



MAASA

Mestrado em Meio Ambiente, Águas e Saneamento

UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA

ESCOLA POLITECNICA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AMBIENTAL



**EFEITO DO FUNDO MÓVEL EM MEDIÇÕES
ACÚSTICAS DE VAZÃO NO TRECHO SUB MÉDIO DO
RIO SÃO FRANCISCO**

Miguel Anderson dos Santos Cidreira

ORIENTADORA: PROF. DRA. ANDREA SOUSA FONTES

CO-ORIENTADOR: PROF. DR. FERNANDO GENZ (RAJENDRA)

Salvador

2014



MAASA

Mestrado em Meio Ambiente, Águas e Saneamento

UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA

ESCOLA POLITECNICA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AMBIENTAL



MIGUEL ANDERSON DOS SANTOS CIDREIRA

**EFEITO DO FUNDO MÓVEL EM MEDIÇÕES
ACÚSTICAS DE VAZÃO NO TRECHO SUB MÉDIO DO
RIO SÃO FRANCISCO**

Dissertação apresentada a Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Meio Ambiente, Águas e Saneamento.

ORIENTADORA: PROF. DRA. ANDREA SOUSA FONTES

CO-ORIENTADOR: PROF. FERNANDO GENZ

Salvador
2014

C139 Cidreira, Miguel Anderson dos Santos

Efeito do Fundo Móvel em medições acústicas de vazão no trecho Sub Médio do rio São Francisco. / Miguel Anderson dos Santos Cidreira. – Salvador, 2014.

126 f. : il. color.

Orientador: Profa. Doutora Andrea Sousa Fontes

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal da Bahia. Escola Politécnica, 2014.

1. Hidrometria Aplicada . 2. Medições Acústicas. 3. Efeito de Fundo Móvel. I. Fontes, Andrea Sousa. II. Universidade Federal da Bahia. III. Título.

CDD.: 629.8

MAASA

Mestrado em Meio Ambiente, Águas e Saneamento



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
ESCOLA POLITECNICA



Miguel Anderson dos Santos Cidreira

Análise do efeito móvel em medições acústicas de vazão no trecho sub médio do rio São Francisco

Banca Examinadora:

Prof. Dra. Andrea Sousa Fontes _____
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia

Prof. Dr. Fernando Genz _____
Universidade Federal da Bahia

Prof. Dr. Lafayette Dantas da Luz _____
Universidade Federal da Bahia

Prof. Dr. Guilherme Camargo Lessa _____
Universidade Federal da Bahia

Salvador, 15 de abril de 2014

AUTORIZAÇÃO

Autorizo a reprodução e/ou divulgação total ou parcial da presente obra, por qualquer meio convencional ou eletrônico, desde que citada a fonte.

Nome do Autor: Miguel Anderson dos Santos Cidreira

Assinatura do autor: Miguel Anderson S. Cidreira

Instituição: Universidade Federal da Bahia

Local: Salvador, BA

Endereço: Rua Aristides Novis, 02 - 4º andar, Federação - Salvador-BA

CEP. 40210-630

E-mail: miguel.cidreira@cprm.gov.br

*“Uma caneta é o bastante para matar milhões,
uma só Lei, uma mudança, mata gerações.
Mas uma caneta é o bastante para escrever canções,
uma só letra, uma mudança em tantos corações.”*

(Projota – Mixtape Muita Luz, 2013).

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, que permite que tudo aconteça em nossas vidas.

Aos meus pais, Carlos Miguel e Florisbela. Exemplos de luta e dedicação. Espero um dia poder representar para minhas filhas um pouquinho do que eles são para mim.

A minha esposa Alessandra e filhas Samara e Marina. Todo meu amor e carinho são de vocês.

Aos meus irmãos, em especial Tatiana, pioneira da família, exemplo de caráter e de profissional de Engenharia.

A Professora Dra. Yvonilde Medeiros, que me deu oportunidade de ingressar na área de Recursos Hídricos, com a monitoria de Hidrologia nos cursos de Engenharia Civil e Engenharia Sanitária e Ambiental da UFBA de 2004 até 2006. Pela Especialização em Gerenciamento de Recursos Hídricos, e pelo ingresso no MEAU, mestrado que não consegui concluir, mas me deu experiência e, juntamente com o tempo de trabalho no GRH/UFBA, permitiu o desenvolvimento da minha carreira profissional. Professora, eu sou muito grato à senhora.

A minha Orientadora Professora Dra. Andrea Sousa Fontes. Seu esforço, compromisso e dedicação foram fundamentais para a conclusão desta pesquisa.

Ao Co-Orientador Professor Dr. Fernando Genz (Rajendra), sempre apresentando sugestões e questionamentos interessantes e de grande valor para o desenvolvimento da pesquisa.

Ao Professor Dr. Lafayette Dantas da Luz, que acompanhou os trabalhos desde a etapa de Defesa do Projeto de Dissertação.

A todos os professores do MAASA, em especial à turma de professores dos componentes curriculares ENGH73 - Metodologia da Pesquisa e Métodos Qualitativos e ENGH74 - Seminários, que ajudaram no amadurecimento das ideias que compõem esta pesquisa.

A todos os colegas do MAASA, turma 2012.1, companheiros de estudo e de luta.

A CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. SUREG-SA – Superintendência Regional de Salvador. Pelo apoio e liberação dos dias de trabalho em prol do desenvolvimento do mestrado. Em especial ao Gerente de Hidrologia e Gestão Territorial, Gustavo Carneiro Silva e ao Supervisor de Hidrologia Soriano Cardoso dos Santos.

A ANA – Agência Nacional de Águas, entidade que custeia a operação da Rede Básica de Monitoramento Hidrometeorológico. Âmbito onde foram executadas as atividades de campo desta pesquisa.

A todos os colegas da GEHITE – Gerência de Hidrologia e Gestão Territorial da CPRM/Salvador.

Aos companheiros de trabalho:

Técnico em Geociências Ademi dos Santos, que atuou em todas as campanhas de medição de vazão e coleta de sedimentos, obrigado por todo o apoio, pelos dias de campo iniciados às 4 horas da manhã, sem hora para terminar e especialmente pela perícia na pilotagem do barco, nas medições de vazão com ADP M9, fazendo as travessias em linha reta nas estações do rio São Francisco.

Pesquisadores em Geociências Osvalcélvio Furtunato e Gastão Guimarães Neto, Técnicos em Geociências João Manoel Campos e José Adaltro Miranda, obrigado pelo apoio ao longo dos dois anos da pesquisa.

Auxiliares de Campo Elândio Noronha, Neemilson Silas e Jucimar Costa. Obrigado por todo esforço empregado nas campanhas de medição de vazão.

RESUMO

Dissertação de Mestrado

MAASA – Mestrado em Meio Ambiente, Águas e Saneamento

Escola Politécnica – Universidade Federal da Bahia

EFEITO DO FUNDO MÓVEL EM MEDIÇÕES ACÚSTICAS DE VAZÃO NO TRECHO SUB MÉDIO DO RIO SÃO FRANCISCO

AUTOR: MIGUEL ANDERSON DOS SANTOS CIDREIRA

ORIENTADOR: DRA. ANDREA SOUSA FONTES

A crescente demanda por água, juntamente com o comprometimento da qualidade e sua distribuição irregular no tempo e espaço, tem contribuído para o agravamento de conflitos entre os diferentes usuários. Desta forma, o monitoramento hidrológico, com a determinação da capacidade hídrica das diferentes regiões do país é de fundamental importância para a Gestão dos Recursos Hídricos e solução dos conflitos. A vazão de um rio, obtida pelos métodos convencionais, com molinetes podem ser bastante demoradas e necessitar de um grande esforço físico das equipes de campo. Neste cenário os ADCPs (Medidores Acústicos de Corrente por Efeito Doppler), vêm ganhando espaço e se tornando cada vez mais comuns nas atividades de Hidrometria, por serem mais rápidos e fáceis de operar. Porém as medições acústicas podem estar submetidas a uma série de erros, dentre os quais se destaca o Efeito do Fundo Móvel. Diante deste contexto, este estudo teve por objetivo avaliar as condições de escoamento que proporcionam a ocorrência do Efeito de Fundo Móvel em Medições de Descarga Líquida realizadas com ADCP's, nos períodos de seca e cheia na bacia do rio São Francisco. Foram realizadas três campanhas de medição de vazão, com equipamentos convencionais e acústicos, bem como realizada a coleta de sedimento de fundo nas seções de medição. Os dados coletados foram analisados permitindo verificar a ocorrência do Efeito de Fundo Móvel, afetando os resultados das medições de vazão obtidas com o método acústico em até 14% para menos, no período de cheia da bacia.

Palavras-chave: Hidrometria Aplicada, Medições Acústicas, Efeito de Fundo Móvel.

ABSTRACT

Master Course Dissertation

MAASA – Master Course in Environment, Water and Sanitation

Polytechnic School – Federal University of Bahia

EFFECT OF BED LOAD TRANSPORT IN FLOW'S ACOUSTIC MEASUREMENT IN THE SÃO FRANCISCO RIVER

AUTHOR: MIGUEL ANDERSON DOS SANTOS CIDREIRA

ADVISOR: DRA. ANDREA SOUSA FONTES

The increased demand for water, compromised quality and their irregular distribution in time and space, favor the occurrence of conflicts between different water users. Hydrological monitoring allows to know the hydraulic capacity of the different regions of the country being an important tool for the Management of Water Resources and resolution of conflicts. The river discharge obtained by conventional methods, with mechanical speedometers can be long and require a great physical effort of field teams. The ADCPs (Acoustic Doppler Current Profilers) have been gaining ground and becoming more common in the Hydrometrics activities, because they are quick and easy to operate. Despite the ease, the acoustic measurements may be submitted different types of errors. One of the most common errors in measurements with ADCP is the Effect of Bed Load Transport. The objective of the study was to evaluate the flow conditions that provide the occurrence of Effect of Bed Load Transport on flow measurements performed with ADCP, in periods of drought and flood in the São Francisco River basin. Three measuring campaigns were performed during the study. Conventional equipment were used (mechanical speedometers) and acoustic (ADCP). Also the bottom sediment collection at metering sections was performed. The collected data were analyzed allowing you to check the occurrence of Effect of Bed Load Transport, affecting the results of flow measurements obtained with the acoustic method in up to 14% less, in the flood period of the basin.

Palavras-chave: Hydrometric, Acoustic Measurements, Effect of bed Load Transport.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Importância Ambiental do Regime Hidrológico.....	24
Figura 2 – Transporte de Sedimentos: Movimentos de Arraste e Saltos.....	26
Figura 3 – Diferentes tipos de Molinetes.....	32
Figura 4 – Representação gráfica do processo de medição de vazão pelo Método Convencional.....	32
Figura 5 – Medição convencional – (a) Travessia a vau e (b) Travessia com Embarcação..	34
Figura 6 – Modelos de ADCPs – Fabricante RDI.....	35
Figura 7 – Modelos de ADPs – Fabricante Sontek.....	35
Figura 8 – Medição de Vazão em Canal artificial com ADP M9 Sontek.....	36
Figura 9 – Efeito Doppler: Princípio Físico.....	37
Figura 10 – Bacia Hidrográfica do rio São Francisco – Localização Geográfica.....	44
Figura 11 – Hidrograma – Estações Bom Jesus da Lapa e Morpará.....	46
Figura 12 – Área de Estudo – Mapa de Localização - Estações Fluviométricas.....	48
Figura 13 – Visão Barco Ancorado.....	54
Figura 14 – Visão na Estação Total.....	54
Figura 15 – Montagem suporte ADP M9.....	54
Figura 16 – Utilização ADP M9.....	54
Figura 17 – Medição de Vazão – Instalação da Base RTK.....	55
Figura 18 – Fluviograma Médio Mensal – Rio São Francisco.....	66
Figura 19 – Fluviograma Médio Mensal – Rio Grande.....	67
Figura 20 – Fluviograma Médio Mensal – Rio Preto.....	67
Figura 21 – Curvas Granulométricas Médias – Estação Bom Jesus da Lapa.....	70
Figura 22 – Curvas Granulométricas Médias – Estação Gameleira.....	71
Figura 23 – Curvas Granulométricas Médias – Estação Morpará.....	71
Figura 24 – Curvas Granulométricas Médias – Estação Boqueirão.....	72
Figura 25 – Medição de Vazão ADP M9 – Estação Ibotirama, 3ª Campanha.....	77

Figura 26 – Curvas Granulométricas Campanhas de Campo – Estação B.J. da Lapa.....	86
Figura 27 – Curvas Granulométricas Campanhas de Campo – Estação Gameleira	86
Figura 28 – Curvas Granulométricas Campanhas de Campo – Estação Morpará	87
Figura 29 – Curvas Granulométricas Campanhas de Campo – Estação Boqueirão	88
Figura 30 – Perfilagem Barco Ancorado – Estação F. P. Limpo – rio Preto – 3ª Campanha de medição de vazão – 3ª Vertical de amostragem de velocidade do fundo.....	96
Figura 31 – Perfilagem Barco Ancorado – Estação Gameleira – rio São Francisco – 1ª Campanha de medição de vazão – 3ª Vertical de amostragem de velocidade do fundo.....	97
Figura 32 – Loop Teste – Estação Boqueirão – rio Grande – 3ª Campanha	101
Figura 33 – Loop Teste – Estação Gameleira – 3ª Campanha	102
Figura 34 – Diferença (Molinete x ADP BT) x Velocidade Média da Água	108
Figura 35 – Diferença entre as vazões (Molinete x ADP BT) x $V_{80\%}$	109
Figura 36 – Diferença (Molinete x ADP BT) x Vazão – Estações do rio São Francisco.....	112
Figura 37 – Diferença (Molinete x ADP BT) x U_{Cr}	113
Figura 38 – Diferença (Molinete x ADP BT) x VFM	114
Figura 39 – Velocidade de Fundo Móvel x Diâmetro característico - D_{50}	115
Figura 40 – Velocidade de Fundo Móvel x Diâmetro característico - D_{90}	116
Figura 41 – Velocidade de Fundo Móvel x Descarga Sólida de Fundo - Q_{SF}	117

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Estações Fluviométricas	47
Tabela 2 – Medições de vazão – Período de realização das campanhas	52
Tabela 3 – Seções de Medição – Características médias do escoamento.....	68
Tabela 4 – Curvas Granulométricas Médias das estações para o período de seca e de cheia da bacia – Frações de Peneiramento. Fonte: Série Histórica HIDROWEB / ANA	69
Tabela 5 – Curvas Granulométricas Médias das estações para o período de seca e de cheia da bacia – Tipo de Sedimento. Fonte: Série Histórica HIDROWEB / ANA	70
Tabela 6 – Velocidade Crítica Média	73
Tabela 7 – Medições de Vazão – Estações do rio São Francisco.....	74
Tabela 8 – Medições de Vazão – Estações do rio Grande e Preto	75
Tabela 9 – Diferenças Relativas entre as variáveis de escoamento (A, L, P, V). Comparação entre os métodos de medição (ADP GPS x ADP BT)	77
Tabela 10 – Diferenças Relativas entre os valores de vazão obtidos pelo método convencional (Molinete) e acústico (ADP-GPS) e (ADP-BT).....	79
Tabela 11 – Teste Estatístico de Igualdade – Medições de Vazão	82
Tabela 12 – Curvas Granulométricas Campanhas de Medição – Frações de Peneiramento e Diâmetros Característicos.....	84
Tabela 13 – Curvas Granulométricas Campanhas de Medição – Tipo de Sedimento	85
Tabela 14 – Curvas Granulométricas por Vertical – Frações de Peneiramento	89
Tabela 15 – Curvas Granulométricas por Vertical – Tipo de Sedimento	90
Tabela 16 – Velocidades Críticas – Campanhas de Medição	92
Tabela 17 – Velocidade da água junto ao leito do rio.....	92
Tabela 18 – Relação $V_{\text{água}} / U_{\text{Cr}}$	94
Tabela 19 – Descarga Sólida de Fundo.....	95
Tabela 20 – Correção do EFM – Perfilagem com Barco Ancorado para determinação da Velocidade de Fundo Móvel.....	98
Tabela 21 – Medições (ADP BT) – LOOP Teste	102
Tabela 22 – Medições ADP BT – Correção do EFM	103
Tabela 23 – Medições ADP BT – Diferenças Relativas Molinete x Correção EFM.....	104

Tabela 24 – Teste Estatístico de Igualdade – Medições de Vazão (ADP BT) Corrigidas ... 107

Tabela 25 – Valores Mínimos dos Parâmetros de Escoamento para ocorrência do EFM no rio São Francisco..... 117

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Condição Crítica para início do Transporte de Sedimentos de Fundo	26
Equação 2 – Tensão Crítica da Água	27
Equação 3 – Velocidade Crítica de Atrito ($d \leq 0,50\text{mm}$)	28
Equação 4 – Velocidade Crítica de Atrito ($d \geq 0,5\text{mm}$)	28
Equação 5 – Equação da Continuidade	31
Equação 6 – Estatística t do teste de Student	57
Equação 7 – Concentração Total do Material de Leito no Escoamento	59
Equação 8 – Velocidade de Queda da Partícula de Sedimento em Suspensão ($D_i > 0,1\text{mm}$)	60
Equação 9 – Velocidade de Queda da Partícula de Sedimento em Suspensão ($D_i < 0,1\text{mm}$)	60
Equação 10 – Velocidade de Cisalhamento relativa aos grãos	60
Equação 11 – Gradiente de Energia - S (m/m)	61
Equação 12 – Descarga Sólida de Fundo - QSF (t/dia)	61
Equação 13 – Velocidade do Fundo Móvel	62
Equação 14 – Vazão Corrigida – Método SS	62
Equação 15 – Vazão Corrigida – Método SSM	63
Equação 16 – Vazão Corrigida – LOOP	64

