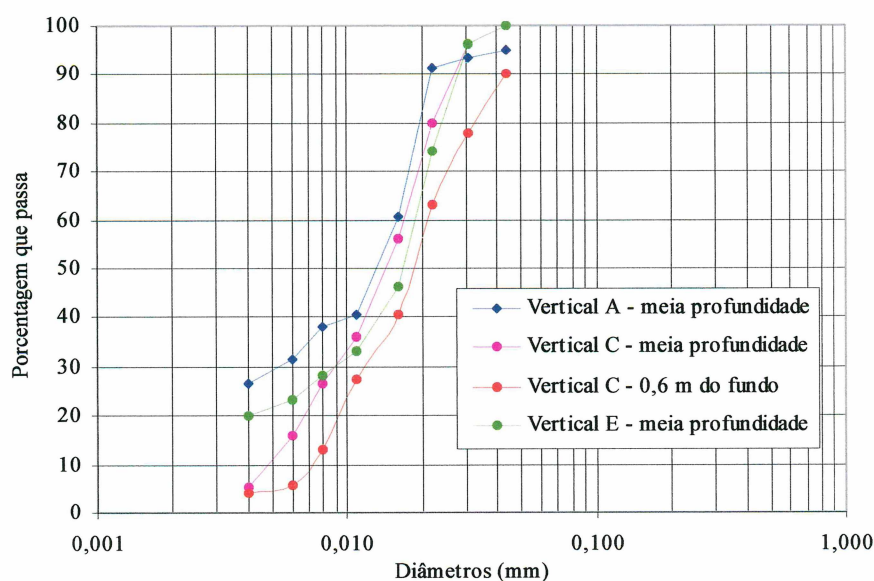


5.6. Granulometria dos Sedimentos

Conforme descrito no item 5.3 e mostrado na Figura 5.9, em cada rio foram coletadas quatro amostras para análise da granulometria dos sedimentos. As análises granulométricas das amostras indicaram a predominância de partículas de silte em ambos os rios.

A Figura 5.20 mostra as curvas granulométricas obtidas a partir das amostras coletadas no rio Piquiri. O diâmetro d_{50} e o desvio padrão geométrico σ_g correspondentes a cada curva estão indicados na Tabela 5.4.

FIGURA 5.20 – CURVAS GRANULOMÉTRICAS DOS SEDIMENTOS DO RIO PIQUIRI



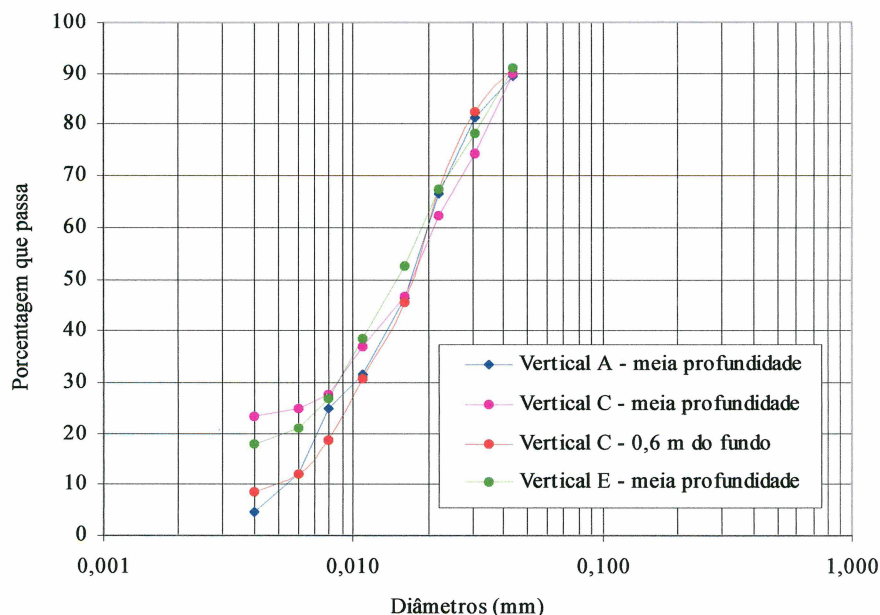
Observa-se que as distribuições granulométricas das três amostras coletadas a meia profundidade são muito próximas, indicando que a granulometria dos sedimentos é relativamente uniforme ao longo da seção transversal do rio Piquiri. A amostra coletada na vertical C, próximo ao fundo, apresentou sedimentos um pouco maiores.

TABELA 5.4 – GRANULOMETRIA DOS SEDIMENTOS DO RIO PIQUIRI

Posição	d_{50} (mm)	σ_g
Vertical A – meia profundidade	0,0131	3,1623
Vertical C – meia profundidade	0,0143	1,9879
Vertical C – 0,6 m do fundo	0,0184	2,0536
Vertical E – meia profundidade	0,0166	3,0720

As curvas granulométricas obtidas a partir das amostras coletadas no rio Ivaí estão indicadas na Figura 5.21.

FIGURA 5.21 – CURVAS GRANULOMÉTRICAS DOS SEDIMENTOS DO RIO IVAÍ



Na Figura 5.21 verifica-se que a distribuição granulométrica dos sedimentos em suspensão ao longo de toda seção transversal do rio Ivaí é bastante uniforme. Na Tabela 5.5 estão apresentados os valores dos diâmetro d_{50} e do desvio padrão geométrico σ_g referentes a cada amostra.

TABELA 5.5 – GRANULOMETRIA DOS SEDIMENTOS DO RIO IVAÍ

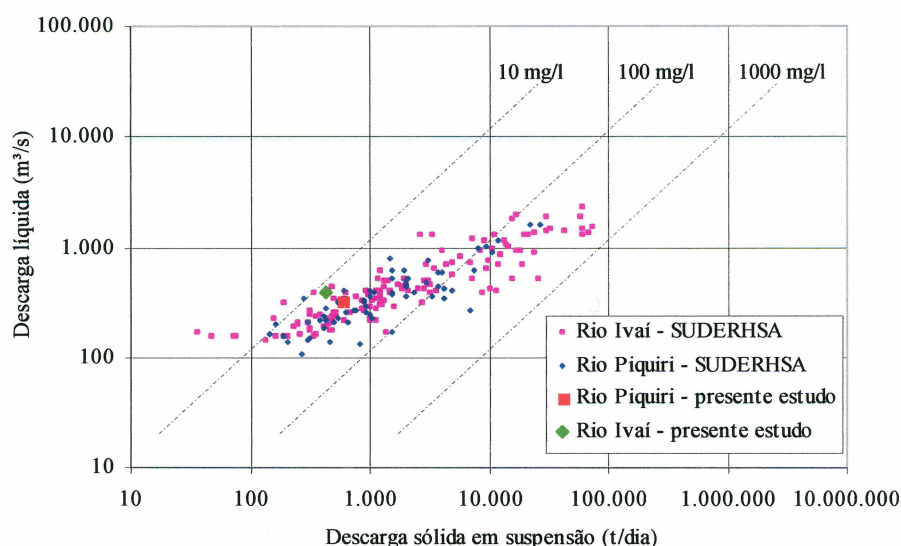
Posição	d_{50} (mm)	σ_g
Vertical A – meia profundidade	0,0165	2,3090
Vertical C – meia profundidade	0,0172	2,3464
Vertical C – 0,6 m do fundo	0,0172	2,1095
Vertical E – meia profundidade	0,0149	3,4323

5.7 Análise dos Resultados Obtidos

5.7.1 Dados coletados em campo

As amostras de água e sedimentos coletadas nos dois rios estudados apresentaram concentrações de sedimentos em suspensão relativamente baixas. As concentrações máxima e mínima medidas no rio Piquiri foram de 27,0 mg/l e 14,5 mg/l, respectivamente (Tabela 5.1). No rio Ivaí, as concentrações medidas variaram entre 8,0 mg/l e 21,0 mg/l (valores indicados nas Tabelas 5.2 e 5.3). Comparando com os dados fornecidos pela Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental – SUDERHSA, medidos na seção Balsa Santa Maria (rio Piquiri), entre agosto/1976 e outubro/2002, e na seção Novo Porto Taquara (rio Ivaí), no período de setembro/1974 a outubro/2002, observa-se que as concentrações de sedimentos medidas no presente estudo apresentam valores relativamente baixos, porém dentro do conjunto de dados históricos, conforme mostrado na Figura 5.22.

FIGURA 5.22 – DADOS HISTÓRICOS DE CONCENTRAÇÕES DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO NOS RIOS PIQUIRI E IVAÍ



Embora o amostrador por bombeamento tenha sido desenvolvido buscando atender os requisitos básicos descritos por YUQIAN [1989] (apresentados no item 3.1), as amostras coletadas pelo sistema de bombeamento apresentaram valores

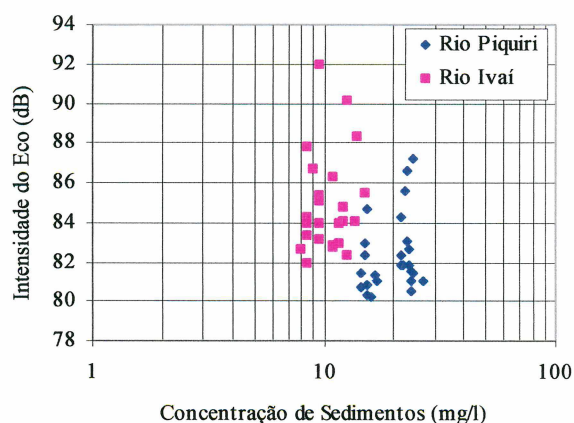
de concentração de sedimentos mais baixos que as amostras coletadas com o amostrador USP-61, considerando as mesmas posições na seção transversal (ver Tabelas 5.2 e 5.3). Por este motivo, no presente estudo, foram consideradas somente as amostras coletadas pelo sistema de bombeamento, visando obter uniformidade no processo de amostragem.

Os sedimentos em suspensão encontrados nos rios estudados apresentaram diâmetros muito pequenos, justificando a uniformidade das distribuições de concentrações de sedimentos em suspensão medidas ao longo das verticais. O diâmetro d_{50} (médio das quatro amostras coletadas) encontrado no rio Piquiri foi igual a 15,6 μm e no rio Ivaí igual a 16,5 μm . Observa-se que, em ambos os casos, esses diâmetros estão abaixo do tamanho recomendado por VAN RIJN [1993] para aplicação da amostragem acústica (diâmetros maiores que 50 μm).

5.7.2 Resultados obtidos pela amostragem acústica

A Figura 5.23 mostra a plotagem das concentrações de sedimentos em suspensão, medidas com amostrador mecânico, contra as intensidades dos ecos registradas simultaneamente pelo ADCP. Fica evidente a existência de dois conjuntos de pontos correspondentes a rios distintos, do mesmo modo que foi constatado por FILIZOLA e GUYOT [1996], no estudo realizado na bacia Amazônica.

FIGURA 5.23 – PLOTAGEM DAS CONCENTRAÇÕES DE SEDIMENTOS CONTRA INTENSIDADES DOS ECOS



Os dados apresentados na Figura 5.23 mostram claramente que a intensidade do eco registrada pelo ADCP não depende somente da concentração de sedimentos em suspensão, mas também de outras propriedades do sedimento como, por exemplo, a distribuição granulométrica das partículas. Portanto, observa-se a necessidade de estabelecer correlações entre intensidade do sinal acústico e concentração de sedimentos em suspensão distintas para rios diferentes.

O método proposto por DEINES [1999] apresentou resultados satisfatórios em ambos os rios estudados, tendo em conta que 86% das concentrações estimadas resultaram dentro do fator 2, considerando o nível de referência a meia profundidade do escoamento (ver Figura 5.13). No entanto, observa-se nos perfis verticais de concentrações de sedimentos em suspensão, apresentados nas Figuras 5.14 e 5.15, que a Equação 3.4 produz resultados muito sensíveis aos incrementos de intensidade do eco ($Ec_i - Ec_r$), ou seja, pequenas variações na intensidade do eco conduzem a variações exageradas na concentração de sedimentos.

O método proposto por DEINES [1999], usando a Equação 3.5 e o coeficiente K_M igual a 0,45, apresentou resultados significativamente melhores, considerando que 96% das concentrações estimadas resultaram dentro do fator 2 (indicado na Figura 5.16). Os perfis de concentração de sedimentos em suspensão resultantes da aplicação da Equação 3.5 no método de DEINES [1999], mostrados nas Figuras 5.17 e 5.18, apresentaram boa concordância com os perfis medidos por amostragem mecânica, revelando que para os casos estudados o coeficiente K_M igual a 0,45 melhora o ajuste da correlação entre intensidade do eco e concentração de sedimentos em suspensão.

Os resultados apresentados na Figura 5.16, correspondentes à aplicação do método de DEINES [1999] usando a Equação 3.5 e o coeficiente K_M igual a 0,45, revelaram que não houve dependência quanto à consideração do nível de referência próximo ao fundo do rio ou a meia profundidade do escoamento, em acordo com o constatado por MAYERLE e POERBANDONO [2002] e LU [2003], para condições com distribuições uniformes de concentrações de sedimentos ao longo da vertical.