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	7
RESUMO	9
ABSTRACT	10
LISTA DE FIGURAS	11
LISTA DE TABELAS	13
LISTA DE EQUAÇÕES	15
1 INTRODUÇÃO	18
2 OBJETIVOS	22
2.1 Objetivo geral	22
2.2 Objetivos específicos	22
3 Referencial Teórico	23
3.1 Dinâmica Fluvial	23
3.2 Medição de Descarga Líquida	30
3.2.1 <i>Método Convencional (Molinete Hidrométrico)</i>	31
3.2.2 <i>Método Acústico (ADCP ou ADP)</i>	35
3.3 Efeito do Fundo Móvel em Medições Acústicas	40
3.3.1 <i>Detecção e Correção do EFM</i>	42
4 ÁREA DE ESTUDO	44
4.1 Caracterização da Bacia do Rio São Francisco	44
4.2 Caracterização da região do Médio São Francisco	45
4.3 Estações Fluviométricas	47
5 METODOLOGIA	49
5.1 Caracterização da Dinâmica Fluvial da área de estudo	49
5.1.1 <i>Sazonalidade (Período de Seca e Cheia)</i>	49
5.1.2 <i>Condições médias do escoamento (Seca e Cheia da Bacia)</i>	50
5.1.3 <i>Caracterização Granulométrica Média</i>	50
5.1.4 <i>Velocidade Crítica Média</i>	51

5.2	Verificação do Efeito de Fundo Móvel.....	51
5.2.1	<i>Campanhas de Medição de Vazão.....</i>	51
5.2.2	<i>Comparação dos Métodos de Medição de Vazão</i>	55
5.2.3	<i>Caracterização Granulométrica – Campanhas de Medição</i>	58
5.2.4	<i>Velocidade Crítica.....</i>	59
5.2.5	<i>Descarga de fundo</i>	59
5.3	Correção do Efeito de Fundo Móvel.....	61
5.3.1	<i>Método da Subseção - SS.....</i>	61
5.3.2	<i>Método da Sub - Seção Média - SSM</i>	63
5.3.3	<i>Método de Seção por Seção - SPS.....</i>	63
5.3.4	<i>Método do Loop.....</i>	64
5.3.5	<i>Teste Estatístico de Igualdade – Vazões ADP BT Corrigidas</i>	64
5.4	Condições de escoamento favoráveis à ocorrência de EFM	65
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	66
6.1	Caracterização da Dinâmica Fluvial da área de estudo	66
6.1.1	<i>Sazonalidade (Período de Seca e Cheia).....</i>	66
6.1.2	<i>Parâmetros médios do escoamento (Seca e Cheia da Bacia)</i>	68
6.1.3	<i>Caracterização Granulométrica Média</i>	69
6.1.4	<i>Velocidade Crítica Média.....</i>	72
6.2	Análise da ocorrência do Efeito de Fundo Móvel.....	74
6.2.1	<i>Campanhas de Medição de Vazão.....</i>	74
6.2.2	<i>Comparação Métodos de Medição de Vazão.....</i>	76
6.2.3	<i>Caracterização Granulométrica</i>	84
6.2.4	<i>Velocidade Crítica.....</i>	92
6.2.5	<i>Descarga de Fundo</i>	95
6.3	Correção do Efeito de Fundo Móvel.....	96
6.3.1	<i>Aplicação das Técnicas de Correção do EFM.....</i>	96
6.3.2	<i>Teste Estatístico de Igualdade – Vazões ADP BT Corrigidas</i>	107
6.4	Condições de escoamento favoráveis à ocorrência de EFM	108
6.4.1	<i>Velocidade da Água.....</i>	108
6.4.2	<i>Vazão</i>	110
6.4.3	<i>Velocidade Crítica e Velocidade do Fundo Móvel</i>	112
6.4.4	<i>Diâmetros Característicos D_{50} e D_{90}.....</i>	115
6.4.5	<i>Descarga Sólida de Fundo</i>	116
7	CONCLUSÃO	118
	REFERÊNCIAS.....	123

1 INTRODUÇÃO

O grande crescimento populacional verificado nos últimos anos, bem como a expansão econômica e tecnológica decorrentes deste crescimento, acarretou num grande aumento da demanda por água. Este recurso natural é de extrema importância, sendo fundamental aos ciclos de vida no planeta e com relevância econômica, por se tratar de matéria-prima de diversas atividades humanas.

Esse aumento de demanda por água é consequência tanto da ampliação da diversidade de seus usos, bem como, do aumento do volume de água requerido para atendimento de cada um destes usos, ou seja, a cada dia se utiliza a água num número maior de processos ou atividades e numa quantidade (volume) que também vem crescendo ao longo dos anos.

Somado ao aumento das demandas, outro problema grave é a deterioração da qualidade da água, decorrente da poluição fruto da intensificação de atividades humanas e do crescimento populacional. De acordo com a CETESB (2002) boa parte da água doce disponível no planeta encontra-se em algum estágio de contaminação.

Como consequência desse contexto de: (i) aumento das demandas e de (ii) comprometimento da qualidade da água disponível; começou a se estabelecer conflitos, cada vez mais intensos, entre os diferentes usuários da água.

Tendo em vista essa realidade, cresce o interesse pelo uso adequado da água e, conseqüentemente, ampliam-se os estudos relacionados à Gestão dos Recursos Hídricos e a necessidade de regular o uso deste recurso.

No Brasil, a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) foi instituída pela Lei n.º 9433/97, que trata a bacia hidrográfica como unidade territorial básica para o gerenciamento das águas e tem como um de seus objetivos garantir os múltiplos usos da água por uma gestão descentralizada e participativa dos recursos hídricos.

Para tanto, essa lei conta com instrumentos de gestão, ou seja, ferramentas que visam garantir o seu cumprimento. Dentre eles estão: (i) o Plano de Recursos Hídricos (PRH), que constitui um documento que apresenta uma definição de diretrizes e políticas públicas voltadas para a melhoria da oferta de água, em

quantidade e qualidade, gerenciando as demandas existentes na bacia e definindo metas de curto, médio e longo prazo visando o uso racional e conservação da água., e (ii) o Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH).

O SNIRH visa coletar, armazenar e disponibilizar informações, servindo de base primordial para o desenvolvimento dos Planos de Recursos Hídricos e para a aplicação e monitoramento dos demais instrumentos, bem como de base de dados para realização de projetos de aproveitamento dos recursos hídricos da bacia, prevenção contra cheias e secas, dentre outros estudos.

Conforme definido por Tucci (2002), o monitoramento hidrológico consiste na forma básica de obtenção de dados sobre os recursos hídricos de uma região, devendo ser realizado com a finalidade de gerar informações para alimentação do Sistema de Informações. Este passo se realiza com a implantação, operação e manutenção de uma rede hidrométrica, que consiste num processo difícil e de alto custo, sendo dificultado ainda mais pela grande extensão territorial das áreas a serem monitoradas (NHMP, 2009; HAMILTON, 2012).

Nesse contexto, existe no Brasil uma Rede Básica Nacional de Monitoramento Hidrológico, cobrindo as grandes regiões hidrográficas do país e sendo mantida pela Agência Nacional de Águas (ANA) e operada por entidades públicas e privadas com participação da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), que atua na operação de cerca de 80% das estações que compõem a rede.

Dentre as atividades de monitoramento hidrológico realizadas na operação da Rede Básica Nacional podem ser citadas: (i) coleta de dados de precipitação (chuva), (ii) variação dos níveis de rios e medição de vazão, (iii) amostragem de sedimentos em suspensão e de fundo, dentre outras.

Uma das atividades mais importantes e trabalhosas da operação da rede consiste na medição de vazão dos rios, que indica de forma direta o potencial hídrico do manancial, sendo indispensável para os processos de gestão dos recursos hídricos de uma bacia.

As medições de vazão em rios são realizadas a partir da determinação da velocidade média de escoamento do fluido numa seção de área conhecida. Existem vários processos utilizados para a determinação da velocidade de escoamento e determinação da área da seção transversal, que já vem sendo utilizados a cerca de

cem anos (SIMPSON & OLTMANN, 1993). Dentre eles podem ser citados os flutuadores e os molinetes ou correntômetros acoplados a guinchos com odômetros, que consiste num método bastante eficaz e preciso para a determinação da velocidade de escoamento dos fluidos e batimetria da seção transversal.

Esses métodos de determinação de vazão são chamados de Métodos Convencionais, com uso bastante difundido e consolidado em vários países e empregado de forma sistemática na operação da Rede Hidrométrica Básica Nacional. Porém consistem numa tarefa bastante árdua e em muitas vezes demorada.

Com o advento tecnológico, o desenvolvimento de equipamentos mais sofisticados e de resposta mais rápida para a medição de vazão vêm se tornando cada vez mais comum. Com base nestes aspectos, um equipamento que se destaca é o Perfilador de Corrente Acústico por Efeito Doppler (ADCP). Inicialmente utilizado em estudos oceanográficos, de correntes marinhas, passou a ser adaptado para utilização em rios, gerando medições de vazão mais rápidas e aumentando a produtividade das equipes de campo que atuam na operação das estações, o que no futuro pode possibilitar a ampliação da cobertura da rede de monitoramento.

Dessa forma, os ADCP's se tornam uma ferramenta de destaque, sendo necessário definir os procedimentos mínimos de operação visando à padronização do seu uso, bem como o entendimento dos possíveis problemas associados aos resultados obtidos com as medições de vazão (GAMARO, 1999).

Dentre os principais problemas nas medições de vazão com ADCP podem ser citados os problemas relacionados às seções onde ocorre movimento de sedimento de fundo.

Esse fenômeno, natural da dinâmica fluvial, é mais intenso em rios com leito arenoso com velocidade da água suficiente para proporcionar o movimento do material de fundo junto ao leito do rio, dando origem a um processo denominado de EFM (Efeito de Fundo Móvel). Tal efeito gera erros de posicionamento, resultando em medições de vazão subdimensionadas, que segundo Gamaro (2003a), necessitam de compensação, quando não se utiliza equipamento DGPS (GPS Geodésico Diferencial) acoplado aos Perfiladores Acústicos Doppler.

Por conta do alto custo do DGPS, bem como da dificuldade para sua utilização e principalmente, os possíveis problemas associados ao seu uso, a maioria das medições de vazão realizadas com Perfiladores Acústicos Doppler não conta com este dispositivo (GAMARO, 2003b). Desta forma, é imprescindível a realização de procedimentos para detecção e compensação dos erros nas medições de vazão em seções com Efeito de Fundo Móvel.

De acordo com o exposto acima, esta pesquisa tem como pergunta: Em quais condições de escoamento (vazão, velocidade da água, granulometria do material de leito) o Efeito do Fundo Móvel pode causar problemas significativos às Medições de Descarga Líquida realizadas com ADCPs?

E para tentar responder essa questão, o trabalho se propõe a analisar a influência do movimento dos sedimentos de fundo em medições de descarga líquida, realizadas com ADCPs nos períodos de seca e cheias na bacia do rio São Francisco, nas estações que constituem a Rede Básica Nacional na área de abrangência da CPRM - Superintendência Regional de Salvador (SUREG/SA).

A bacia do rio São Francisco foi escolhida para o trabalho por se tratar de uma região hidrográfica com grande importância para a Gestão dos Recursos Hídricos do país, sendo o rio de maior porte no território do estado da Bahia e possuir um intenso processo de transporte de sedimentos.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar as condições de escoamento que proporcionam a ocorrência do Efeito de Fundo Móvel em Medições de Descarga Líquida realizadas com ADCP's, nos períodos de seca e cheia na bacia do rio São Francisco.

2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar a dinâmica fluvial nas seções de medição do estudo no período de seca e cheia da bacia;
- Identificar a influência do Efeito de Fundo Móvel em Medições de Descarga Líquida feitas com ADCP nas seções de medição do estudo;
- Avaliar as técnicas de correção existentes para minimizar o efeito do movimento do fundo sobre a determinação da vazão com ADCP;
- Definir as condições de escoamento (vazão, velocidade crítica e descarga sólida de fundo) que proporcionam Efeito do Fundo Móvel significativo nas medições de vazão realizadas com ADCPs.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Dinâmica Fluvial

A dinâmica fluvial, de acordo com Wang *et al.* (2013) é o conjunto de fatores que permite identificar as relações existentes entre os rios e a área da bacia hidrográfica; estando diretamente relacionada à definição dos traçados dos rios, das áreas de alagamento e das condições de uso e ocupação do solo na área da bacia.

Desta forma, essa dinâmica é de grande importância para a análise da hidrografia e estudos de águas continentais, e de acordo com Sturm (2010) e Medeiros (2011), tem uma grande ligação com todas as fases do ciclo hidrológico, bem como uma relação direta com a sazonalidade climática, que propicia períodos de seca e de estiagem numa região.

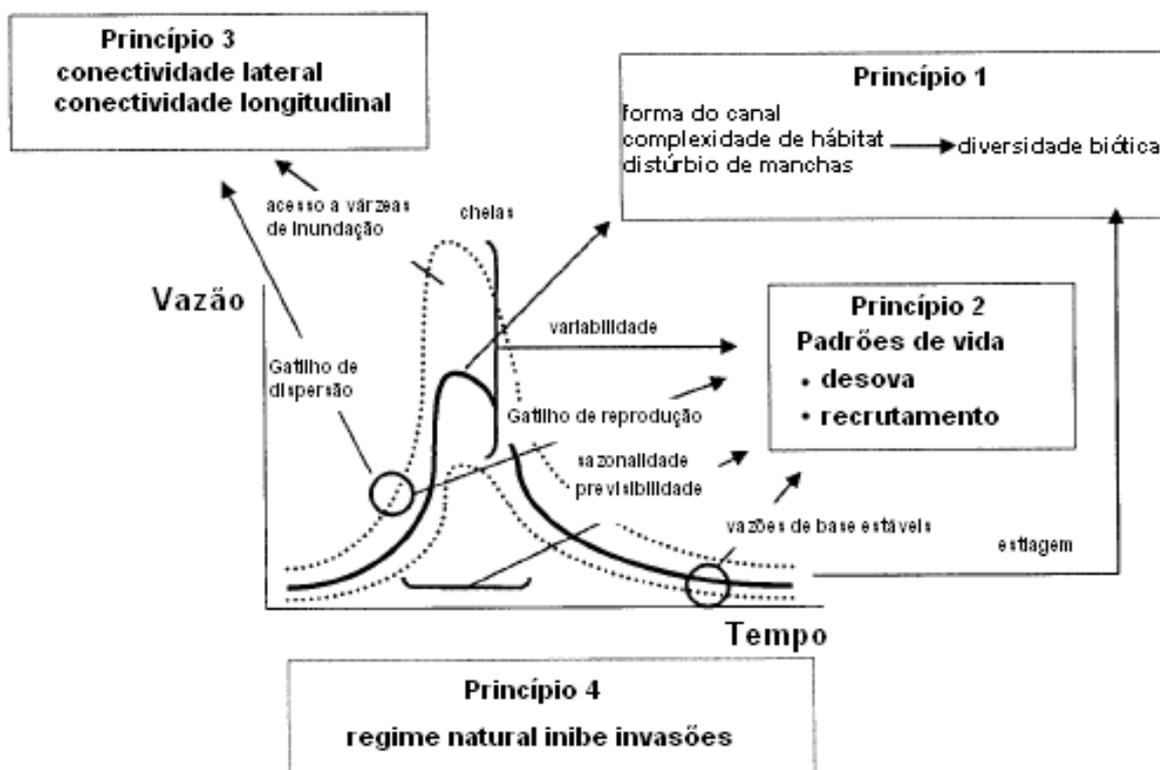
A dinâmica fluvial de uma bacia pode ser caracterizada a partir da quantificação do transporte de material líquido que escoam nos rios dessa região, bem como da sua variação ao longo do tempo. Outro fator importante é o transporte de material sólido, que pode servir de indicador da intensidade dos processos erosivos na área da bacia.

O transporte de água no leito dos rios, ou simplesmente escoamento superficial é fruto do conjunto de interações existentes no interior de uma bacia, permitindo de forma direta a quantificação da disponibilidade hídrica de uma região. Esta grandeza também é chamada de descarga líquida ou vazão.

Esse padrão de movimentação da água, submetido a uma condição de variação sazonal, além de definir a disponibilidade hídrica local, permite o desenvolvimento de uma série de processos físicos, químicos e biológicos, tendo uma grande importância ambiental, conforme resumido na Figura 1 a seguir, apresentada por Bunn & Arthington (2002).

Figura 1 – Importância Ambiental do Regime Hidrológico.

Fonte: Bunn & Arthington (2002)



Os padrões de variabilidade sazonal, bem como as diferentes magnitudes dos valores extremos de vazão (máximos e mínimos), afetam diretamente a definição da forma dos canais dos rios, através dos processos de erosão e deposição de sedimentos; a diversidade biótica, com a interferência nos diferentes ciclos de nutrientes; na conectividade longitudinal (de montante para jusante) e lateral, com interligação e recarga de áreas de alagamento.

O transporte de sedimentos é um processo natural das bacias hidrográficas, que também está submetido aos padrões de variabilidade sazonal das vazões, conforme apresentado por (BAGNOLD, 2012), podendo ocorrer em suspensão, com partículas sólidas sendo carregadas pela água, ou junto ao leito, através de rolamento ou saltos do material mais pesado que se deposita no fundo dos rios (HEYMAN, 2013).

De acordo com Carvalho (2008), o transporte de material sólido no leito dos rios é fruto dos processos erosivos na bacia e da erosão das próprias margens e leito dos rios. Desta forma, apesar de acontecer naturalmente, muitas vezes são amplificados pela ação antrópica, com o desenvolvimento de atividades que causam

desmatamento e conseqüentemente o aumento da intensidade e velocidade do escoamento superficial e da erosão do solo da bacia.

O transporte de sedimentos pode alterar a qualidade da água e interferir na possibilidade da sua utilização para o consumo humano ou atendimento de outras demandas (GOLTERMAN *et al.*, 1983). Os sedimentos podem atuar também como catalizadores ou agentes fixadores para outros poluentes.

Vários produtos químicos ou agentes patogênicos podem estar associados à superfície ou envolvidos por partículas, formando um pacote sedimentar (ONISHI *et al.*, 2010). Desta forma, as partículas sólidas transportadas por suspensão ou junto ao leito dos rios serviriam como agentes potencializadores dos problemas causados por pesticidas, agentes químicos decorrentes de lixo, resíduos tóxicos, bactérias patogênicas, vírus, etc (LEEKES & ROBERTS, 2009).