A aplicação do método de DEINES [1999] para extrapolação das concentrações de sedimentos ao longo de toda a seção transversal do rio, a partir de

apenas uma concentração de referência, também apresentou bons resultados, tendo em conta que todas as concentrações estimadas resultaram dentro do fator 2, conforme indicado na Figura 5.19. No entanto, deve-se considerar que esses resultados foram obtidos para condições com distribuições de concentrações e distribuições granulométricas dos sedimentos bastante uniformes ao longo de toda seção em ambos os rios estudados. Conforme citado em MAYERLE e POERBANDONO [2001] e em GORDON [1996], nos casos em que a distribuição granulométrica dos sedimentos apresenta grandes variações, pode não ser possível a calibragem satisfatória da correlação entre intensidade do eco e concentração de sedimentos em suspensão.

5.7.3 Comparação com perfis analíticos de concentração de sedimentos em suspensão

No capítulo 2, item 2.4.2, foram apresentadas as formulações propostas por Rouse (1937) e Lane (1941) para o cálculo do perfil analítico de concentrações de sedimentos em suspensão. As duas formulações conduzem a resultados próximos. No presente estudo, optou-se pela Equação 2.19, proposta por Lane (1941), para o cálculo dos perfis de concentração de sedimentos em suspensão.

Os perfis de concentração de sedimentos em suspensão foram calculados para os dados coletados na vertical C (localizada no meio da seção transversal), indicada na Figura 5.9, dos rios Piquiri e Ivaí.

Para o cálculo dos perfis analíticos de concentração de sedimentos são necessários: a velocidade de corte U_* do escoamento, a velocidade de queda ω do sedimento e uma concentração conhecida ao longo do perfil.

a) Velocidade de corte U_*

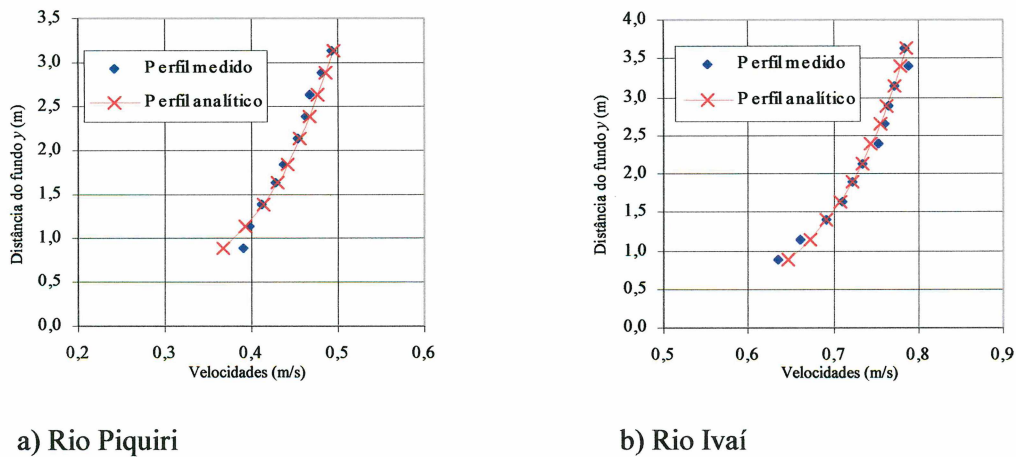
A velocidade de corte U_* foi calculada a partir do perfil vertical de velocidades, medido com o ADCP, considerando a distribuição logarítmica de velocidades, dada pela Equação 2.6.

$$\frac{u}{U_*} = \frac{1}{k} \ln \frac{y}{y'} \quad (2.6)$$

Segundo GRAF [1983], o valor da constante de Von Karmán k tende a diminuir com a concentração de sedimentos em suspensão, conforme indicado na Figura 2.7. No entanto, no presente estudo as concentrações de sedimentos foram relativamente baixas e o valor adotado para a constante k foi igual a 0,4.

Com base na distribuição de velocidades obtida pelo ADCP e pelo uso da Equação 2.6, a velocidade de corte calculada na vertical C para o rio Piquiri foi 0,040 m/s e para o rio Ivaí foi 0,039 m/s. A Figura 5.24 mostra a comparação entre os perfis de velocidades medidos e calculados analiticamente ajustando a distribuição logarítmica de velocidades, considerando os valores das velocidades de corte calculados.

FIGURA 5.24 – PERFIS DE VELOCIDADES MEDIDOS COM ADCP E PERFIS ANALÍTICOS CONSIDERANDO A DISTRIBUIÇÃO LOGARÍTMICA DE VELOCIDADES



Integrando-se a Equação 2.6 ao longo da profundidade do escoamento obtém-se a velocidade média U , que pode ser relacionada com a velocidade u a distância y acima do fundo pela seguinte expressão:

$$\frac{u - U}{U_*} = 5,75 \log \frac{y}{h} + 2,5 \quad (5.1)$$

Aplicando a Equação 5.1 aos valores de u e y dos perfis de velocidades obtidos para os rios estudados, obtém-se a velocidade média no perfil de velocidades igual a 0,42 m/s, no caso do rio Piquiri, e igual a 0,71 m/s para o rio Ivaí. A título de curiosidade a velocidade média na seção transversal, medida com o ADCP, foi igual a 0,46 m/s no rio Piquiri e 0,65 m/s no rio Ivaí.

b) Velocidade de queda do sedimento ω

O diâmetro da partícula considerado no cálculo da velocidade de queda foi o diâmetro d_{50} da amostra coletada a meia profundidade na vertical C. Conforme indicado nas Tabelas 5.4 e 5.5, os diâmetros d_{50} dos sedimentos encontrados nos rios Piquiri e Ivaí foram iguais a 0,0143 mm e 0,0172 mm, respectivamente. Para esses diâmetros é válida a lei de Stokes e a velocidade de queda dos sedimentos ω foi calculada pela Equação 2.1:

$$\omega = \frac{gd^2}{18\nu} \left(\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \right) \quad (2.1)$$

considerando a densidade relativa do sedimento S_s igual a 2,65 e a viscosidade cinemática da água ν igual a 10^{-6} m²/s (para $T = 20^\circ\text{C}$). Os valores resultantes foram 0,000184 m/s e 0,000266 m/s para os sedimentos dos rios Piquiri e Ivaí, respectivamente.

c) Perfis analíticos de concentração de sedimentos em suspensão

Os perfis analíticos de concentração de sedimentos em suspensão foram calculados pela Equação 2.19, proposta por Lane (1941):

$$\frac{C_y}{C_a} = e^{-[\omega(y-a)]/\bar{D}_y} \quad (2.19)$$

na qual, o valor de \bar{D}_y foi calculado pela Equação 2.18:

$$\overline{D}_y = \frac{kU_*h}{6} \quad (2.18)$$

adotando a constante k igual a 0,4.

A concentração de referência C_a foi considerada igual a concentração de sedimentos da amostra coletada a meia profundidade na vertical C.

As Figuras 5.25 e 5.26 mostram a comparação entre os perfis analíticos de concentração de sedimentos em suspensão e os perfis de concentrações de sedimentos obtidos por amostragem mecânica e acústica pelo método de DEINES [1999], na vertical C.

FIGURA 5.25 – COMPARAÇÃO ENTRE PERFIS ANALÍTICOS E PERFIS MEDIDOS DE CONCENTRAÇÃO SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO – RIO PIQUIRI

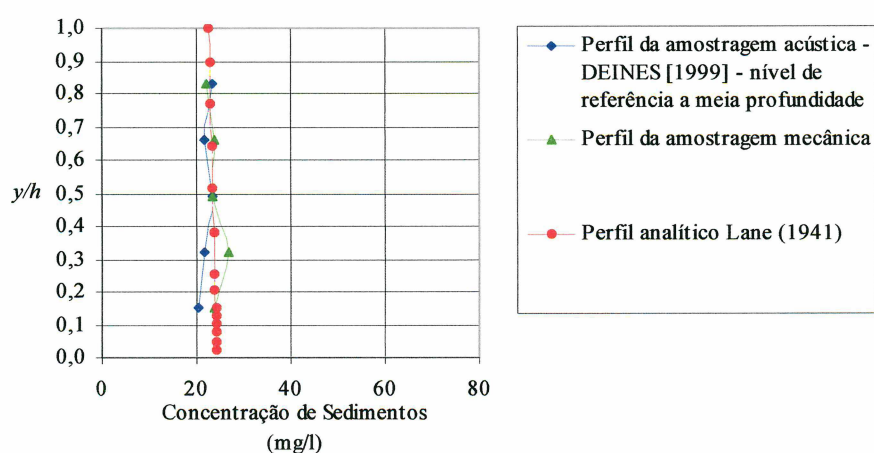
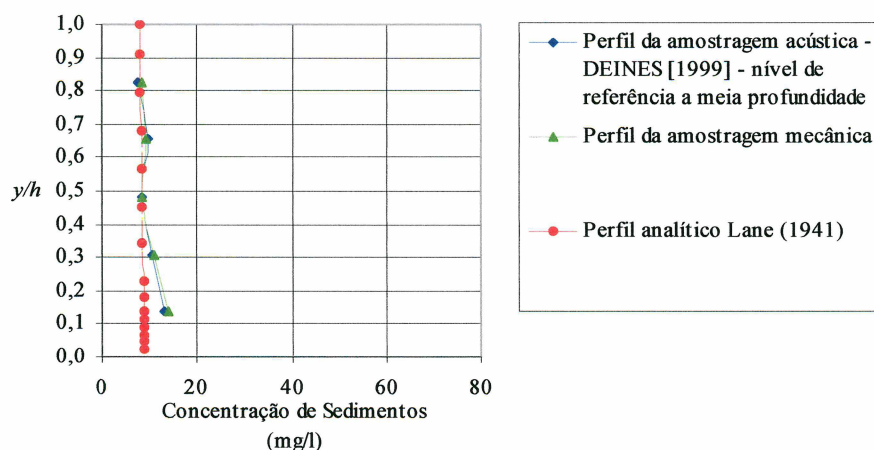


FIGURA 5.26 – COMPARAÇÃO ENTRE PERFIS ANALÍTICOS E PERFIS MEDIDOS DE CONCENTRAÇÃO SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO – RIO IVAÍ



Observa-se nas Figuras 5.25 e 5.26 que, em ambos os rios estudados, os perfis de concentrações de sedimentos em suspensão, obtidos analiticamente, apresentaram boa concordância com os perfis de concentrações medidas por amostragem mecânica e com os perfis de concentrações determinados por amostragem acústica pelo método de DEINES [1999].

5.7.4 Cálculo da descarga de sedimentos por suspensão

A descarga de sedimentos por suspensão por unidade de largura do canal q_{ss} pode ser calculada pela Equação 2.20:

$$q_{ss} = \int_0^h C_y u dy \quad (2.20)$$

considerando o perfil de concentrações de sedimentos em suspensão dado pela Equação 2.19, proposta por Lane (1941), e assumindo a distribuição logarítmica de velocidades obtém-se a seguinte expressão:

$$q_{ss} = C_a e^{\frac{15\alpha a}{U_* h}} U \int_0^h [1 + 2,5\sqrt{g} \frac{n}{h^{1/6}} (\ln \frac{y}{h} + 1)] e^{\frac{-15\omega y}{U_* h}} dy \quad (5.2)$$

na qual, n é o coeficiente de Manning, C_a é a concentração de sedimentos em suspensão determinada a distância a do leito. A expressão 5.2 pode ser resolvida por integração numérica, conduzindo aos seguintes valores de descarga de sedimentos por suspensão por unidade de largura do canal q_{ss} :

- Rio Piquiri:

$$q_{ss} = 1,56 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s.m}$$

- Rio Ivaí:

$$q_{ss} = 9,15 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s.m}$$

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

6.1. Conclusões

O presente estudo foi desenvolvido a partir de dados coletados em rios, em condições naturais de escoamento com transporte de sedimentos. Os dados coletados incluíram amostras de água e sedimentos, coletadas com amostradores mecânicos, e amostras de intensidade de sinais acústicos, registradas com o perfilador acústico ADCP. As intensidades dos sinais acústicos foram plotadas contra as concentrações de sedimentos das respectivas amostras, obtidas com amostrador mecânico, para verificar a viabilidade da correlação. Perfis verticais de intensidade de sinais acústicos foram convertidos em perfis verticais de concentrações de sedimentos, seguindo o método proposto por DEINES [1999], e foram comparados com os perfis de concentrações medidos com amostradores mecânicos, visando avaliar a eficiência da aplicação dos sinais acústicos do ADCP e do método de DEINES [1999] para a determinação da descarga de sedimentos em suspensão. As principais conclusões estão apresentadas na seqüência.

a) Desempenho dos Amostradores Mecânicos

O amostrador mecânico USP-61 mostrou-se inadequado para escoamentos com velocidades inferiores a 0,6 m/s.