De acordo com Bridge (2012), além das questões relacionadas à qualidade das águas, os processos de transporte e deposição de sedimentos nos leitos dos rios podem ser prejudiciais a outras atividades, como: (i) transporte fluvial, com a deposição de material no fundo dos rios, gerando assoreamento e comprometendo a área útil do canal; e (ii) barragens de acumulação de água, com a redução da velocidade de escoamento da água nas áreas do lago artificial são intensificados os processos de deposição de sedimentos, gerando a redução do volume útil de armazenamento dos reservatórios.

O transporte de sedimentos junto ao leito do rio também pode afetar a determinação da disponibilidade hídrica de uma bacia, caracterizada de forma básica pelos processos de medição de descarga líquida (vazão).

Em muitos rios, o leito é constituído de material sedimentar não consolidado, que acaba sendo carregado junto ao fundo do rio em decorrência do escoamento da água. Esta condição, de acordo com Dinehart & Burau (2005) é obtida sempre que a água se desloca com uma velocidade superior a um valor mínimo necessário para vencer a inércia das partículas depositadas no leito do rio.

O trabalho de Chanson (1999) indica que a condição mínima necessária para início do transporte de sedimentos de fundo num rio pode ser definida pela Equação 1, a seguir:

$$\tau * > (\tau *)_c$$

Equação 1

Onde:

τ^* - Tensão que o escoamento da água provoca sobre as partículas depositadas no fundo dos rios;

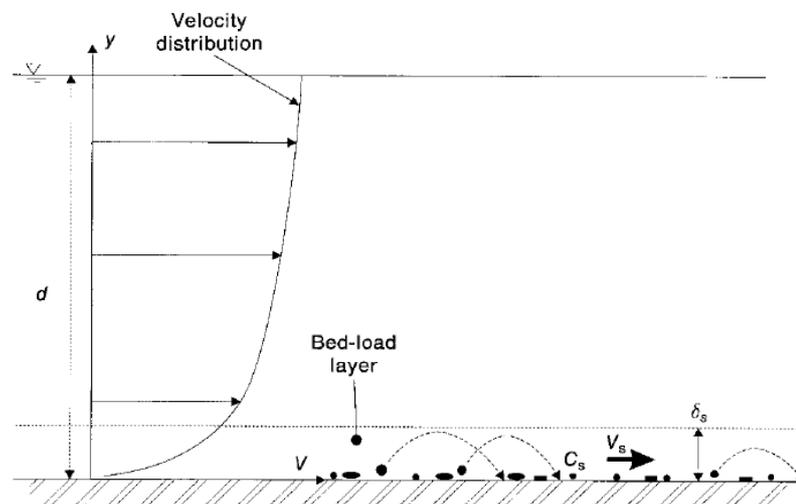
$(\tau^*)_c$ – Tensão crítica, ou seja, mínima tensão necessária para vencer a inércia das partículas de fundo e iniciar o transporte de sedimentos junto ao leito.

O entendimento da equação acima permite verificar que, sempre que o escoamento da água ocasionar sobre as partículas depositadas no leito do rio uma tensão superior a um valor mínimo, (Tensão crítica), haverá condições para que se inicie o transporte de sedimentos de fundo dos rios.

A Figura 2 apresenta um perfil característico de distribuição de velocidade da água ao longo de uma vertical (superfície / fundo) de profundidade (d), indicando que o movimento das partículas junto ao leito do rio é influenciado basicamente por uma porção da água que se desloca mais próxima ao fundo, ou seja, é indicada uma camada de espessura (δ_s) onde se processa o transporte de sedimentos, dando origem aos movimentos de: (i) arraste, quando o material de fundo se desloca junto ao leito e de (ii) saltos, quando as partículas seguem saltitando e se chocando umas com as outras.

Figura 2 – Transporte de Sedimentos: Movimentos de Arraste e Saltos.

Fonte: Chanson (1999)



Yuqian (1989) indica que a condição crítica (que consiste na eminência entre os estados de inércia e movimentação do material de fundo) deve ser abordada como um fenômeno que depende dos seguintes parâmetros físicos do escoamento: (i) velocidade da água no canal, (ii) declividade do canal, (iii) profundidade média do escoamento e, também, (iv) da distribuição granulométrica e do conjunto de forças que atuam sobre as partículas.

A WARSSS (2009) mantém a condição definida por Chanson (1999), apresentada neste trabalho pela Equação 1, fornecendo um resumo de metodologias onde é possível determinar o valor da tensão crítica $(\tau^*)_c$, que deve ser vencida pela tensão exercida pela água para proporcionar o início do transporte dos sedimentos de fundo.

Os valores de tensão crítica $(\tau^*)_c$ podem ser obtidos graficamente utilizando como referência as características da granulometria do material de fundo.

Já para a tensão da água (τ^*) , a determinação pode ser feita em função da Equação 2, apresentada a seguir:

$$\tau^* = \frac{(D \times S)}{(\gamma S - 1) \times d}$$

Equação 2

Onde:

τ^* - Tensão de cisalhamento que o escoamento da água provoca sobre as partículas depositadas no fundo dos rios (Pa);

D – Profundidade Média do rio (m);

S – Declividade da linha de energia (m/m);

γ_s – Peso específico do material de fundo (t/m^3);

d - D_{50} , Diâmetro característico da partícula correspondente mediana da curva granulométrica. (m)

Uma abordagem semelhante a essas, onde é necessário transpor os limites de uma inércia, a partir da qual se daria o início do movimento de fundo é apresentada por Van Rijn (1984), de acordo com Carvalho (2008), porém ao invés de determinar um valor de tensão mínimo, a variável de referência é a Velocidade Crítica (U_{Cr}).

Nos casos onde a velocidade de escoamento da água se apresenta superior ao valor de U_{Cr} , haverá condições para que se inicie o transporte de sedimento de fundo.

As Equação 3 e Equação 4 fornecem os valores de U_{Cr} , de acordo com a metodologia de Van Rijn (1984), em função das características granulométricas do material de fundo (D_{50} e D_{90} - em mm) e também da profundidade média do escoamento (h - em metros), devendo ser utilizada para materiais classificados como silte ou areia fina (Equação 3) e areia média ou grossa (Equação 4).

$$U_{Cr} = 0,19D_{50}^{0,1} \log\left(\frac{4h}{D_{90}}\right) \quad se \quad 0,1 \leq D_{50} \leq 0,5 \text{ mm}$$

Equação 3

$$U_{Cr} = 8,50D_{50}^{0,6} \log\left(\frac{4h}{D_{90}}\right) \quad se \quad 0,5 \leq D_{50} \leq 5,0 \text{ mm}$$

Equação 4

Dessa forma, o transporte do material junto ao leito do rio poderá acontecer com diferentes velocidades, em função da composição granulométrica do sedimento de fundo e da velocidade de escoamento da água, podendo causar problemas às medições de vazão realizadas com equipamentos acústicos.

Diante desse contexto, além da Velocidade Crítica, U_{Cr} , que representa a condição mínima para ocorrência do transporte de sedimentos, a Descarga Sólida de Fundo, que corresponde ao total de sedimentos transportado junto ao leito do rio, pode ser um indicador da magnitude dos problemas aos quais as medições de vazão com uso dos Perfiladores Doppler podem estar submetidas.

Carvalho (2008) indica que a Descarga Sólida de Fundo pode ser obtida de forma:

- (i) Direta: A amostra é coletada em diversos pontos da seção transversal, determinada o seu peso seco, a granulometria e calculada a descarga de arrasto. O medidor fica apoiado no leito entre 2 min a 2 horas de tal forma a receber no receptor 30 a 50% de sua capacidade.
- (ii) Indireta: Coleta de material do leito em vários pontos da seção, análise granulométrica, medida da declividade, da temperatura, parâmetros hidráulicos e cálculo da descarga de arrasto e de

material do leito por fórmulas (de Ackers e White, Colby, Einstein, Engelund e Hansen, Van Rijn, Kalinske, Laursen, Meyer-Peter e Muller, Rottner, Schoklitsch, Toffaleti, Yang e outras).

- (iii) Deslocamento de Dunas: São levantadas linhas longitudinais do leito do rio e feita comparação das mesmas ao longo do tempo, permitindo observar o deslocamento das dunas e proceder com o cálculo da descarga de fundo.

Gamaro et al. (2011) utilizaram a metodologia de Deslocamento de Dunas para estimativa da Descarga Sólida de Fundo do rio Paraná, fazendo uso de ADCP para levantamento das linhas longitudinais.

Scapin et al. (2007) avaliaram métodos indiretos de estimativa de transporte de sedimento de fundo, em comparação com medições diretas. Neste estudo foram analisados oito procedimentos, dos quais: (i) Método de Yang (1973), (ii) Método de Ackers e White (1973) e (iii) Método de Van Rijn (1984) apresentaram os melhores resultados.

Carvalho (2009) realizou uma avaliação do transporte de carga sedimentar no médio rio Araguaia, através da comparação entre os Métodos de Deslocamento de Dunas e Van Rijn (1984), indicando que o primeiro apresentou resultados próximos aos valores históricos de referência para aquele rio.

De acordo com Carvalho (2008), a escolha de fórmulas indiretas para determinação da descarga de fundo é um processo difícil. Uma fórmula pode ser mais precisa que outra, em função das condições de escoamento tais como velocidade da água e granulométrica do material de fundo, bem como da largura e profundidade do rio.

O Método de estimativa indireta da descarga de fundo, desenvolvido por Yang (1983), tem sua formulação detalhada por Scapin *et al.* (2007) e foi utilizado, de forma satisfatória, em rios de grande porte com leito arenoso por Carvalho (2009) e Almeida (2011).

3.2 Medição de Descarga Líquida

De acordo com USGS (2012), medição de descarga líquida é todo processo utilizado para determinar a quantidade de um fluido que escoar, numa seção transversal de um conduto, num determinado intervalo de tempo.

Com relação aos rios, a vazão é a quantidade de água que escoar, por uma seção transversal do leito, num determinado intervalo de tempo.

Existem vários métodos para a determinação da vazão em rios, dentre eles, são destacados por Forrest (2012): (i) medição e integração da distribuição da velocidade; (ii) método volumétrico, (iii) método químico; (iv) canais artificiais, de geometria regular (vertedores e calhas Parshal) e (v) método acústico.

Cada método de determinação de vazão tem uma utilização mais frequente, definida em função da natureza do método (procedimentos e equipamentos), bem como da facilidade de utilização e eficiência das medições (FENTON & KELLER, 2001).

O método volumétrico, de acordo com o USGS (1982), é um dos mais precisos e consiste em encher um reservatório de volume conhecido enquanto se faz a medição do tempo necessário para o enchimento. Este método é aplicado basicamente em pequenos riachos, sendo impraticável em rios de maior porte, devido às dificuldades para armazenamento de grandes volumes de escoamento.

Moore (2004) apresenta o método químico como um procedimento que utiliza da injeção de uma quantidade de solução de um produto químico, com concentração conhecida num ponto do rio e posterior medição da concentração desse elemento químico num ponto a jusante (com distância conhecida). Zellweger (2006) indica que a vazão do rio seja determinada em função da diferença da concentração nos pontos de emissão e de medição. Sua aplicação é mais empregada em rios de montanha, com leito irregular e muita turbulência, dificultando a aplicação de outros métodos.

Já a utilização de canais ou estruturas regulares depende de construções de geometria simples e bem definida, tais como calhas e vertedores, permitindo a determinação da vazão, em função da altura da lâmina d'água atingida durante o escoamento por estes elementos (SANTOS *et al.*, 2001). De acordo com Boiten

(2002), a sua utilização também é limitada para rios de maior porte, pois exigiriam a construção de grandes e custosas estruturas.

O método de medição e integração da distribuição da velocidade, também chamado de método convencional, realizado por molinetes hidrométricos e o método acústico, desenvolvido com perfiladores Doppler, são os mais utilizados atualmente para medições de vazão em rios, e estão apresentados a seguir.

3.2.1 Método Convencional (Molinete Hidrométrico)

Conforme apresentado por Harte & Kiah (2009), as medições de vazão realizadas em rios pelo método chamado de convencional consistem na determinação de duas grandezas: (i) velocidade de escoamento da água e (ii) área da seção onde se processa o escoamento.

De acordo com Tucci (2002), a vazão é determinada de maneira indireta, pela relação existente entre duas outras grandezas, que são de fato mensuráveis no processo, sendo:

$$Q = V_m \times A$$

Equação 5

Onde:

$Q =$ Vazão (m^3/s);

$V_m =$ Velocidade Média de Escoamento da Água (m/s);

$A =$ Área da Seção Transversal onde ocorre o escoamento (m^2).

A velocidade de escoamento é determinada em diversos pontos da seção transversal do rio (ao longo da profundidade e de uma margem para outra) com a utilização de correntômetros, conhecidos como molinetes, constituídos por corpo rígido com cauda e uma parte móvel.

A parte móvel tem a função de girar movida pelo escoamento da água, podendo ser uma hélice ou conchas, conforme Figura 3 (SANTOS *et al.* 2001).

Figura 3 – Diferentes tipos de Molinetes



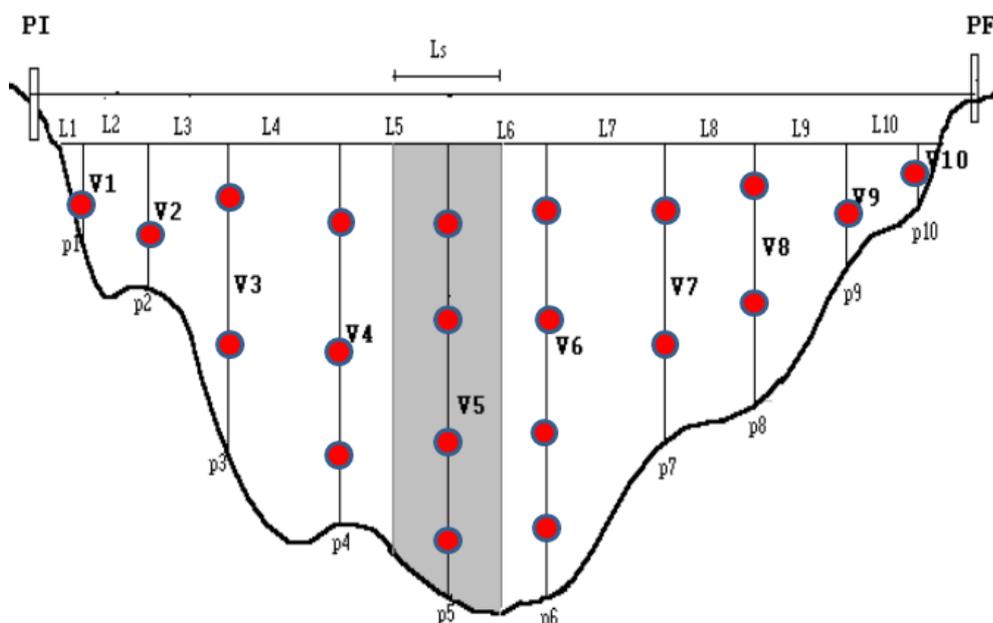
a) Molinete de Eixo Horizontal com Hélice.



b) Molinete de Eixo Vertical com Concha.

A quantidade de giros das hélices ou conchas do molinete, contada num determinado intervalo de tempo, permite a determinação da velocidade de escoamento da água em cada um dos pontos de amostragem. A Figura 4 apresenta uma representação gráfica de pontos de amostragem de velocidade da água, ao longo de uma seção transversal. Após a amostragem de uma quantidade significativa de pontos, a velocidade média do escoamento é determinada (TUCCI, 2002).

Figura 4 – Representação gráfica do processo de medição de vazão pelo Método Convencional



Em cada vertical de amostragem de velocidade também é realizada a medida da profundidade do rio e medição da posição da vertical em relação a um referencial fixo, (PI – ponto de início da seção transversal), permitindo ao final da travessia, obter a área onde se dá o escoamento da água.

A utilização dos pontos PI, de início da seção transversal e PF, no final da mesma, se faz necessária para garantir que todas as medições sejam realizadas na mesma seção transversal estando amarradas ao mesmo referencial.

Como a largura dos rios, a profundidade em cada vertical e a velocidade da água variam de seção para seção de medição é necessário realizar um número mínimo de verticais, bem como de pontos de amostragem de velocidade da água em cada vertical, garantindo a representação satisfatória da área de escoamento e da velocidade média da água na seção transversal do rio, onde se processa a medição de vazão.

A recomendação da ANA, no seu Plano de Trabalho da Operação da Rede Básica Nacional de Monitoramento Hidrometeorológico (2012), indica um espaçamento mínimo de 0,30 m entre verticais de amostragem, sendo que para rios com largura superior a 6,0 m a medição de vazão convencional deve conter pelo menos vinte verticais.

Em cada vertical o número de pontos de determinação da velocidade da água irá variar em função da profundidade da vertical; para verticais rasas, com profundidades inferiores a 0,60 m, um ponto de velocidade situado a 60% da profundidade é suficiente para representar a velocidade média da vertical. Podendo chegar a seis pontos de amostragem de velocidade para verticais com profundidades superiores a 4,0 m.

Desta forma, em cada vertical de amostragem é obtido um valor da velocidade média de escoamento, que multiplicado pela área de influência da vertical fornece um valor parcial da vazão. O método da Meia Seção, apresentado por Santos et al. (2001), utiliza como área de influência, uma faixa definida pela posição da vertical até metade da distância para as verticais adjacentes (anterior e posterior).

Também é recomendado pela ANA que nas estações onde não exista Curva Chave definida, (equação que relaciona o nível d'água no momento da medição, com a vazão do rio no mesmo instante), a medição de vazão deve ser realizada pelo menos duas vezes em cada visita à estação. Caso as medições não sejam consideradas iguais, se faz necessário a realização da terceira medição.

O Termo de Referência da ANA para operação da Rede Básica Nacional (2012) indica que duas medições de vazão serão consideradas iguais, se forem realizadas

de forma consecutiva, sem variação significativa da cota do nível d'água entre a realização das medições e com diferença de vazão entre elas inferior ou igual a $\pm 5\%$.

Para estações que possuem Curva Chave, deverá ser realizada uma medição de vazão e comparada com o resultado esperado pela equação. Esta medição será considerada aceitável se o seu valor não apresentar diferença superior a $\pm 10\%$, em relação à Curva.

A Figura 5 (a) apresenta a realização de uma Medição de Vazão convencional com molinete de concha, num trecho de travessia a vau no rio Catu, no município de Catu - BA, em treinamento realizado pela CPRM e IFBA-Catu, em setembro de 2009.

A Figura 5 (b) apresenta embarcação com guincho hidrométrico e molinete de eixo horizontal com lastro de 30 kg para realização de medição de vazão na estação de Fazenda Macambira, no rio Grande, no município de Cotegipe-Ba em julho de 2008.

Figura 5 – Medição convencional – (a) Travessia a vau e (b) Travessia com Embarcação



(a)



(b)

Essa atividade é bastante desgastante exigindo capacidade técnica e física para a realização da mesma, sendo também um processo demorado.

Em rios de pequeno porte, com travessia a vau, o tempo médio das medições de vazão observado na operação das estações da Rede Básica Nacional, na área de atuação da CPRM SUREG-SA, se aproxima de uma hora, gastos na preparação da seção transversal, montagem dos equipamentos e realização das tomadas de profundidade e velocidade em cada vertical.

Em rios onde se faz necessário a utilização de embarcações para realização de travessias e existe a possibilidade de instalação de cabo de aço entre as margens

(rios com largura até 200 m) as medições tem um tempo médio de duração superior a duas horas.

Em grandes rios, como é o caso do rio São Francisco, onde é necessário ancorar a embarcação em cada vertical da medição, o tempo de duração desta atividade pode alcançar mais de 5 horas de trabalho, por medição.

3.2.2 Método Acústico (ADCP ou ADP)

Outra opção para realização de medição de vazão são os Perfiladores Acústicos Doppler, também conhecidos como ADCP's (do inglês "Acoustic Doppler Current Profilers") (RDI, 1989), ou ADPs "Acoustic Doppler Profilers" (SONTEK, 2010), que são seus nomes comerciais, dados pelo respectivo fabricante e que passaram a fazer parte do jargão dos utilizadores destes equipamentos.

As Figura 6 e Figura 7 apresentam diferentes modelos de Perfiladores Acústicos Doppler de fabricação da RDI e SONTEK, respectivamente.

Figura 6 – Modelos de ADCPs – Fabricante RDI.

Fonte: RDI (2001)



Figura 7 – Modelos de ADPs – Fabricante Sontek.

Fonte: SONTEK (2010)



Inicialmente os Perfiladores Acústicos Doppler foram desenvolvidos para utilização em estudos oceanográficos, de correntes marítimas e sua instalação era realizada no fundo do mar, com perfilagem realizada do fundo para a superfície (RDI, 2001).

Esses equipamentos, utilizados no processo de medição de vazão em rios, atuam com a mesma intenção verificada nos processos convencionais, (OBERG & MULLER, 2007): (i) determinação da velocidade de escoamento da água e (ii) determinação da área da seção transversal onde se processa o escoamento do fluído.

Na Figura 8 é apresentada uma representação esquemática de uma medição de vazão realizada em canal artificial, com utilização de Perfilador ADP M9, com RTK e prancha “*Hidroboard*”. Durante a realização da travessia é executado o levantamento batimétrico, permitindo definir a seção transversal do canal, bem como é realizada a medição da velocidade de escoamento da água ao longo da seção.

Figura 8 – Medição de Vazão em Canal artificial com ADP M9 Sontek.

Fonte: SONTEK (2010)



Os ADCPs se baseiam num princípio acústico denominado Efeito Doppler, que consiste numa aparente mudança na frequência recebida de uma onda sonora em decorrência de movimento relativo entre a fonte emissora e a receptora (HALLIDAY *et al.* 1993).

A Figura 9 apresenta três situações distintas, onde pode ser verificada a ocorrência do efeito Doppler, tendo como base um pulso transmitido com frequência inicial F_0 e recebido com frequência F_D .

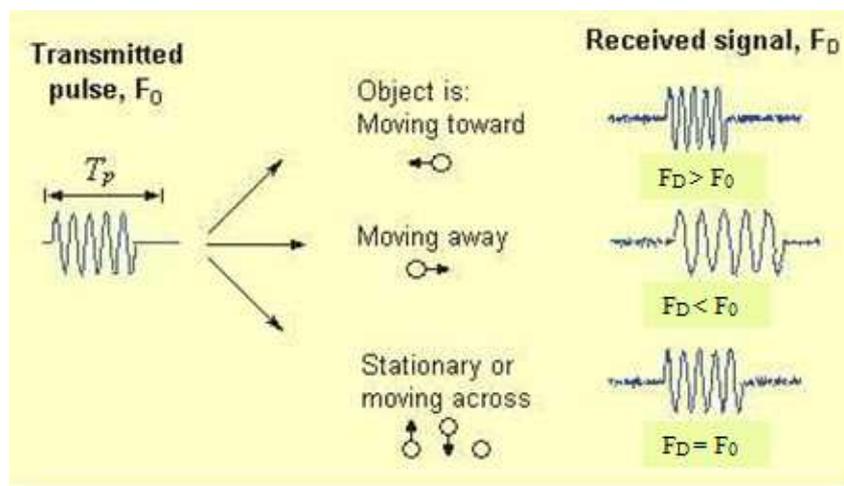
1 - Na primeira situação, $F_D > F_0$, ou seja, a frequência recebida é maior que a emitida, devido ao movimento relativo de aproximação entre as fontes emissora e receptora, gerando uma compressão da onda.

2 - Na segunda situação, $F_D < F_0$, ou seja, a frequência recebida é menor que a emitida, devido ao movimento relativo de afastamento entre as fontes emissora e receptora, gerando um alongamento da onda.

3 - Na terceira situação, $F_D = F_0$, ou seja, a frequência recebida é igual à emitida, devido ao fato de não haver movimento relativo entre as fontes emissora e receptora, ou do movimento relativo ser perpendicular à direção de propagação do pulso emitido.

Figura 9 – Efeito Doppler: Princípio Físico

Fonte: SONTEK (2010) – Apresentação do fabricante para os equipamentos M9 e S5.



De acordo com o exposto, os ADCP's, nada mais são do que equipamentos emissores e receptores de pulsos sonoros que utilizam o princípio do Efeito Doppler, com duas finalidades (SONTEK, 2000):

1- Determinação da velocidade de escoamento da água em relação ao barco: os ADCP's emitem pulsos acústicos com frequência F_0 conhecida, que refletem nas partículas em suspensão carregadas pela água, sendo recebidos pelo próprio ADCP, em forma de eco, com frequência F_D , onde a diferença existente entre F_0 e F_D permite determinar a velocidade relativa água / barco, uma vez que a medição é feita

de forma dinâmica, com travessias de uma margem para outra do rio, assumindo que a velocidade de deslocamento das partículas em suspensão é igual a do fluido que as transporta.

2 - Determinação da velocidade de deslocamento da embarcação em relação ao fundo do rio e realização da batimetria da seção transversal do rio: Os ADCP's emitem pulsos acústicos com frequência F_1 conhecida, diferentes dos pulsos emitidos para determinação da velocidade da água, que irão refletir após entrar em contato com o leito do rio onde se está realizando a medição de vazão. Este pulso de frequência característica F_1 também se choca com as partículas em suspensão em movimento na água, porém seu retorno é bastante diferente em termos de intensidade sonora, podendo ser facilmente separado do retorno proveniente do choque das ondas sonoras com o fundo do rio.

A frequência F_x , recebida pelo ADCP, será diferente de F_1 devido somente ao deslocamento do barco, uma vez que se admite que o leito do rio é estático (fundo fixo) (SCOTT & MORLOCK, 1996). Com o conhecimento das frequências F_1 e F_x , bem como do intervalo de tempo entre a emissão e recepção do pulso sonoro é possível determinar: (i) a velocidade de deslocamento do barco em relação ao leito fixo do rio e (ii) a profundidade do rio no ponto de amostragem.

Após determinar a velocidade relativa barco / água e a velocidade relativa barco / fundo, a velocidade da água será a diferença entre estas. O processo de batimetria permite obter a área da seção transversal onde se processa o escoamento e desta forma é obtido o valor da vazão (MUSTEA *et al.*, 2004). Este tipo de referência que leva em consideração o fundo estático do rio, para a determinação da velocidade de deslocamento do barco é chamada de "*Bottom Tracking*" (BT), de acordo com RDI (1989, 2001) e SONTEK (2000).

Uma medição de vazão realizada pelo Método Acústico consiste num conjunto mínimo de cinco travessias, realizadas de forma consecutiva, que devem se aproximar de um valor médio, que representará o resultado final da medição (OBERG & MULLER, 2007).

Cada travessia deve ser realizada respeitando um limite de velocidade a ser desenvolvido pela embarcação onde o equipamento acústico está acoplado. A

velocidade de deslocamento do ADCP não deve ser muito superior à velocidade de escoamento da água durante a medição.

Oberg & Muller (2007), indicam que o deslocamento da embarcação não deve ser superior a duas vezes a velocidade da água. Desta forma, num rio com 100 metros de largura e velocidade média de escoamento da água na ordem de 0,5 m/s, numa medição com realização de cinco travessias, o tempo gasto no processo não ultrapassaria nove minutos.

Somando o tempo necessário para montagem do equipamento e posicionamento da embarcação no início de cada travessia, a medição de vazão não ultrapassaria 30 minutos de duração. Isto é cerca de quatro vezes mais rápido se comparado com tempo médio demandando pelo método convencional.

As medições de vazão realizadas com ADCPs são geralmente mais rápidas que as medições convencionais, demandando menor esforço físico e representando menor risco às equipes de campo, uma vez que não necessita a realização de ancoragem das embarcações, nem a utilização de guinchos, com lastros pesados, para posicionamento dos molinetes nos pontos de tomada de velocidade (GRIFFITHS, 2006).

Esses fatores contribuem de forma direta para o aumento da utilização dos ADCPs, principalmente em campanhas de medição de vazão em períodos de cheia nas bacias.

Como as medições com ADCP geralmente tem menor duração que as convencionais, é possível realizar um número maior de medições de vazão em cada campanha de campo, permitindo um melhor detalhamento do regime de escoamento na bacia.

Cabe lembrar que o aumento do uso dos ADCPs para a obtenção de dados de vazão torna necessária a definição de procedimentos de medição, visando uma melhor qualidade dos resultados obtidos em campo, bem como a necessidade de estudar o Efeito do Fundo Móvel (EFM), que segundo Gamaro (2003a) é uma das principais fontes de erro de medições acústicas que utilizam o BT como referência.

3.3 Efeito do Fundo Móvel em Medições Acústicas

A utilização de equipamentos acústicos, denominados ADCPs ou ADPs, para medição de vazão, tem se tornado cada vez mais frequente nas atividades de monitoramento de recursos hídricos. Estes equipamentos podem estar sujeitos ao Efeito do Fundo Móvel, decorrente do intenso transporte de material junto ao leito dos rios.

Os trabalhos realizados por Rennie et. al (2002), Defendia *et al.* (2010) e Sassi et. al. (2011) apresentam transportes de sedimento de fundo ocorrendo com velocidade variando entre 2 a 37% da velocidade média de escoamento da água.

Para as situações onde ocorre movimentação de material junto ao fundo do rio, as medições de vazão realizadas com ADP podem estar sujeitas ao EFM, fornecendo resultados subestimados da disponibilidade hídrica local.

De acordo com os conceitos apresentados no tópico referente aos processos de medição de descarga líquida, os ADPs utilizando o “*Bottom Tracking*” (BT) como referência para determinação da velocidade de deslocamento do barco, funcionam baseados na premissa de que o fundo do rio é estático (SONTEK, 2010).

Dessa forma, o pulso enviado para o leito do rio com frequência F_1 , que tem intenção de determinar a velocidade do barco em relação ao fundo (considerado estático) e também de proceder com a batimetria, pode ser “embaralhado” se houver transporte intenso de sedimentos junto ao leito do rio (CALLEDE *et al.*, 2000). Nesses casos, a ocorrência de transporte de sedimentos de fundo interfere na resposta (eco) do pulso acústico emitido para o leito.

O retorno do sinal, após se chocar com o fundo, deveria retornar com frequência diferente da emitida, somente em função do deslocamento do barco em relação ao fundo estático, o que acaba não ocorrendo de fato (OBERG, 2003).

Nessas situações, de acordo com Millar e Church (2002), a diferença entre as frequências (de emissão e recepção) não se dá apenas por conta do movimento do barco em relação ao fundo, também sendo dependente da movimentação do material carregado junto ao leito do rio e da sua composição granulométrica.

O EFM ocorre nas condições onde o material de fundo está se movendo, sendo transportado e os ADP's acabam por confundi-lo com o próprio leito do rio.

Nessas situações pode haver interferência na determinação da velocidade do barco em relação ao fundo, o que por sua vez, interfere na determinação da velocidade de escoamento da água e conseqüentemente no valor de vazão que é obtido de maneira subestimada (FONG & MONISMITH, 2004).

Todos esses fatores tornam necessário proceder com a correção da parcela de vazão perdida devido ao EFM (GAMARO, 1999).

Chiu *et al.* (2005) verificaram que os valores de vazão medidos com ADCPs se apresentaram de 1 a 32% menores se comparados com medições convencionais (molinete) realizadas no mesmo dia em rios onde ocorre o EFM.

Outros trabalhos com abordagem semelhante podem ser citados: (i) Szupiany *et al.* (2007), obtiveram medições com ADCP de 10 a 15% menores que as medições convencionais e (ii) Gunawan *et al.* (2010) apresentaram medições de 7 a 23% menores.

No Brasil, os trabalhos de Gomes *et al.* (1997) e Gomes e Santos (1999), realizaram medições com ADCPs em alguns postos fluviométricos da bacia do rio Paraná, obtendo valores de vazão até 13% menores se comparados à medições convencionais. Gamaro (2003a) obteve na mesma bacia diferenças de até 18%.

Na bacia do rio Amazonas foi verificado por Filizola *et al.* (1999) diferenças de até 12% em medições realizadas no rio Solimões, na estação de Manacapuru.

Gamaro (2003b) obteve até 22% de diferença entre medições com ADCP e molinete na mesma estação, no período de cheia da bacia.

O resultado da batimetria, de acordo com Gaeuman & Jacobson (2007), não apresentou diferenças significativas em comparação com medições realizadas com Ecobatímetros. Esse resultado indica que mesmo na presença de Fundo Móvel não há indícios que a medição de profundidade tenha sido afetada.

3.3.1 Detecção e Correção do EFM

Segundo Itaipu (2009), o EFM não foi levado em conta até o ano de 2002, quando começaram a ser definidos procedimentos para medição de vazão utilizando ADCP's.

A partir desse ano foi desenvolvido um teste para a verificação da ocorrência de fundo móvel, onde pôde ser verificado que o problema ocorria em muitas seções de monitoramento. (CASTRO *et al.*, 2002).

Dada a relevância dos erros no processo de medição de vazão por conta deste fenômeno, vários procedimentos de compensação vêm sendo desenvolvidos e utilizados desde então (GAMARO 2003a).

O teste para a verificação do EFM, segundo Rainville & Kashyap (2007), consiste em realizar amostragens de velocidade com o barco parado / ancorado, por no mínimo cinco minutos, em verticais de grande velocidade de escoamento da água na seção de estudo. Caso sejam verificados valores elevados para velocidade de deslocamento do barco, que de fato está parado, a ocorrência do fenômeno estará confirmada.

Para evitar que o EFM seja prejudicial à determinação da vazão, a medição pode ser realizada com uso de GPS Diferencial (DGPS) e de um Sistema de Correção em Tempo Real, "*Real Time Kinematic*" – (RTK), acoplado aos ADCP's, desta forma o deslocamento do barco será determinado com base nas coordenadas fornecidas pelos DGPS e não com base na referência do sinal emitido para o fundo do rio, ("*Botton Tracking*").

De acordo com Gamaro (2003b), o balanço vantagens x desvantagens do uso dos DGPS acoplados aos ADCP's indica, em muitos casos, que os benefícios associados superam os possíveis problemas. Porém, um dos maiores fatores limitantes provém do fato que os DGPS são equipamentos de alto custo e que em muitos casos não existe a possibilidade de aquisição dos mesmos por parte dos proprietários de ADCP's (no Brasil, grande maioria constituída por entidades públicas).

Somado a esse fator (financeiro) existem os aspectos técnicos, uma vez que a utilização do DGPS pode ocasionar, em alguns casos, erros de maior magnitude que

os verificados nas medições de vazão com ADCP, usando a referência *BT* submetida ao EFM.

De acordo com Rainville (2006) e Wagner & Mueller (2011), a falta da qualidade de sinal do GPS em vários locais do globo terrestre devido a uma cobertura não uniforme da superfície da Terra pelos satélites; condições climáticas afetando a qualidade do sinal dos DGPS são fatores que podem limitar os resultados obtidos em medições de vazão com ADCP e DGPS acoplado.

Outras possíveis fontes de problemas podem ser citadas, como a presença de obstáculos nos locais de medição, gerando interferência na recepção do sinal do DGPS; a troca constante de satélites durante as medições; e dificuldades de transmissão da correção RTK entre base fixa e barco em rios de grande largura.

Todos esses fatores reforçam a necessidade de aprimoramento das técnicas de medição de vazão com ADCPs e dos procedimentos para verificação e correção dos Efeitos de Fundo Móvel, em rios onde a dinâmica fluvial favoreça a ocorrência de transporte de sedimentos de fundo, mesmo em medições onde existe a possibilidade de utilização do DGPS acoplado aos ADCPs.

4 ÁREA DE ESTUDO

4.1 Caracterização da Bacia do Rio São Francisco

O CBHSF (2004) indica que a bacia possui 639.219 km² de área de drenagem, abrangendo sete Unidades da Federação, dentre elas: Minas Gerais, Bahia, Pernambuco, Alagoas e Sergipe.

O rio São Francisco percorre o total de 1.700 km, desde sua nascente na Serra da Canastra em Minas Gerais, até a foz, na divisa dos estados de Sergipe e Alagoas. A Figura 10 apresenta a localização geográfica da bacia do rio São Francisco.