Embora o amostrador por bombeamento tenha sido desenvolvido buscando atender os requisitos básicos descritos por YUQIAN [1989] (apresentados no item 3.1), as amostras coletadas por este sistema apresentaram valores de concentração de sedimentos mais baixos que as amostras coletadas com o amostrador USP-61, considerando as mesmas posições na seção transversal (valores indicados nas Tabelas 5.2 e 5.3). No entanto, não há conclusões precisas sobre o porquê deste fato.

b) Dados Coletados em Campo

No presente estudo, desejava-se que os rios escolhidos para amostragem apresentassem perfis de concentração de sedimentos em suspensão não uniformes ao

longo da vertical, que permitiriam uma análise bastante precisa dos resultados obtidos pelo método de conversão proposto por DEINES [1999]. Ao contrário do que se desejava, os rios estudados apresentaram distribuições de concentrações de sedimentos ao longo da vertical bastante uniformes. A validade do processo para escoamentos com distribuição não uniforme das concentrações foi, no entanto, melhor explicada por MAYERLE e POERBANDONO [2002].

As concentrações de sedimentos em suspensão nos rios estudados apresentaram valores relativamente baixos (valores indicados nas Tabelas 5.1 a 5.3). Comparando com os dados, fornecidos pela SUDERHSA, para as mesmas seções estudadas, observa-se que as concentrações de sedimentos medidas no presente estudo estão dentro do conjunto de dados históricos, conforme mostrado na Figura 5.22. Campanhas de coleta de dados em época mais apropriada, com maior concentração de sedimentos, poderão enriquecer as conclusões deste estudo.

A análise das curvas granulométricas apresentadas nas Figuras 5.20 e 5.21 revelou que os sedimentos em suspensão encontrados nos rios estudados apresentam diâmetros reduzidos, justificando a uniformidade das distribuições de concentrações de sedimentos em suspensão medidas ao longo das verticais. A análise teórica (Figuras 5.25 e 5.26) conduz à total segurança desta afirmação.

c) Eficiência da Amostragem Acústica

Embora os sedimentos encontrados nos rios estudados tenham apresentado diâmetros bem abaixo do tamanho recomendado por VAN RIJN [1993] para aplicação da amostragem acústica (diâmetros maiores que 50 μm), os resultados obtidos no presente estudo confirmaram a eficiência deste método de amostragem.

A plotagem das concentrações de sedimentos em suspensão contra as intensidades dos ecos, registradas simultaneamente, mostrada no gráfico da Figura 5.23, revelou a existência de conjuntos de pontos distintos para os rios estudados, indicando que a correlação entre concentração de sedimentos e intensidade do eco deve ser calibrada com dados coletados no local em estudo. Observa-se, na

Figura 5.23, que para sedimentos maiores (do rio Ivaí) as intensidades dos ecos são mais fortes, considerando uma mesma concentração de sedimentos.

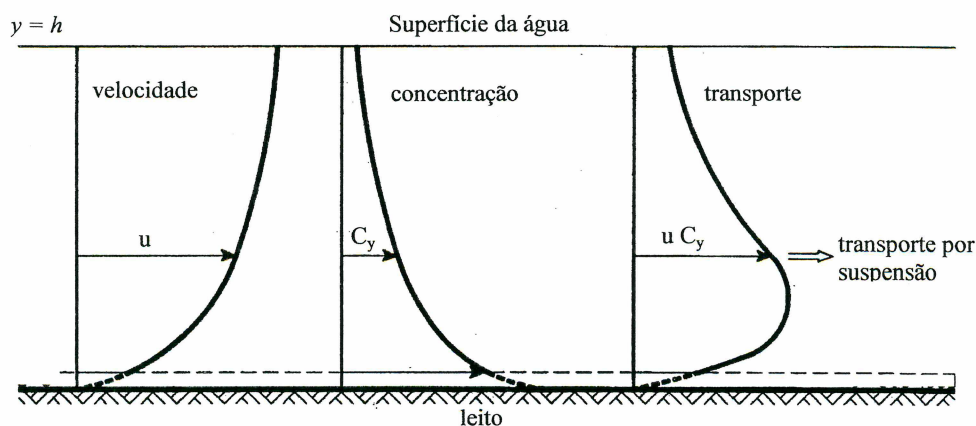
O método proposto por DEINES [1999] apresentou bons resultados em ambos os rios estudados, considerando que 86% das concentrações estimadas resultaram dentro do fator 2. No entanto, a análise dos perfis de concentração apresentados nas Figuras 5.14 e 5.15 mostrou que a Equação 3.4 produz resultados muito sensíveis aos incrementos de intensidade do eco ($Ec_i - Ec_r$), ou seja, pequenas variações na intensidade do eco conduziram à variações um pouco exageradas na estimativa da concentração de sedimentos.

A aplicação do método proposto por DEINES [1999], segundo MAYERLE e POERBANDONO [2002], usando a Equação 3.5 e o coeficiente K_M igual a 0,45, conduziu a resultados significativamente melhores que a aplicação com a Equação 3.4, considerando que 96% das concentrações de sedimentos estimadas resultaram dentro do fator 2. Neste caso, os perfis de concentração de sedimentos em suspensão, mostrados nas Figuras 5.17 e 5.18, apresentaram boa concordância com os perfis medidos por amostragem mecânica, revelando que, para os casos estudados, o coeficiente K_M igual a 0,45 melhorou o ajuste da correlação entre intensidade do eco e concentração de sedimentos em suspensão.

Os resultados obtidos no presente estudo confirmaram que, no caso de distribuições uniformes de concentrações ao longo da vertical, o nível de referência não afeta significativamente a eficiência do método de DEINES [1999]. Para os casos de distribuições de concentrações não uniformes ao longo da vertical, MAYERLE e POERBANDONO [2002] concluíram que o nível de referência considerado a meia profundidade do escoamento produz resultados significativamente melhores que o nível de referência considerado próximo ao leito. Observa-se que este método de conversão ajusta a correlação a partir da concentração de sedimentos medida no nível de referência, portanto, é nessa posição que as estimativas das concentrações tem maior precisão. Na Figura 6.1 verifica-se que, no caso de distribuições não uniformes de concentrações, a parcela de maior importância da carga de sedimentos em suspensão é transportada pelo escoamento entre a meia profundidade e o leito do rio.

Portanto, nesse caso, para que se obtenha resultados mais precisos do transporte de sedimentos é importante que se adote como nível de referência uma posição intermediária com maior transporte de sedimentos.

FIGURA 6.1 — TRANSPORTE DE SEDIMENTOS POR SUSPENSÃO



FONTE: VAN RIJN [1993]

A aplicação do método de DEINES [1999] para estimativas das concentrações de sedimentos em suspensão nas cinco verticais amostradas dos rios estudados, a partir de uma única concentração de referência, apresentou resultados muito satisfatórios, considerando que 100% das concentrações estimadas resultaram dentro do fator 2, conforme indicado na Figura 5.19. Essa constatação é muito importante, pois revela que para os casos estudados as concentrações de sedimentos em suspensão ao longo de toda seção transversal podem ser extrapoladas por uma correlação calibrada por apenas um ponto de concentração medida, tornando prática a aplicação do ADCP para determinação da descarga sólida por suspensão, sem prejudicar a precisão dos resultados.

Os métodos propostos por PATINO e BYRNE [2001] e GARTNER [2002] propõem o ajuste de uma correlação direta, obtida por regressão, entre as concentrações de sedimentos em suspensão e as intensidades dos sinais acústicos. A vantagem desses métodos, em relação ao método proposto por DEINES [1999], encontra-se no fato de que, uma vez ajustada, a correlação deve ser válida para o local

em estudo, sem que seja necessária a calibragem com outros amostradores, em cada medição. No entanto, para a obtenção de uma correlação adequada é necessária uma quantidade expressiva de dados, incluindo valores representativos de toda faixa de variação das concentrações de sedimentos, para o local em questão. Além disso, deve-se verificar a validade da correlação com dados coletados em diversas épocas do ano.

Em ambos os rios estudados, os perfis de concentração de sedimentos em suspensão determinados por amostragem mecânica e amostragem acústica apresentaram boa concordância com os perfis analíticos de concentração de sedimentos, obtidos pela Equação 2.19 proposta por Lane (1941) – ver Figuras 5.25 e 5.26.

Os valores da velocidade de corte verificados nos escoamentos dos rios Piquiri e Ivaí, iguais a 0,040 m/s e 0,039 m/s, respectivamente, levados ao diagrama de Shields, mostrado na Figura 2.2, revelaram que esses escoamentos são capazes de arrastar sedimentos com diâmetros de até 5 mm.

É importante salientar que os resultados apresentados neste estudo foram obtidos para condições com sedimentos muito finos e distribuições de concentrações bastante uniformes ao longo da vertical. Observa-se, também, que a distribuição granulométrica dos sedimentos em suspensão ao longo da seção transversal dos rios estudados apresentou-se bastante uniforme.

6.2. Recomendações

Com base nos resultados obtidos no presente estudo pode-se fazer as seguintes recomendações:

- A utilização de equipamentos ópticos para referência, que uma vez calibrados, permitem a obtenção de grande quantidade de dados com relativa facilidade em relação aos amostradores mecânicos;
- Verificar a eficiência do método proposto por DEINES [1999] aplicado a condições com distribuições não uniformes de concentrações de sedimentos em suspensão ao longo da vertical;

- Realizar estudos com maior quantidade de dados, considerando variações sazonais, que permitam verificar a eficiência dos métodos propostos por PATINO e BYRNE [2001] e GARTNER [2002].

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANNANDALE, G. W. **Reservoir sedimentation**. Amsterdam: Elsevier, 1987. (Developments in Water Science; 29).

DAILY, J. W.; HARLEMAN, D. R. F. **Fluid dynamics**. U.S.A: Addison-Wesley, 1966.

DEINES, K. L. Backscatter estimator using broadband Acoustic Doppler Current Profilers. In: ANDERSON, S. P.; TERRY, E. A.; WHITE, J. A. R.; WILLIAM, A. J. (Ed.). WORKING CONFERENCE ON CURRENT MEASUREMENT, 6, 1999, San Diego. **Proceedings**....San Diego, 1999. p. 249-253.

FILIZOLA, N. P.; GUYOT, J. L. Medição do fluxo de sedimentos com correntômetro por efeito Doppler (ADCP) na Bacia Amazônica. In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE ENGENHARIA DE SEDIMENTOS, 2., 1996, Rio de Janeiro. **Anais**.... Rio de Janeiro: 1996.

GARDE, R. J.; RAJU, K. G. R. **Mechanics of sediment transportation and alluvial stream problems**. 2. ed. India: Wiley Eastern, 1985.

GARTNER, J. W. Estimation of suspended solids concentrations based on Acoustic Backscatter Intensity: theoretical background. In: TURBIDITY AND OTHER SEDIMENT SURROGATES WORKSHOP, 2002, Reno, USA. **Proceedings**.... Reno: 2002.

GORDON, R. L. **Acoustic Doppler Current Profiler: Principles of operation, a practical primer**. 2nd edition for broadband ADCPs. RD Instruments, San Diego, USA, 1996.

GRAF, W. H. The hydraulics of reservoir sedimentation. **International Water Power & Dam Construction**, Dartford, U. K., v. 35, n. 4, p. 45-52, 1983.

LU, Q. **Evaluation of empirical approaches for converting acoustic backscatter to suspended sediment concentration**. Alemanha. 2003. 55 p. Dissertação (Mestrado) – Coastal Geosciences and Engineering, University of Kiel.

MAYERLE, R.; POERBANDONO, W. C. **An appraisal of the measuring instruments for suspended sediment concentration**. Report, 12. Coastal Engineering Laboratory, Institute of Geosciences, Cristian Albrechts University. Kiel, Germany, 2001.

MAYERLE, R.; POERBANDONO, W. C. **Effectiveness of acoustical backscatter profiler in the estimation of suspended sediment concentration**. Report, 16. Coastal Engineering Laboratory, Institute of Geosciences, Cristian Albrechts University. Kiel, Germany, 2002.

MORRIS, G. L.; FAN, J. **Reservoir sedimentation handbook: design and management of dams, reservoirs, and watersheds for sustainable use**. New York: McGraw-Hill, 1997.

PATINO, E.; BYRNE, M. J. **Use of acoustic instruments for estimating total suspended solids concentrations in streams – the South Florida experience**. U.S. Geological Survey, Fort Myers, Florida. Disponível em: <<http://water.usgs.gov/osw/techniques/TSS/listofabstracts.htm>>. Acesso em: 10 jun 2003.

RD INSTRUMENTS. **Corporate overview**. Disponível em: <<http://www.rdinstruments.com/overview.html>>. Acesso em: 15 mai 2003.

RD INSTRUMENTS. **WinRiver - User's Guide**. Disponível em: <<http://www.rdinstruments.com/overview.html>>. Acesso em: 15 mai 2003.

SANTOS, I; FILL, H. D.; SUGAI, M. R.; BUBA, H.; KISHI, R. T.; MARONE, E.; LAUTERT, L. F. **Hidrometria aplicada**. Curitiba: CEHPAR, 2001.

SONTEK, INC. ADP versatility in San Felipe, México Deployment. Disponível em: <<http://www.sontek.com/apps/profiler/adp-sf/adp-sf.htm>> Acesso em: 01 out 2002.

VANONI, V. A. (Ed.). **Sedimentation engineering**. New York: ASCE, 1975.

VAN RIJN, L. C. **Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas**. Amsterdam: Aqua Publications, 1993.