Figura 10 – Bacia Hidrográfica do rio São Francisco – Localização Geográfica.

Fonte: ANA (2003)



4.2 Caracterização da região do Médio São Francisco

A região do Médio São Francisco se prolonga do município de Pirapora (MG) até a cidade de Remanso no estado da Bahia, incluindo uma série de sub-bacias, dentre elas as dos rios Grande e Verde Jacaré.

A vegetação característica da região é constituída por Cerrado e Caatinga. As condições climáticas se assemelham às características de uma região tropical semiárida. As chuvas caem de novembro a abril, com precipitação média anual de 600 a 1.400 mm.

A região admite a subdivisão em Médio Superior e Inferior, sendo que o primeiro abrange o trecho entre Pirapora e a fronteira com a Bahia. A área de estudo desta pesquisa abrange a parcela do Médio Inferior, situada no oeste da Bahia, no trecho entre os municípios de Bom Jesus da Lapa e Barra.

A Figura 11 apresenta um hidrograma, construído com base nos valores médios mensais para as vazões observadas nos postos fluviométricos da ANA 45480000 – Bom Jesus da Lapa e 46360000 – Morpará, para o período de janeiro de 2007 a novembro de 2012.

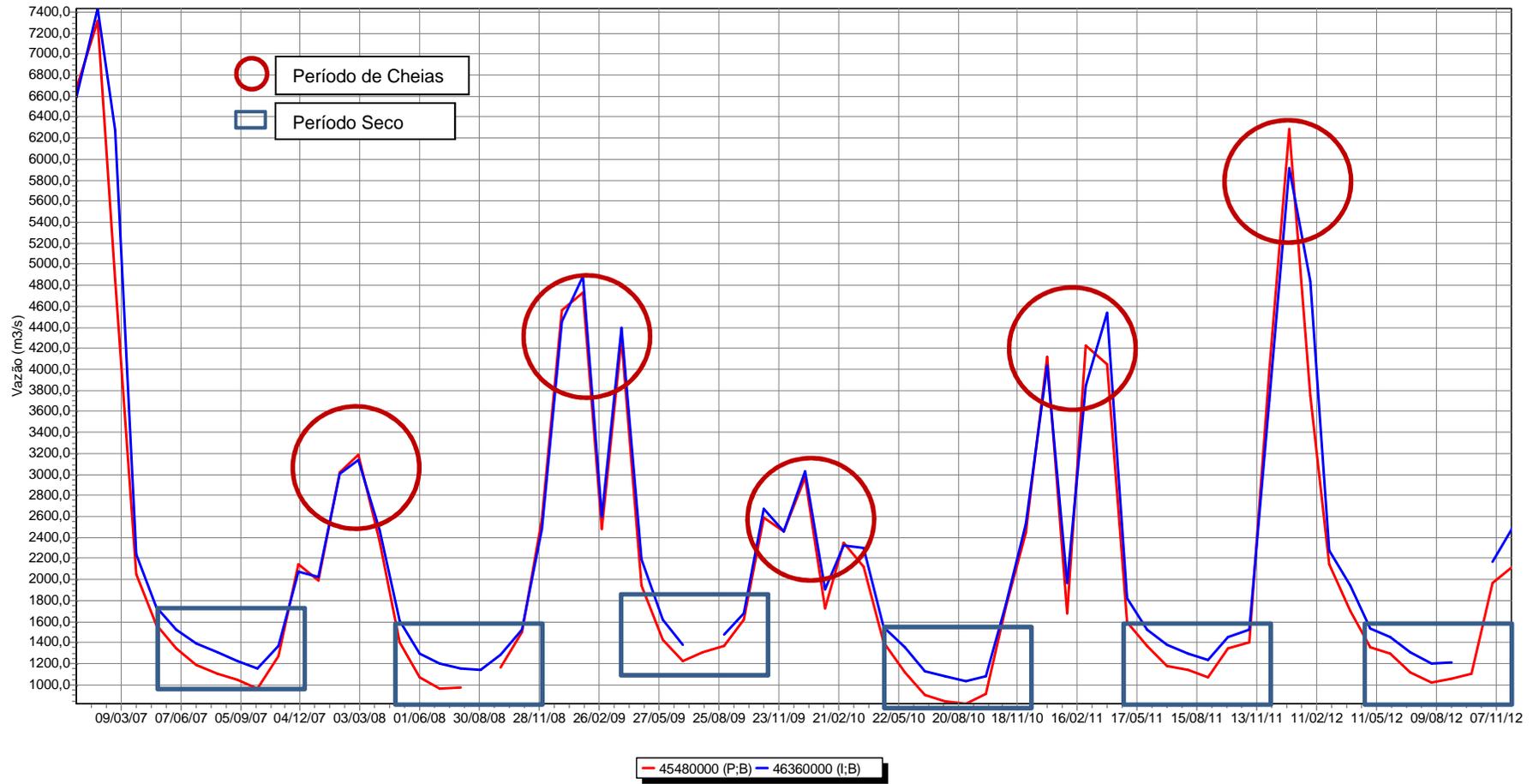
A estação de Bom Jesus da Lapa está situada no início do trecho de estudo desta pesquisa. Já a estação de Morpará é o último posto de medição de vazão na região do Médio Inferior da bacia, constituindo um trecho de aproximadamente 200 km de extensão.

A análise do fluviograma médio mensal indica um comportamento hidrológico bastante semelhante nos dois postos de observação, sendo também compatível com as condições climáticas da região onde a bacia está inserida.

Os meses de outubro a março apresentam os valores mais elevados de vazão média, em torno de 5.000 m³/s, com valor máximo do período, observado em março de 2007, chegando a um total de 8.600 m³/s. O trimestre com maiores valores de vazão está compreendido entre os meses dezembro e fevereiro.

No restante do ano ocorre a recessão do hidrograma da bacia. Para o período de abril a setembro os valores de vazão média se apresentam em torno de 2.000 m³/s, tendo o valor mais baixo do período registrado no mês de agosto de 2010, com vazão de 940 m³/s.

Figura 11 – Hidrograma – Estações Bom Jesus da Lapa e Morpará.
Período: jan/2007 a nov/2012



4.3 Estações Fluviométricas

Para a realização do projeto de pesquisa, foram selecionadas sete estações pertencentes à Rede Básica Nacional de Monitoramento Hidrometeorológico (ANA/CPRM), conforme apresentado na Figura 12 e listado na Tabela 1, a seguir:

Tabela 1 – Estações Fluviométricas

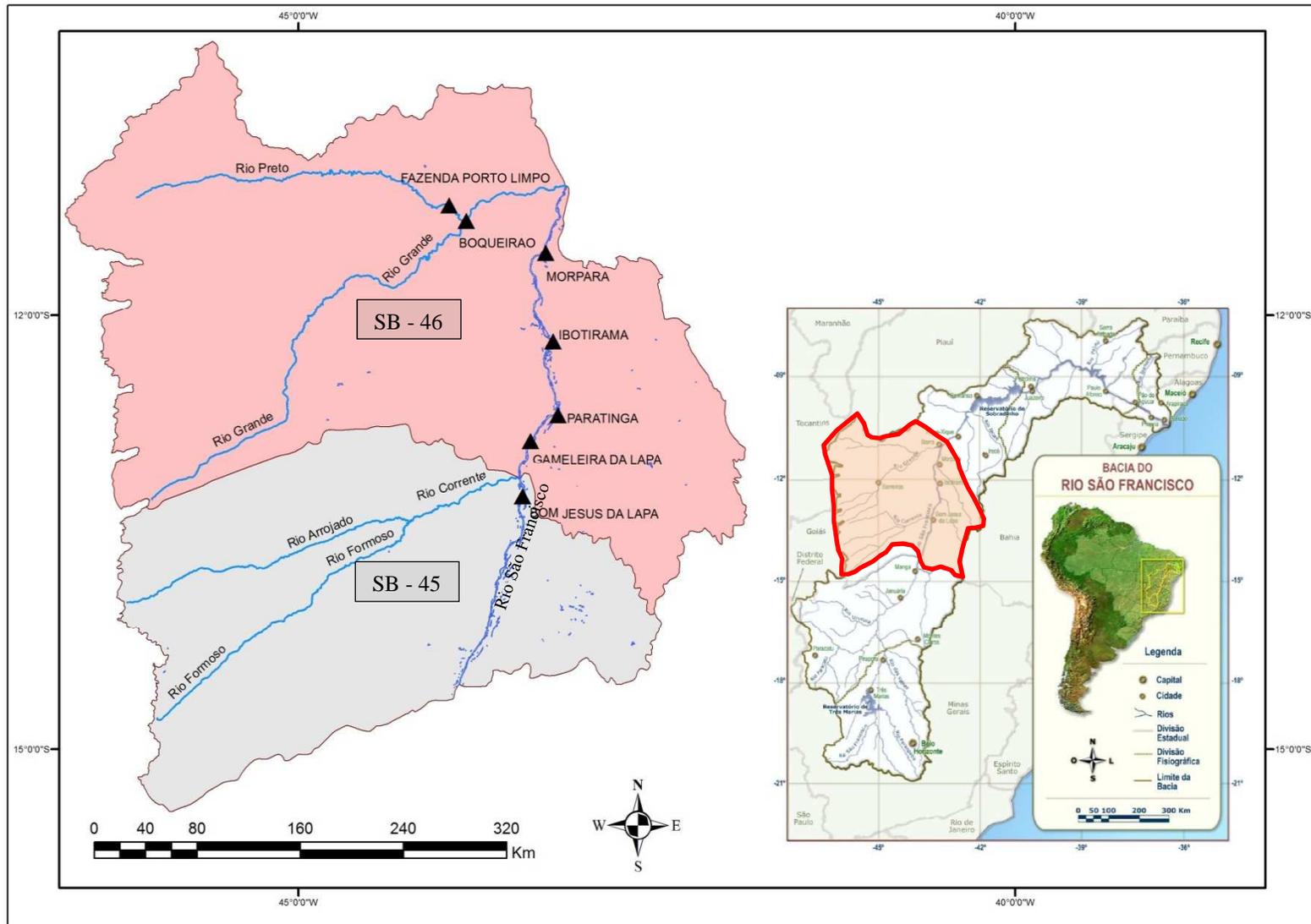
Estação	Código	Nome	Latitude (S)	Longitude (W)	Altitude (m)	Área de Drenagem (km ²)
01	45480000	Bom Jesus da Lapa	13°15'25"	43°26'21"	420	271.000
02	46035000	Gameleira	12°57'07"	43°22'47"	413	309.000
03	46105000	Paratinga	12°41'48"	43°13'35"	413	314.000
04	46150000	Ibotirama	12°10'57"	43°13'23"	408	323.000
05	46360000	Morpará	11°33'30"	43°16'57"	399	345.000
06	46902000	Boqueirão	11°21'19"	43°50'44"	401	46.400
07	46870000	Fazenda Porto Limpo	11°14'08"	43°56'58"	414	22.000

As estações de número 01 a 05 estão situadas no rio São Francisco, no trecho médio inferior, nas sub-bacias 45 e 46, com intenso processo erosivo verificado em campo, proveniente de grande atividade agrícola e desmatamento das margens do rio e conseqüentemente com grande possibilidade de ocorrência do EFM.

A estação 06 é a última estação de monitoramento no rio Grande, antes da confluência com o rio São Francisco no município de Barra. Esta estação drena os afluentes do rio São Francisco, pela sua margem esquerda, incluindo as regiões dos municípios de Luís Eduardo Magalhães e Barreiras, onde atividades de cultivo agrícola, em especial a soja, algodão e milho, vem alterando a cobertura vegetal nativa da bacia e aumentando os processos erosivos e de transporte de sedimento.

A estação 07 é a última estação de monitoramento do rio Preto, antes da confluência com o rio Grande. Este ponto de monitoramento está situado num rio de menor porte em comparação com o rio Grande e o São Francisco, aumentando as condições de escoamento a serem verificadas no estudo.

Figura 12 – Área de Estudo – Mapa de Localização - Estações Fluviométricas



5 METODOLOGIA

5.1 Caracterização da Dinâmica Fluvial da área de estudo

Para a caracterização da dinâmica fluvial da área de estudo foram utilizados dados secundários provenientes do HIDROWEB - Sistema Online de Informações Hidrológicas, da ANA, onde foi possível coletar informações de vazões médias diárias e resumos de descarga das estações selecionadas para o estudo.

Para essa caracterização foram investigadas a sazonalidade natural do rio, a granulometria média presente nas seções de estudo, assim como a velocidade crítica média nas estações fluviométricas.

5.1.1 Sazonalidade (Período de Seca e Cheia)

Os dados de vazão coletados no HIDROWEB possibilitaram a construção de um Hidrograma Médio Mensal, permitindo a definição dos períodos de seca e cheia da área de estudo e servindo de guia para definição das épocas apropriadas para realização das campanhas de medição de vazão e coleta de sedimento de fundo.

Para cada estação do estudo foram obtidos os dados de vazão referentes ao período de 2003 a 2012, constituindo os últimos dez anos de registros.

A partir de 2007, os dados disponíveis no HIDROWEB possuem status “Bruto”, indicando que os mesmos não passaram por processos de consistência.

O valor médio de vazão, para cada mês da série de dados, foi comparado com o valor médio do referido mês, calculado para todo o período de 10 anos, com a intenção de verificar a qualidade dos dados.

Para os meses que apresentaram falhas, o valor de vazão média mensal foi estimado por correlação entre os postos, em procedimento de regressão simples, conforme definido em Tucci (2002).

5.1.2 Condições médias do escoamento (Seca e Cheia da Bacia)

Com a definição dos períodos de seca e cheia do rio, as séries históricas de medições de vazão das estações do estudo foram separadas em dois grupos. Obtendo-se os valores médios de (Vazão, Velocidade Média, Área, Largura do rio e Profundidade Média), representativos do período de seca e de cheia da bacia, para cada estação do estudo.

Para definição do valor médio da velocidade de escoamento da água, junto ao leito do rio, referentes ao período seco e de cheia da bacia foram utilizados os dados da série histórica das medições de vazão do período de 2003 a 2012. Para isto, foram considerados os valores pontuais de velocidade obtidos durante as medições de vazão de cada grupo (seca e cheia), na posição referente a 80% da profundidade.

Para cada uma das medições de vazão, dos grupos de seca e cheia da bacia, foram considerados os valores pontuais de velocidade obtidos na região próxima ao fundo, ($V_{80\%}$), permitindo a determinação do valor médio para a seção transversal, ($\bar{V}_{80\%}$).

5.1.3 Caracterização Granulométrica Média

Para as estações fluviométricas de Bom Jesus da Lapa, Gameleira, Morpará e Boqueirão, onde, além do registro de variação de nível e realização de medições de vazão, também se realiza, no âmbito da operação da Rede Básica CPRM/ANA, a coleta de sedimento de fundo, foram observados os registros de granulometria existentes no período de 2003 a 2012.

A série histórica de dados granulométricos foi analisada de forma similar aos dados de vazão. Os registros foram separados em dois grupos, compostos pelas Curvas Granulométricas de sedimento de fundo, referentes às amostragens realizadas no trimestre mais seco e no trimestre de cheia na bacia.

Com base nas curvas granulométricas selecionadas foram obtidos, em termos médios, os percentuais de material classificado como: argila, silte, areia e pedregulho e definidos os valores dos diâmetros $D_{(0,06)}$, $D_{(10)}$, $D_{(15,9)}$, $D_{(35)}$, $D_{(50)}$, $D_{(65)}$, $D_{(84)}$, $D_{(90)}$, característicos dos períodos de seca e cheia da bacia.

5.1.4 Velocidade Crítica Média

O valor da Velocidade Crítica Média (\bar{U}_{Cr}) para os períodos de seca e cheia da bacia foi obtido com base nas Equação 3 e Equação 4. Foram utilizadas as curvas granulométricas do período de 2003 a 2012, onde cada curva deu origem a um valor individual de U_{Cr} .

Os valores individuais de U_{Cr} foram separados com base na data de realização da coleta de sedimento, dando origem a dois grupos, um referente ao período de seca e outro ao período de cheia do rio. Para cada conjunto foi definido um valor de \bar{U}_{Cr} , juntamente com seu desvio padrão.

Para verificação da existência de condição mínima para o início do transporte de sedimento de fundo, os valores de \bar{U}_{Cr} foram comparados com o valor da velocidade média de escoamento da água na posição referente a 80% da profundidade $\bar{V}_{80\%}$, pois constitui a faixa do perfil com bastante proximidade do local efetivo de ocorrência do transporte de sedimento de fundo. Esta condição, teoricamente, ocorre sempre que o valor da velocidade de escoamento da água supera o valor de \bar{U}_{Cr} .

Dessa forma, foi realizada também para avaliação da relação ($\bar{V}_{80\%}/\bar{U}_{Cr}$) como critério para observação dos períodos favoráveis a ocorrência do EFM, uma vez que o transporte de material sólido junto ao leito dos rios é fator determinante para existência do Efeito de Fundo Móvel em medições de vazão com Perfiladores Doppler.

5.2 Verificação do Efeito de Fundo Móvel

5.2.1 Campanhas de Medição de Vazão

Após a definição dos períodos de seca e cheia foram realizadas campanhas de medição de vazão com a intenção de quantificar a ocorrência do Efeito de Fundo Móvel para as diferentes condições de escoamento na bacia.

Foram realizadas três campanhas de medições de vazão, conforme apresentado na Tabela 2.

A primeira campanha de medição de vazão foi realizada entre os meses de janeiro e fevereiro de 2012, período de cheias da bacia do rio São Francisco.

A segunda campanha se desenvolveu no mês de outubro de 2012, final do período seco da bacia.

A terceira campanha foi desenvolvida novamente no período de cheias da bacia, entre os meses de janeiro e fevereiro de 2013.

Tabela 2 – Medições de vazão – Período de realização das campanhas

Campanha	Código	Nome	Data	Cota (cm)
1	45480000	Bom Jesus da Lapa	24/01/2012	695
	46035000	Gameleira	25/01/2012	716
	46105000	Paratinga	26/01/2012	694
	46150000	Ibotirama	27/01/2012	702
	46360000	Morpará	30/01/2012	786
	46902000	Boqueirão	03/02/2012	203
	46870000	Fazenda Porto Limpo	02/02/2012	138
2	45480000	Bom Jesus da Lapa	28/10/2012	164
	46035000	Gameleira	23/10/2012	163
	46105000	Paratinga	24/10/2012	158
	46150000	Ibotirama	25/10/2012	189
	46360000	Morpará	26/10/2012	286
	46902000	Boqueirão	30/10/2012	52
	46870000	Fazenda Porto Limpo	30/10/2012	70
3	45480000	Bom Jesus da Lapa	23/01/2013	314
	46035000	Gameleira	05/02/2013	482
	46105000	Paratinga	04/02/2013	450
	46150000	Ibotirama	04/02/2013	454
	46360000	Morpará	06/02/2013	454
	46902000	Boqueirão	01/02/2013	205
	46870000	Fazenda Porto Limpo	31/01/2013	179

Em cada campanha foram desenvolvidas medições convencionais, com uso de Molinete e com ADP M9 GPS, que não sofrem interferência da ocorrência do EFM. Estas medições foram comparadas às realizadas com ADP BT, nas estações de 1 a 7, permitindo quantificar de forma direta a influência do EFM na determinação da vazão total em cada estação de monitoramento.

Em cada estação, as medições de vazão (convencionais e acústicas) foram realizadas sempre no mesmo dia e na mesma seção de medição, com exceção da

estação de Gameleira, onde, a medição acústica foi realizada em seção transversal próxima ao cais, cerca de 400 metros a montante da seção de medição convencional, por representar maior segurança para a realização das travessias, e na estação de Boqueirão, com medição acústica da primeira campanha realizada em seção situada cerca de 300 metros à jusante da seção normal, pois apresentava margem com área sem vegetação de grande porte, ideal para instalação do Sistema RTK, para correção de coordenadas.

As atividades foram iniciadas com a realização da medição convencional. Ao término desta etapa, foram realizadas as medições acústicas com referência BT e GPS, acontecendo de forma simultânea, ou seja, o ADP M9 permite, para cada travessia, obter os resultados da medição para os dois referenciais, uma vez que a aquisição dos dados ocorre ao mesmo tempo.

As medições de vazão convencionais foram obtidas através do método simplificado, com tomada de velocidade de escoamento da água somente em dois pontos em cada vertical de amostragem: um a 20% da profundidade total e outro a 80%.

Para profundidades inferiores a 0,60 m, a velocidade foi medida num ponto único, situado a 60% da profundidade.

Foi utilizado um molinete hidrométrico de concha, de eixo vertical, fabricante Gurley, com lastro de 30 kg e guincho hidrométrico, instalados em embarcação alugada para realização das medições no rio São Francisco e em barco tipo chata para as medições do rio Grande e Preto.

O posicionamento das verticais foi definido utilizando-se cabo de aço graduado na estação Fazenda Porto Limpo e nas demais estações, por possuírem largura superior a 200 m, foi utilizado Estação Total FOIF para medição da distância.

As Figuras 13 e 14 apresentam a determinação da posição da embarcação na estação Boqueirão, com uso da Estação Total.

Figura 13 – Visão Barco Ancorado



Figura 14 – Visão na Estação Total



Para a realização das medições de vazão acústicas foi utilizado o equipamento ADP M9 de fabricação da SONTEK, com Sistema de GPS Geodésico acoplado ao perfilador, com suporte em aço inox para instalação em barco de alumínio tipo chata, com motor de popa de 15 hp, conforme Figuras 15 e 16.

Figura 15 – Montagem suporte ADP M9



Figura 16 – Utilização ADP M9



Além dos equipamentos instalados na embarcação, durante as medições acústicas foi utilizado GPS Geodésico, com Sistema RTK – “*Real Time Kinematic*”, instalado na margem dos rios, para transmissão de correção de coordenadas em tempo real, e correção das coordenadas obtidas com o GPS da embarcação, procedendo com a determinação da velocidade de deslocamento do barco durante as travessias.

A Figura 17 apresenta o GPS com RTK instalado sobre tripé de alumínio na margem direita do rio São Francisco, na estação Ibotirama, durante a segunda campanha de medição de vazão.

Figura 17 – Medição de Vazão – Instalação da Base RTK



Cada medição acústica foi constituída por um conjunto de pelo menos cinco travessias ao longo da seção transversal do rio. O valor da vazão foi determinado com base na média dos resultados obtidos em cada travessia.

Para visualização em tempo real das travessias foi utilizado software “River Surveyor Live” SONTEK (2010), realizando a comunicação do ADP M9 com o notebook. Durante a realização das medições foi possível proceder com a observação dos traçados das travessias em cada seção transversal, da batimetria, bem como das velocidades de escoamento da água e da velocidade do barco.

As medições convencionais, que se constituem procedimento consolidado na operação das estações de monitoramento fluviométrico, serviram de parâmetro de comparação e as grandezas obtidas nas medições (Largura, Profundidade média, Área, Velocidade Média e Vazão) puderam ser comparadas de forma direta, a partir da diferença observada entre as medições realizadas com ADP e Medição Convencional.

5.2.2 Comparação dos Métodos de Medição de Vazão

Com a realização das campanhas de medição de vazão foram definidos três conjuntos de dados, Molinete, ADP GPS e ADP BT, com um total de vinte e uma medições para cada método.

Complementando a análise dos resultados, os dados de vazão passaram pelo procedimento estatístico de comparação entre duas amostras: Teste t de Student para dados pareados.

O Teste t de Student utiliza uma distribuição de probabilidades semelhante à Distribuição Normal, porém é mais adequada para amostras pequenas, com número de elementos $n < 30$ (ZIMMERMANN, 2004 e NAGHETTINI & PINTO, 2007).

Com relação às medições de vazão com Perfiladores Acústicos, o trabalho realizado por Oberg e Muller (2007), que visa validar medições realizadas com Perfiladores Doppler, em comparação com medições convencionais e o trabalho de Petrie *et al.* (2013), que avalia o resultado de medições estacionárias com ADP, fazem uso do Teste t de Student para dados pareados.

Nesta pesquisa foi utilizado o Teste t para dados pareados, uma vez que existe dependência entre os dados, pois as medições são realizadas num mesmo local (estação), por três diferentes métodos, em cada campanha.

Nesse teste estatístico, a análise é realizada par a par, constituída de medições realizadas por dois tipos de referências distintas. As variáveis obtidas (vazão, área, largura, profundidade média e velocidade média) foram comparadas, na tentativa de verificar que, independente do método de medição, seus valores são estatisticamente semelhantes, para um determinado nível de confiança.

Para cada par formado por dois diferentes métodos de medição e para cada variável obtida nas medições foi aplicado o teste t de Student.

Primeiro, para cada conjunto formado por um par de medições realizadas com referencial distinto: (i) Molinete x ADP GPS, (ii) Molinete x ADP BT e (iii) ADP GPS x ADP BT, foi calculada a diferença para a variável a ser analisada. A Hipótese Nula do teste consistiu em confirmar que a Diferença Média entre dois grupos de medições é zero, para cada uma das variáveis obtidas nas medições. A Hipótese alternativa (H_1) é a negação da Hipótese nula (H_0), ou seja, indica que as medições não apresentam resultados semelhantes para a variável analisada.

A estatística do teste é definida pela Equação 6, sendo dependente da diferença média e do desvio padrão das diferenças, bem como do número de medições realizadas:

$$t = \frac{\bar{D} \times \sqrt{n}}{S_D}$$

Equação 6

Onde:

\bar{D} – Média das diferenças;

n – número de medições;

S_D – Desvio padrão das diferenças

Após definir os dados amostrais (\bar{D} e S_D) e calcular o valor da estatística t, foi obtida a probabilidade de significância, ou p valor, a partir da tabela da distribuição t de Student. Na utilização dessa tabela foi considerado o grau de liberdade, calculado como (n-1) e o nível de significância $\alpha = 5\%$, sendo que o p valor obtido deve ser dobrado, pois se trata de um teste bilateral, ou seja, a Hipótese Alternativa (H_1) é do tipo \neq , pois corresponderá às duas caudas da distribuição estatística.

Sempre que o valor final obtido para p for maior que o valor de $\alpha = 5\%$ (ou 0,05) indica que não há indícios que permitam descartar a Hipótese nula, ou seja, não há evidências que permita indicar diferenças entre os métodos de medição.

Neste trabalho foi realizada uma série de testes de igualdade, considerando as medições conforme condições listadas a seguir:

- (i) Todas as medições;
- (ii) Medições do rio São Francisco;
- (iii) Medições do rio Preto e rio Grande;
- (iv) Medições das campanhas 01 e 03 (período de cheia da bacia);
- (v) Medições da campanha 02 (período seco da bacia);

A realização da análise estatística teve por objetivo verificar se o conjunto de medições ADP BT apresentou resultado incompatível aos demais métodos de medição. Esta condição implicaria na possibilidade de ocorrência do EFM, afetando o resultado das medições ADP BT.

5.2.3 Caracterização Granulométrica – Campanhas de Medição

Para complementar a análise dos resultados e avaliar a possibilidade de existência do EFM foram realizadas coletas de sedimento de fundo, para determinação da caracterização granulométrica nas estações 1 – Bom Jesus da Lapa, 2 – Gameleira, 5 – Morpará, no rio São Francisco e na estação 6 – Boqueirão, no rio Grande.

Em cada uma das estações, nas três campanhas de medição, a coleta do material de fundo foi realizada num total de cinco verticais, seguindo a metodologia IID – Igual Incremento de Descarga, utilizada para coleta de sedimento em suspensão, nos pontos referentes à 10, 30, 50, 70 e 90% da descarga líquida medida na estação no dia da coleta.

As amostras coletadas em cada uma das estações foram misturadas dando origem a uma amostra composta, representativa da granulometria média da seção transversal, no momento das medições de vazão.

Todas as coletas de material de fundo foram realizadas com Amostrador do tipo Draga Petersen.

Nas campanhas 2 e 3 foi realizada uma segunda amostragem, com coleta de material de fundo nas mesmas cinco verticais, porém a análise granulométrica foi realizada de forma individual, gerando valores pontuais, representativos da granulometria da vertical amostrada.

Esses resultados foram comparados com a amostragem composta da seção transversal, com a finalidade de verificar a variação do transporte de sedimentos ao longo de cada seção transversal do estudo.

As análises Granulométricas do material de fundo coletado nas campanhas de medição foram realizadas no Laboratório de Sedimentometria e Qualidade da Água, da CPRM, na Unidade Regional de Belo Horizonte – MG.

5.2.4 Velocidade Crítica

Com o resultado da análise granulométrica do material de fundo, coletado no momento de execução das campanhas de medição de vazão, foram definidos valores de U_{Cr} , representativos da seção transversal, em cada estação de monitoramento sedimentométrico, referentes as campanhas de medição.

Os valores de U_{Cr} verificados durante as campanhas de campo foram comparados com os valores de (\bar{U}_{Cr}) , determinados no item 5.1. Caracterização da Dinâmica Fluvial da área de estudo.

Os valores de U_{Cr} , determinados com os dados coletados em campo, também foram comparados com os valores de V_m e $\bar{V}_{80\%}$ das respectivas medições de vazão realizadas em cada estação.

Para as campanhas 2 e 3, também foi realizada coleta de sedimento de fundo, com determinação da curva granulométrica em cada uma das cinco verticais de amostragem de sedimentos. Nesta etapa do trabalho foram determinados valores de U_{Cr} pontuais, que foram comparados entre si e com o resultado obtido para a seção transversal na mesma medição, para verificar como o transporte de sedimentos se desenvolve ao longo da seção transversal.

5.2.5 Descarga de fundo

Com as informações da granulometria foi realizado o cálculo da descarga de fundo, por meio de estimativa indireta, utilizando o método de Yang (1983). O procedimento é definido pela Equação 7, apresentada a seguir, permitindo determinar o valor da concentração total do material do leito (CT) em (mg/L):

$$\log CT = 5,435 - 0,286 \times \log \left(\frac{W \times D_{50}}{v} \right) - 0,457 \times \log \left(\frac{U^*}{W} \right) + \\ \left[1,799 - 0,409 \times \log \left(\frac{W \times D_{50}}{v} \right) - 0,314 \times \log \left(\frac{U^*}{W} \right) \right] \times \log \left(\frac{V \times S}{W} - \frac{U_{cr} \times S}{W} \right)$$

Equação 7

Onde:

W = Velocidade de queda das partículas (m/s); obtida pela Equação 8, em função do tamanho de D_{50} ;

$$W = \frac{\left[\frac{2}{3} \times g \times \left(\frac{\gamma_s}{\gamma} - 1 \right) \times D_{50}^3 + 36v^2 \right]^{\frac{1}{2}} - 6v}{D_{50}} \text{ para } D_{50} > 0,1\text{mm}$$

Equação 8

$$W = \frac{1}{18} \times \frac{(s-1) \times g \times D_{50}^2}{v}$$

para $D_{50} < 0,1\text{mm}$

Equação 9

U^* = Velocidade de Cisalhamento relativa aos grãos (m/s);

$$U^* = \sqrt{(9,81 * Rh * S)}$$

Equação 10

D_{50} = Diâmetro médio das partículas (m);

ν = Viscosidade Cinemática da Água (m²/s);

V = Velocidade Média do Escoamento (m/s);

U_{cr} = Velocidade Crítica (m/s)

R_h = Raio Hidráulico (m)

S = Gradiente de energia (m/m).

O valor do gradiente de energia pode ser obtido em campo, em função da variação do nível e da velocidade de escoamento da água entre duas seções consecutivas do rio.

Na falta da determinação de S no campo, foi utilizada a estimativa com base na formulação de Manning, conforme Equação 11, chegando a um valor aproximado do parâmetro.

$$S = \left(\frac{Q.n}{A.\sqrt[3]{Rh^2}} \right)^2 \quad \text{onde } n = 0,039 D_{50}^{1/6}$$

Equação 11

O valor da Descarga Sólida de Arraste, em (t/dia) (Q_{SF}), pode ser obtido conforme apresentado na Equação 12.

$$Q_{SF} = 0,0864 . Q . CT$$

Equação 12

Os valores de Q_{SF} foram comparados com os resultados das medições de vazão, $V_{\text{água}}$, $\bar{V}_{80\%}$ e U_{Cr} , na tentativa de identificar a intensidade do transporte de sedimentos que proporciona EFM significativo, a ponto de afetar o resultado das medições ADP BT.

5.3 Correção do Efeito de Fundo Móvel

Após comparação dos valores obtidos por cada um dos métodos de medição de vazão utilizados no trabalho, bem como da observação dos resultados de velocidade crítica e de descarga de fundo em cada campanha, foram selecionadas as medições ADP BT, possivelmente afetadas pelo EFM.

As medições selecionadas foram submetidas aos processos de correção do EFM, adotando técnicas apresentadas por Oberg (2003), testadas por Gamaro (2003a) e revisadas por Itaipu (2009), conforme procedimentos descritos a seguir.

A aplicação dos diferentes métodos de correção teve por objetivo identificar o procedimento com melhores resultados de vazão corrigida, bem como indicar as limitações e vantagens de utilização de cada um dos métodos.

5.3.1 Método da Subseção - SS

O método da Subseção consiste em realizar a correção da vazão medida, com base na Velocidade do Fundo Móvel (VFM).

A VFM é determinada a partir de uma medição estática, ou seja, o barco fica ancorado, onde o ADP BT perfila a velocidade de escoamento da água por um tempo mínimo de cinco minutos.

Esse processo deve ser realizado num local de maior velocidade de escoamento da água, verificado no resultado da medição de vazão feita com o ADP, considerando que neste ponto o valor da VFM seja o maior da seção transversal.

Como o barco está ancorado, o deslocamento apresentado pela variável DMG (que representaria a distância em linha reta, percorrida pela embarcação entre o ponto inicial e final do perfilamento) deverá ser próximo de zero. São comuns valores inferiores a 1 metro, uma vez que a embarcação ancorada acaba se deslocando lateralmente em função da correnteza do rio e dos ventos.

Quando há ocorrência do fundo móvel, o ADP detecta valores elevados de DMG, que não estarão representando o deslocamento do barco, já que o mesmo está ancorado e sim o deslocamento da camada de sedimentos transportada junto ao leito do rio.

A Velocidade do Fundo Móvel é determinada pela relação:

$$VFM = \frac{DMG}{t}$$

Equação 13

Onde:

VFM – Velocidade do Fundo Móvel (m/s);

DMG – Deslocamento do barco em relação ao fundo (em linha reta) (m);

t – Duração da medição (s).

A correção da vazão obtida com o ADP BT deve ser realizada com base na Equação 14, a seguir:

$$Q_{\text{corrigida}} = Q_{\text{medida}} \times \frac{(V_{\text{media}} + VFM)}{V_{\text{media}}}$$

Equação 14

Onde:

$Q_{\text{corrigida}}$ = Valor corrigido da Vazão ADP BT, (m³/s);

Q_{medida} = Valor de vazão medido com ADP BT (m³/s);

$V_{\text{média}}$ = Velocidade média da água, referente ao valor de Q_{medida} (m/s);

VFM = Velocidade do fundo móvel, (m/s).

5.3.2 Método da Sub - Seção Média - SSM

Consiste de uma variação do método anterior, pois não leva em consideração apenas o valor máximo para a velocidade de fundo obtido no teste de detecção.

No método das Sub-Seções são determinados diversos valores para a velocidade do fundo móvel (ao longo da seção transversal do rio) e o valor médio destas velocidades é utilizado para a correção da vazão medida, conforme apresentado na Equação 15, a seguir:

$$Q_{\text{corrigida}} = Q_{\text{medida}} + (\overline{VFM} \times A)$$

Equação 15

Onde:

$Q_{\text{corrigida}}$ = Valor de vazão ADP (“Bottom Tracking”), após a correção do efeito do fundo móvel (m³/s);

Q_{medida} = Valor de vazão medido com ADP (“Bottom Tracking”) (m³/s);

VFM = Velocidade média do fundo móvel, determinada ao longo da seção transversal do rio (m/s).