VAN RIJN, L. C. Sediment transport, Part II: Suspended Load Transport. **Journal of Hydraulic Engineering**, ASCE, New York, v. 110, n. 11, p. 1613-1641, 1984.

YUQIAN, L. **Manual on operational methods for the measurement of sediment transport**. Suíça: World Meteorological Organization, 1989. Operational Hidrology Report, 29, 1989. p. 23-24.

ANEXO

- Quadro I – Perfis de velocidades do escoamento medidos no rio Piquiri
- Figura 01 – Gráficos dos perfis de velocidades do escoamento medidos no rio Piquiri
- Quadro II – Perfis de velocidades do escoamento medidos no rio Ivaí
- Figura 02 – Gráficos dos perfis de velocidades do escoamento medidos no rio Ivaí

QUADRO I
PERFIS DE VELOCIDADES DO ESCOAMENTO MEDIDOS NA SEÇÃO BALSA SANTA MARIA NO RIO PIQUIRI

Profundidade <i>h</i> (m)	Vertical A		Vertical B		Vertical C		Vertical D		Vertical E	
	Distância do Fundo <i>y</i> (m)	Velocidade (m/s)	Distância do Fundo <i>y</i> (m)	Velocidade (m/s)	Distância do Fundo <i>y</i> (m)	Velocidade (m/s)	Distância do Fundo <i>y</i> (m)	Velocidade (m/s)	Distância do Fundo <i>y</i> (m)	Velocidade (m/s)
0,76	1,44	0,538	2,440	0,450	3,140	0,493	4,340	0,566	2,940	0,611
1,01	1,19	0,530	2,190	0,440	2,890	0,481	4,090	0,564	2,690	0,583
1,26	0,94	0,510	1,940	0,433	2,640	0,466	3,840	0,558	2,440	0,566
1,51	0,69	0,477	1,690	0,422	2,390	0,462	3,590	0,547	2,190	0,543
1,76	0,44	0,449	1,440	0,407	2,140	0,453	3,340	0,529	1,940	0,507
2,01			1,190	0,405	1,890	0,436	3,090	0,515	1,690	0,486
2,26			0,940	0,397	1,640	0,428	2,840	0,508	1,440	0,469
2,51			0,690	0,390	1,390	0,411	2,590	0,504	1,190	0,442
2,76					1,140	0,399	2,340	0,474	0,940	0,432
3,01					0,890	0,390	2,090	0,471	0,690	0,407
3,26					0,640	0,372	1,840	0,464	0,440	0,384
3,51					0,390	0,354	1,590	0,449		
3,76							1,340	0,425		
4,01							1,090	0,419		
4,26							0,840	0,406		

Nota:

- Os perfis de velocidades indicados nos quadro acima foram medidos com o ADCP;
- Os gráficos dos perfis de velocidades indicados no quadro acima estão apresentados na Figura 01 deste anexo.