A = Área da seção transversal (m²).

Neste trabalho foram realizadas cinco tomadas de velocidade do fundo móvel, ao longo da seção transversal, com pontos coincidindo com as verticais de amostragem de sedimentos de fundo para caracterização granulométrica.

5.3.3 Método de Seção por Seção - SPS

O método equivale ao procedimento de medição apresentado nas medições convencionais (com molinete), tendo como diferença básica o fato da velocidade da água em cada vertical da medição ser obtida com o perfilador acústico.

Com o barco ancorado, a velocidade média de escoamento da água na vertical é obtida juntamente com as distâncias entre as verticais que devem ser medidas no momento da tomada de velocidade (seja com uso do cabo de aço graduado ou com outro equipamento para medição de distância), a profundidade será a média das obtidas em cada vertical durante o tempo de amostragem.

Dessa forma, em cada vertical é determinado o valor da velocidade média da água, profundidade do rio e largura, permitindo o cálculo da vazão de forma semelhante ao método convencional. Neste procedimento foram utilizadas as mesmas cinco verticais relatadas no item 5.3.2.

5.3.4 Método do Loop

O método do Loop é desenvolvido com a realização de uma travessia que deve descrever um oito ao longo da seção transversal. A intenção é iniciar e terminar a travessia no mesmo ponto, que deve ser materializado para facilitar o procedimento, com a variável DMG apresentando valor nulo.

Uma vez que o final da travessia se dá no mesmo ponto de início, qualquer diferença significativa de posicionamento verificado será decorrência do efeito do fundo móvel.

A VFM (Velocidade do Fundo Móvel) é o resultado da divisão da distância entre o ponto inicial e final da travessia (DMG), pelo tempo total do Loop.

Desta forma a vazão é corrigida com base no produto da área da seção transversal pela VFM, somando o valor da vazão medida com o ADP BT, conforme apresentado na Equação 16.

$$Q_{\text{corrigida}} = Q_{\text{medida}} + (VFM \times A)$$

Equação 16

$Q_{\text{corrigida}}$ = Valor de vazão ADP (“Bottom Tracking”), após a correção do efeito do fundo móvel (m^3/s);

Q_{medida} = Valor de vazão medido com ADP (“Bottom Tracking”) (m^3/s);

VFM = Velocidade média do fundo móvel, determinada no Loop (m/s).

A = Área da seção transversal (m^2).

5.3.5 Teste Estatístico de Igualdade – Vazões ADP BT Corrigidas

Após correção das vazões obtidas com ADP BT, pelos métodos indicados no item 5.3, foi aplicado o Teste Estatístico de Igualdade entre cada conjunto de medições corrigidas, em comparação com as medições de Molinete. Ou seja, as medições de vazão ADP BT corrigidas pelos métodos SS, SSM, SPS e Loop foram analisadas para verificar se os métodos de correção apresentaram resultados satisfatórios.

O Teste Estatístico de Igualdade das vazões corrigidas segue procedimento apresentado no item 5.2.2.

5.4 Condições de escoamento favoráveis à ocorrência de EFM

Com a utilização dos resultados obtidos até esta etapa do trabalho foi realizada a avaliação das condições de escoamento (vazão, velocidade da água, velocidade da água junto ao leito, velocidade crítica e descarga sólida de fundo) que proporcionam EFM significativo nas medições de vazão realizadas com ADP BT.

Essas variáveis do escoamento foram comparadas com os valores de diferenças verificadas entre as medições de vazão realizadas com Molinete e ADP BT, uma vez que esta grandeza representa de forma direta a intensidade do EFM afetando a determinação da vazão.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 Caracterização da Dinâmica Fluvial da área de estudo

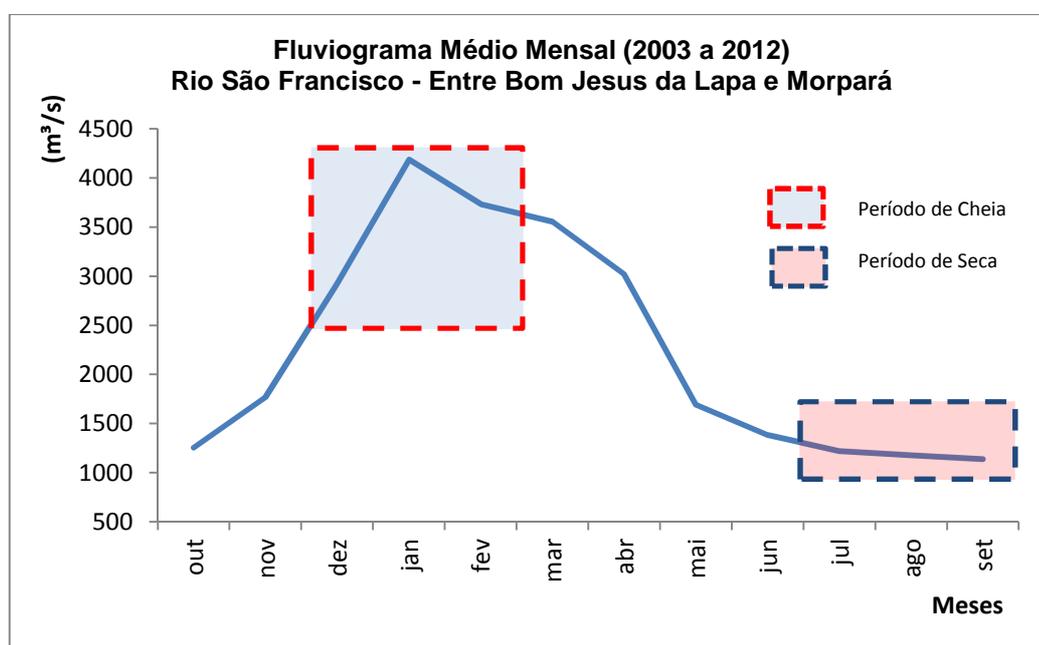
6.1.1 Sazonalidade (Período de Seca e Cheia)

Os dados hidrológicos coletados no HIDROWEB permitiram representação da variação das vazões médias mensais ao longo de um ano para os rios São Francisco, Grande e Preto.

A Figura 18 apresenta o fluviograma médio mensal do rio São Francisco, no trecho entre as estações de Bom Jesus da Lapa e Morpará. Nessa figura pode ser verificado o período de cheias compreendido entre os meses de janeiro e março, com vazões médias mensais oscilando de 2.500 a 4.200 m³/s.

Já entre os meses de julho a setembro está compreendido o período seco da bacia, com vazões médias mensais apresentando valor no intervalo de 1.200 a 1.600 m³/s.

Figura 18 – Fluviograma Médio Mensal – Rio São Francisco



As Figura 19 e Figura 20 apresentam os fluviogramas médios mensais para os rios Grande e Preto, construídos com base na última estação de monitoramento de cada rio.

O comportamento hidrológico dos afluentes do rio São Francisco se apresenta de forma similar ao verificado no rio principal.

O período de maiores vazões é definido pelo intervalo de meses compreendido entre janeiro e março e os meses mais secos da bacia são definidos pelo intervalo de julho a setembro.

No rio Grande as máximas vazões médias mensais oscilam de 250 a 350 m³/s, enquanto no rio Preto os valores variam de 100 a 140 m³/s. As vazões mínimas para o rio Grande e Preto são da ordem de 200 e 60 m³/s, respectivamente.

Figura 19 – Fluviograma Médio Mensal – Rio Grande

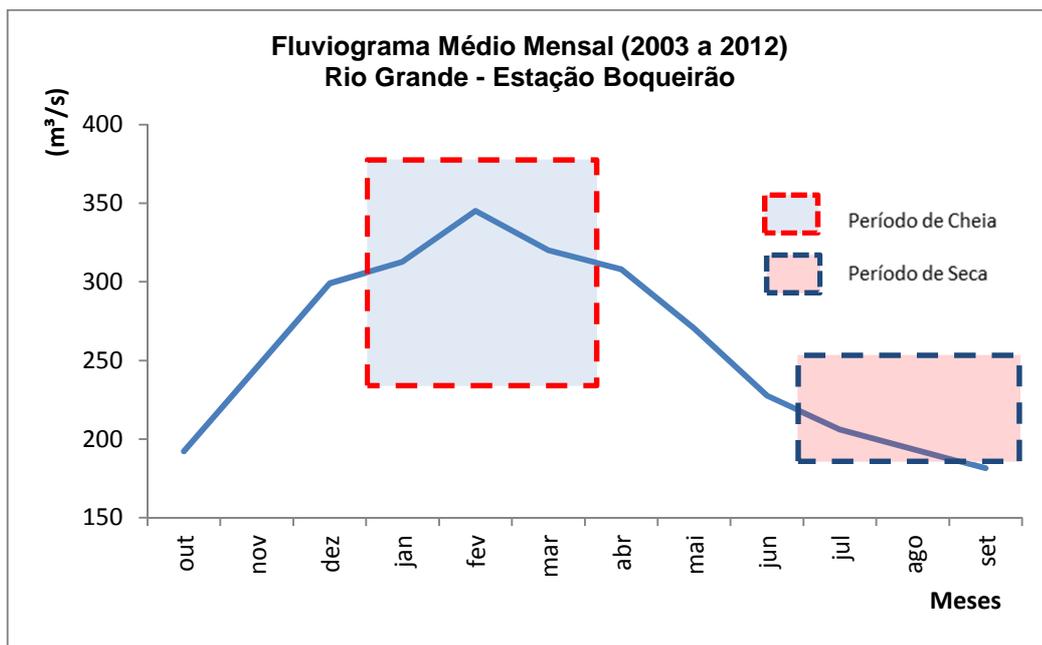
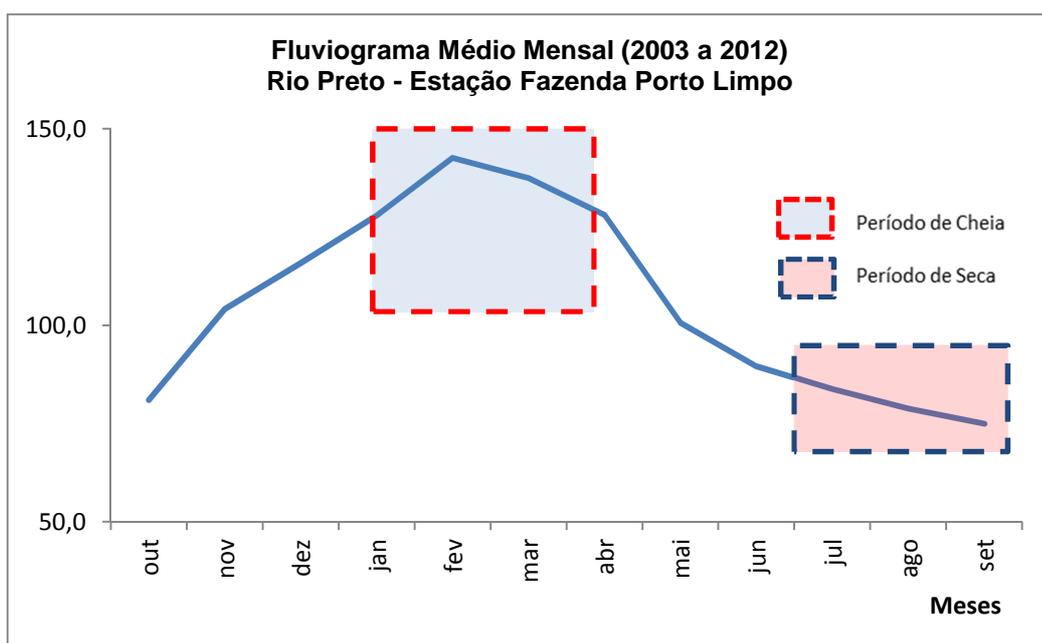


Figura 20 – Fluviograma Médio Mensal – Rio Preto



6.1.2 Parâmetros médios do escoamento (Seca e Cheia da Bacia)

A análise dos fluviogramas médios mensais dos rios São Francisco, Grande e Preto permitiu obter os parâmetros hidráulicos médios, característicos das seções de medição de vazão, para os períodos de seca e cheia da bacia.

As séries históricas de medição de vazão (2003 a 2012), de cada estação, foram divididas em dois conjuntos: o primeiro, característico do período de cheia da bacia, composto por todas as medições de vazão realizadas no período compreendido entre os meses de janeiro a março; e o segundo, característico do período seco, referente as medições realizadas entre os meses de julho a setembro.

A Tabela 3, apresenta as características médias do escoamento para cada estação de medição, nos períodos de seca e cheia da bacia.

Tabela 3 – Seções de Medição – Características médias do escoamento

Período	Nome	Cota (cm)	Vazão (m³/s)	Área (m²)	Largura (m)	V (m/s)	V _{80%} (m/s)	P (m)
Cheia	Bom Jesus da Lapa	459	3905	3894	741,8	1,003	0,768	5,2
	Gameleira	483	4186	3801	536,5	1,102	0,706	7,1
	Paratinga	405	3992	3107	633,8	1,284	0,775	4,9
	Ibotirama	492	4139	3724	586,6	1,114	0,773	6,3
	Morpará	564	3956	3968	805,8	1,001	0,720	4,9
	Boqueirão	137	258	372	151,1	0,712	0,509	2,5
	Fazenda Porto Limpo	123	107	175	62,0	0,626	0,427	2,8
Seca	Bom Jesus da Lapa	168	1107	1492	526,6	0,742	0,292	2,8
	Gameleira	172	1323	2079	468,7	0,636	0,236	4,4
	Paratinga	165	1153	1476	619,3	0,781	0,300	2,4
	Ibotirama	224	1426	2261	529,4	0,631	0,254	4,3
	Morpará	299	1332	1892	788,4	0,704	0,295	2,4
	Boqueirão	54	165	238	134,5	0,693	0,293	1,8
	Fazenda Porto Limpo	75	70	137	62,2	0,511	0,236	2,2

Para o rio São Francisco, as medições referentes ao período de cheia, apresentaram valores médios de vazão cerca de três vezes maiores que o verificado no período de seca. Com relação à velocidade média de escoamento, verifica-se um acréscimo médio da ordem de 40%, com velocidades em torno de 0,65 m/s no período seco da bacia e 1,0 m/s nos meses de cheia.

No rio Grande e no rio Preto, o período de cheia apresenta um acréscimo de vazão da ordem de 50% com relação ao valor médio dos meses mais secos.

Com relação á velocidade média de escoamento da água, verifica-se na estação Fazenda Porto Limpo uma diferença de 20% entre os dois períodos, enquanto na estação Boqueirão, no rio Grande, não houve variação significativa da velocidade média.

Com relação ao valor da velocidade de escoamento média da água, junto ao leito do rio, $\bar{V}_{80\%}$, para os rios São Francisco, Grande e Preto, no período de cheia, este valor é da ordem de 75% da velocidade média de escoamento dá água. Já para o período de seca o valor de $\bar{V}_{80\%}$ é reduzido para 40% do valor da velocidade média de escoamento.

6.1.3 Caracterização Granulométrica Média

A curva granulométrica média foi construída com a utilização dos dados históricos do período de 2003 a 2012, com o período de seca da bacia representado pelos laudos referentes às amostragens de material de fundo realizadas entre os meses de julho a setembro. Já a curva média do período de cheia utilizou os laudos das amostragens realizadas entre os meses de dezembro e fevereiro.

Os resultados médios estão resumidos na Tabela 4, onde são apresentados os valores para as frações de peneiramento do material de fundo, indicando o percentual retido em cada faixa definida pelos diâmetros característicos.

Tabela 4 – Curvas Granulométricas Médias das estações para o período de seca e de cheia da bacia – Frações de Peneiramento. Fonte: Série Histórica HIDROWEB / ANA

Nome	Período	Cota (cm)	Porcentagem que passa - Pk (%) Pela malha da peneira (mm)								
			15,90	8,00	4,00	2,00	1,00	0,50	0,25	0,12	0,06
Bom Jesus da Lapa	Cheia	363	100,0	99,9	99,8	99,3	97,0	82,6	18,3	1,0	0,1
	Seca	208	100,0	99,6	99,1	98,0	95,3	78,1	31,0	2,7	0,2
Gameleira	Cheia	399	100,0	99,2	97,7	95,0	87,2	59,6	13,7	1,3	0,1
	Seca	192	100,0	98,7	96,6	95,8	91,4	70,9	16,0	4,3	0,2
Morpará	Cheia	471	100,0	97,8	95,9	94,5	91,5	70,9	9,5	0,5	0,1
	Seca	300	100,0	98,7	97,8	96,6	93,9	76,0	13,7	1,2	0,1
Boqueirão	Cheia	167	90,2	84,3	70,0	66,0	64,8	56,4	17,1	1,4	0,1
	Seca	57	100,0	78,0	67,2	63,1	60,2	52,3	7,5	0,8	0,0

Na Tabela 5 pode ser verificada a classificação do tipo de sedimento observado em cada estação, representando os valores médios dos períodos de seca e cheia da bacia.

Tabela 5 – Curvas Granulométricas Médias das estações para o período de seca e de cheia da bacia – Tipo de Sedimento. Fonte: Série Histórica HIDROWEB / ANA

Nome	Período	Cota (cm)	Tipo de Sedimento (%)			
			Argila	Silte	Areia	Pedregulho
Bom Jesus da Lapa	Cheia	363	0,0	0,1	99,1	0,7
	Seca	208	0,0	0,2	97,8	2,0
Gameleira	Cheia	399	0,0	0,1	94,9	5,0
	Seca	192	0,0	0,2	95,6	4,2
Morpará	Cheia	471	0,0	0,1	94,5	5,5
	Seca	300	0,0	0,1	96,5	3,4
Boqueirão	Cheia	167	0,0	0,1	65,9	34,0
	Seca	57	0,0	0,0	63,8	36,2

As Figuras 21, 22 e 23 apresentam graficamente os resultados da Tabela 4, para as estações do rio São Francisco, onde pode ser verificado que não há diferença considerável da composição granulométrica do material de fundo entre as estações, bem como entre os períodos de seca e cheia da bacia.