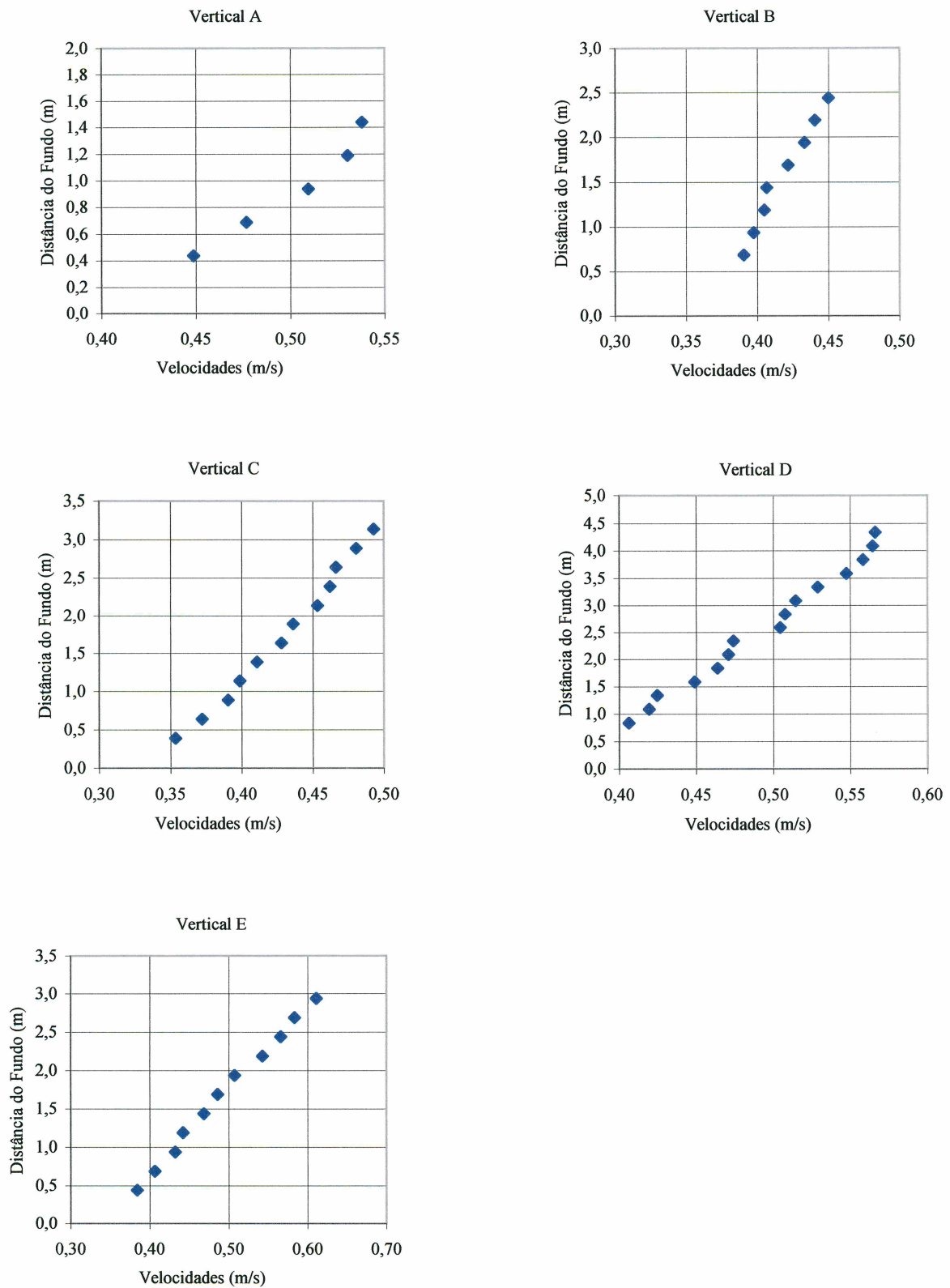


FIGURA 01 - PERFIS DE VELOCIDADES DO ESCOAMENTO MEDIDOS NA SEÇÃO BALSA SANTA MARIA NO RIO PIQUIRI

QUADRO II
PERFIS DE VELOCIDADES DO ESCOAMENTO MEDIDOS NA SEÇÃO NOVO PORTO TAQUARA NO RIO IVAÍ

Profundidade <i>h</i> (m)	Vertical A		Vertical B		Vertical C		Vertical D		Vertical E	
	Distância do Fundo <i>y</i> (m)	Velocidade (m/s)	Distância do Fundo <i>y</i> (m)	Velocidade (m/s)	Distância do Fundo <i>y</i> (m)	Velocidade (m/s)	Distância do Fundo <i>y</i> (m)	Velocidade (m/s)	Distância do Fundo <i>y</i> (m)	Velocidade (m/s)
0,76	3,04	0,747	3,740	0,758	3,640	0,785	3,740	0,839	4,040	0,814
1,01	2,79	0,746	3,490	0,761	3,390	0,789	3,490	0,831	3,790	0,810
1,26	2,54	0,738	3,240	0,742	3,140	0,772	3,240	0,826	3,540	0,803
1,51	2,29	0,725	2,990	0,747	2,890	0,765	2,990	0,822	3,290	0,791
1,76	2,04	0,711	2,740	0,734	2,640	0,760	2,740	0,811	3,040	0,779
2,01	1,79	0,701	2,490	0,723	2,390	0,754	2,490	0,800	2,790	0,773
2,26	1,54	0,691	2,240	0,711	2,140	0,734	2,240	0,778	2,540	0,764
2,51	1,29	0,675	1,990	0,698	1,890	0,722	1,990	0,782	2,290	0,752
2,76	1,04	0,657	1,740	0,689	1,640	0,710	1,740	0,764	2,040	0,749
3,01	0,79	0,631	1,490	0,667	1,390	0,692	1,490	0,740	1,790	0,730
3,26	0,54	0,583	1,240	0,648	1,140	0,660	1,240	0,735	1,540	0,714
3,51			0,990	0,618	0,890	0,635	0,990	0,722	1,290	0,700
3,76			0,740	0,585	0,640	0,601	0,740	0,696	1,040	0,681
4,01			0,490	0,552	0,390	0,558			0,790	0,652
4,26									0,540	0,627

Nota:

- Os perfis de velocidades indicados nos quadro acima foram medidos com o ADCP;
- Os gráficos dos perfis de velocidades indicados no quadro acima estão apresentados na Figura 02 deste anexo.

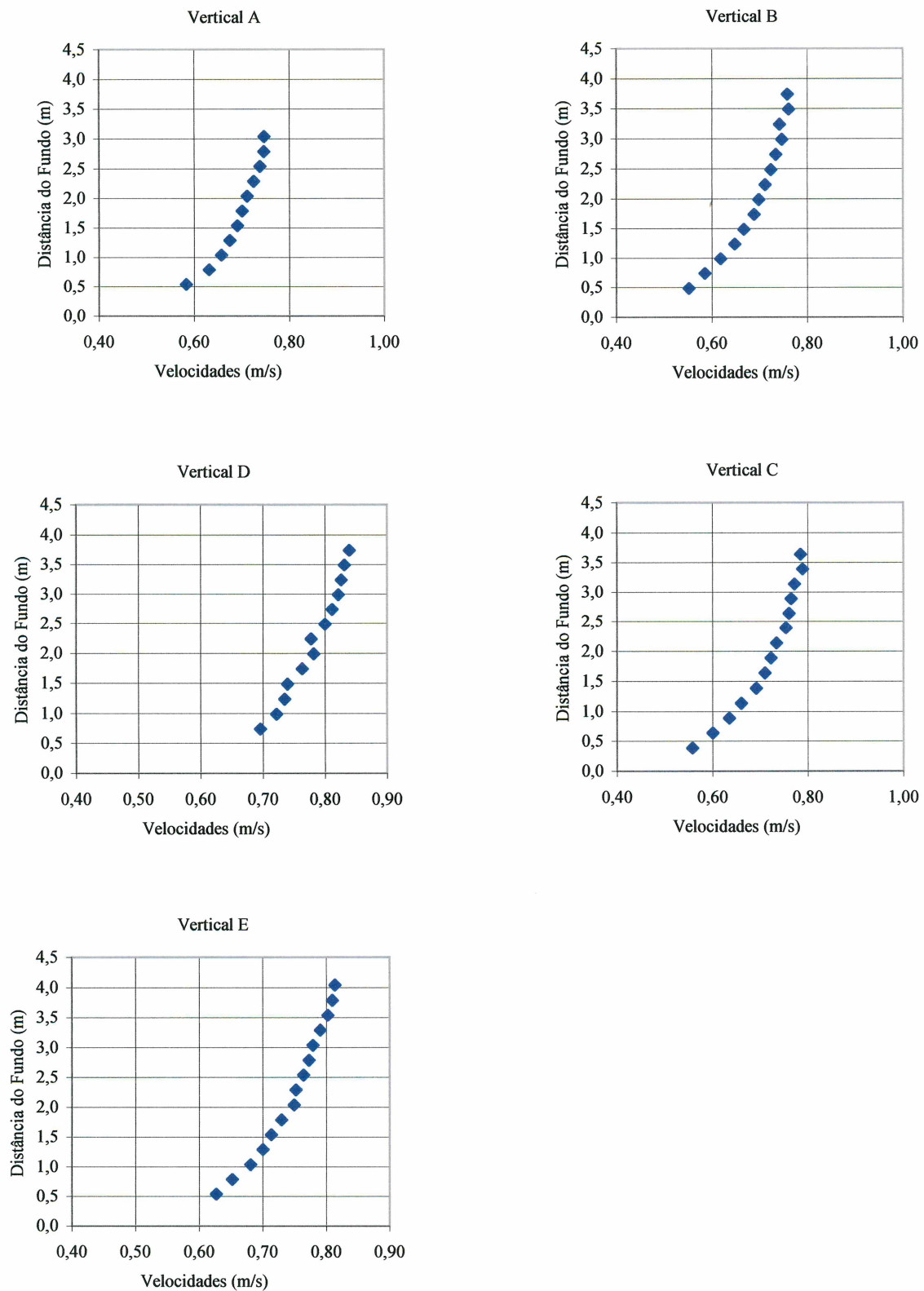


FIGURA 02 - PERFIS DE VELOCIDADES DO ESCOAMENTO MEDIDOS NA SEÇÃO NOVO PORTO TAQUARA NO RIO IVAÍ