Figura 21 – Curvas Granulométricas Médias – Estação Bom Jesus da Lapa

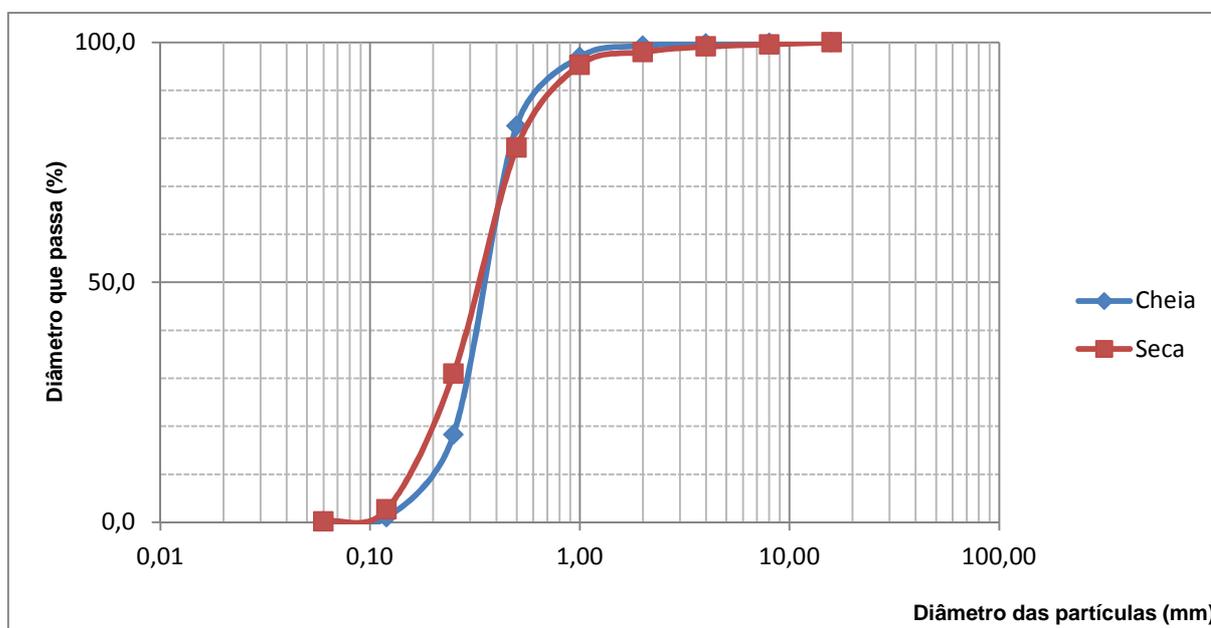


Figura 22 – Curvas Granulométricas Médias – Estação Gameleira

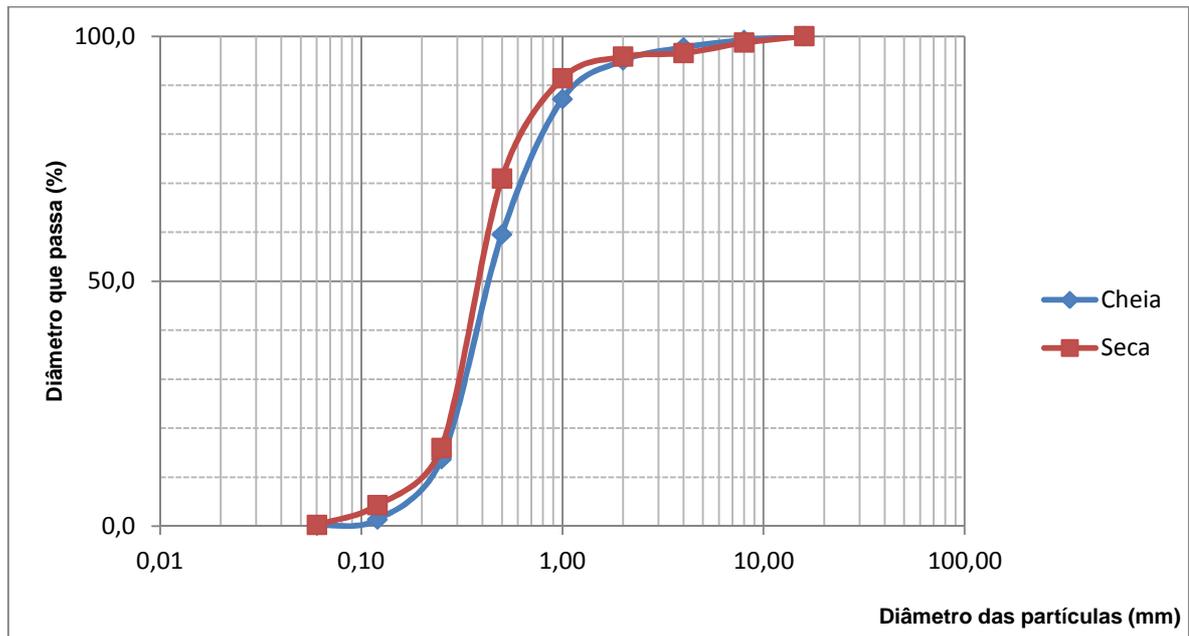
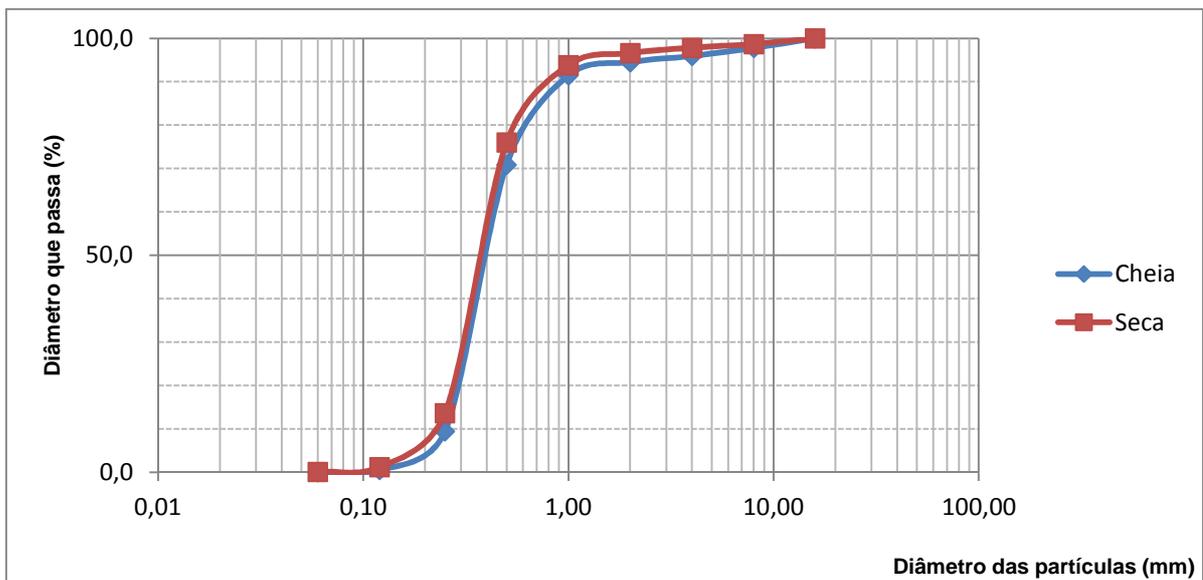


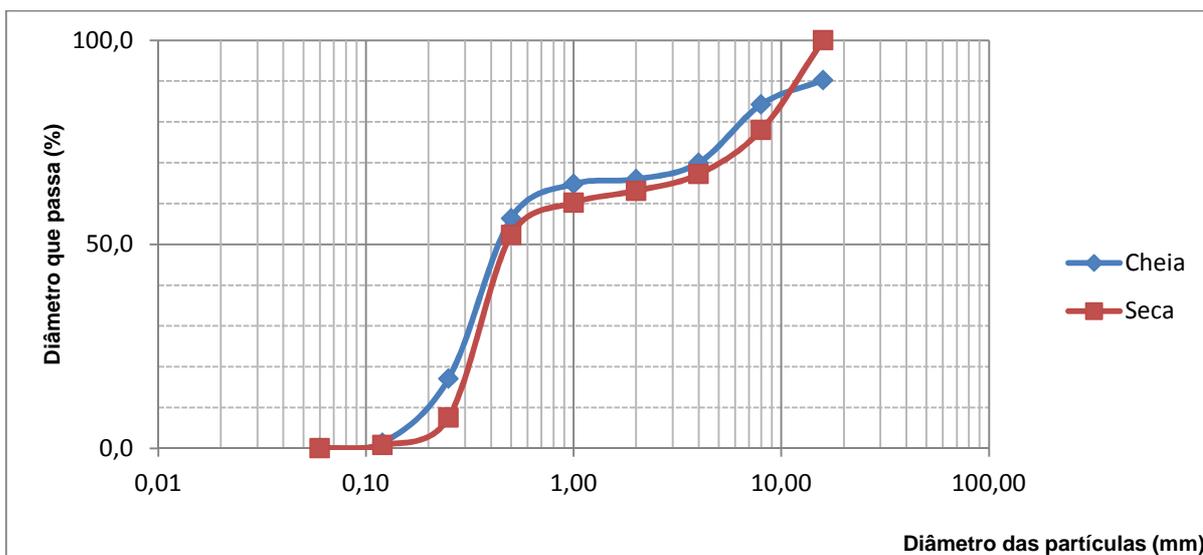
Figura 23 – Curvas Granulométricas Médias – Estação Morpará



As estações apresentam comportamento semelhante, com a maior parcela do material de fundo com diâmetro inferior a 2,0 mm, indicando predominância de areia média na composição granulométrica, com percentual na casa de 90% do material amostrado.

A Figura 24 apresenta as Curvas Granulométricas Médias do período de seca e cheia para a estação Boqueirão, no rio Grande. É possível verificar que o comportamento médio é semelhante para os dois períodos.

Figura 24 – Curvas Granulométricas Médias – Estação Boqueirão



Também pode ser verificado que a composição granulométrica do material de fundo do rio São Francisco é diferente da observada no rio Grande. No primeiro, a maior parte de material é constituída de areia média, com percentual em torno de 90%, enquanto no rio Grande é verificada uma maior distribuição granulométrica, com predominância de areia média, porém com a ocorrência de areia grossa e pedregulho.

6.1.4 Velocidade Crítica Média

O cálculo da Velocidade Crítica \bar{U}_{Cr} , em termos médios, para as estações de Bom Jesus da Lapa, Gameleira, Morpará e Boqueirão foi feito com base na avaliação da sazonalidade hidrológica da bacia, na definição do período de seca e cheia da região de estudo, bem como na obtenção das características médias do escoamento e da caracterização granulométrica.

Foram definidos os valores de \bar{U}_{Cr} , para cada estação, referentes aos períodos de seca e cheia da bacia, fazendo uso das informações de granulometria e da profundidade de escoamento.

Os valores de \bar{U}_{Cr} estão apresentados na Tabela 6, onde também são listados os valores médios da velocidade de escoamento da água, na região junto ao fundo do rio ($\bar{V}_{80\%}$) e a relação $[\bar{V}_{80\%}/(\bar{U}_{Cr})]$.

Conforme descrito no item 3.1 a velocidade crítica representa o valor mínimo de velocidade a ser superado pela água, para que se dê início ao transporte de sedimento junto ao leito dos rios.

Tabela 6 – Velocidade Crítica Média

Período	Estação	\bar{U}_{Cr} (m/s)	$\bar{V}_{80\%}$ (m/s)	$\bar{V}_{80\%} / \bar{U}_{Cr}$
Cheia	Bom Jesus da Lapa	0,316 ± 0,014	0,762 ± 0,039	2,2 a 2,6
	Gameleira	0,173 ± 0,005	0,701 ± 0,033	3,7 a 4,4
	Morpará	0,162 ± 0,006	0,717 ± 0,025	4,1 a 4,8
	Boqueirão	0,264 ± 0,004	0,503 ± 0,006	1,9 a 2,0
Seca	Bom Jesus da Lapa	0,212 ± 0,003	0,292 ± 0,005	1,3 a 1,4
	Gameleira	0,237 ± 0,015	0,236 ± 0,001	1,1 a 1,2
	Morpará	0,179 ± 0,003	0,295 ± 0,017	1,5 a 1,8
	Boqueirão	0,504 ± 0,012	0,293 ± 0,008	0,5 a 0,6

No período de seca, nas estações do rio São Francisco, a relação $[\bar{V}_{80\%} / (\bar{U}_{Cr})]$ apresenta condição superior à mínima necessária para o início do transporte de sedimentos.

Porém, os valores não se afastam muito da relação unitária. Condição que indica pequena intensidade de movimento das partículas junto ao leito do rio. Nesta condição espera-se que o EFM não seja significativo a ponto de afetar o resultado das medições de vazão realizadas com ADP BT.

A estação Boqueirão, do rio Grande não apresentou condição para transporte de sedimentos na cheia, uma vez que a velocidade da água junto ao fundo não alcança o valor de \bar{U}_{Cr} . No período de cheia os valores de \bar{U}_{Cr} foram superados por $\bar{V}_{80\%}$ em todas as estações.

O menor valor apresentado para a relação, no período de cheia, foi da ordem de duas vezes, na estação Boqueirão.

Nas estações do rio São Francisco, os valores de $\bar{V}_{80\%}$ foram até cerca de cinco vezes superiores aos valores de \bar{U}_{Cr} , na estação de Morpará, indicando a possibilidade de intenso transporte de sedimentos junto ao leito e possível Efeito de Fundo Móvel, fator prejudicial às medições de vazão realizadas com Perfiladores Acústicos e referência BT.

6.2 Análise da ocorrência do Efeito de Fundo Móvel

6.2.1 Campanhas de Medição de Vazão

Foram realizadas três campanhas de medição de vazão. Os resultados obtidos em cada campanha podem ser verificados na Tabela 7, com as medições realizadas para as estações do rio São Francisco e Tabela 8, com as estações do rio Grande e Preto.

Em cada campanha foram realizadas medições de vazão pelos métodos Convencional, ADP GPS e ADP BT, permitindo a comparação direta entre cada um dos métodos de medição.

Tabela 7 – Medições de Vazão – Estações do rio São Francisco

Nome	Data	Campanha	Cota (cm)	Tipo	Q (m³/s)	A (m²)	V (m/s)	L (m)	P (m)
Bom Jesus da Lapa	24/01/2012	01	695	Molinete	6842	6184	1,106	869,30	7,11
				ADP-GPS	6831	5946	1,148	885,90	6,73
				ADP-BT	5995	5970	1,004	897,74	6,65
	28/10/2012	02	164	Molinete	1063	1670	0,636	530,56	3,15
				ADP-GPS	1017	1707	0,596	534,62	3,19
				ADP-BT	1089	1711	0,637	535,71	3,19
	23/01/2013	03	314	Molinete	2549	3045	0,837	840,25	3,62
				ADP-GPS	2459	3032	0,811	830,83	3,65
				ADP-BT	2220	3021	0,735	834,36	3,62
Gameleira	25/01/2012	01	716	Molinete	6602	5819	1,135	748,60	7,72
				ADP-GPS	6462	3852	1,558	361,10	10,67
				ADP-BT	5994	3857	1,676	361,00	10,70
	23/10/2012	02	163	Molinete	1224	2295	0,534	449,99	5,10
				ADP-GPS	1167	2169	0,538	319,53	6,79
				ADP-BT	1172	2164	0,540	319,20	6,78
	05/02/2013	03	482	Molinete	4132	4110	1,005	537,70	7,64
				ADP-GPS	4108	2925	1,404	325,10	9,00
				ADP-BT	3722	2903	1,284	323,06	8,99
Paratinga	26/01/2012	01	694	Molinete	6243	4779	1,306	668,10	7,15
				ADP-GPS	6347	5208	1,219	639,10	8,14
				ADP-BT	5965	5200	1,147	635,10	8,19
	24/10/2012	02	158	Molinete	1126	1666	0,676	618,29	2,69
				ADP-GPS	1230	1767	0,696	621,00	2,84
				ADP-BT	1217	1762	0,681	619,67	2,84
	04/02/2013	03	450	Molinete	3970	3311	1,199	642,80	5,15
				ADP-GPS	3916	3475	1,127	636,18	5,46
				ADP-BT	3582	3470	1,033	635,51	5,46

Tabela 7 - Continua

Nome	Data	Campanha	Cota (cm)	Tipo	Q (m³/s)	A (m²)	V (m/s)	L (m)	P (m)
Ibotirama	27/01/2012	01	702	Molinete	6391	4846	1,319	613,60	7,90
				ADP-GPS	6318	4752	1,330	612,70	7,75
				ADP-BT	5945	4748	1,252	611,80	7,76
	25/10/2012	02	189	Molinete	1205	1955	0,616	545,90	3,58
				ADP-GPS	1201	2168	0,554	500,19	4,33
				ADP-BT	1187	2185	0,544	503,49	4,34
	04/02/2013	03	454	Molinete	3707	3472	1,068	573,30	6,06
				ADP-GPS	3710	3445	1,077	571,20	6,03
				ADP-BT	3425	3440	0,996	566,69	6,07
Morpará	30/01/2012	01	786	Molinete	5822	5737	1,015	840,40	6,83
				ADP-GPS	5846	5843	1,001	836,80	6,98
				ADP-BT	5422	5810	0,933	832,10	6,61
	26/10/2012	02	286	Molinete	1161	1754	0,662	779,90	2,25
				ADP-GPS	1109	1745	0,636	754,09	2,31
				ADP-BT	1162	1781	0,664	756,87	2,35
	06/02/2013	03	454	Molinete	3887	3859	1,007	790,32	4,88
				ADP-GPS	3878	3847	1,008	787,32	4,89
				ADP-BT	3528	3842	0,918	785,46	4,89

Tabela 7 - Conclusão

Tabela 8 – Medições de Vazão – Estações do rio Grande e Preto

Nome	Data	Campanha	Cota (cm)	Tipo	Q (m³/s)	A (m²)	V (m/s)	L (m)	P (m)
Boqueirão	03/02/2012	01	203	Molinete	325	481	0,675	176,00	2,73
				ADP-GPS	318	420	0,758	141,70	2,97
				ADP-BT	315	420	0,751	141,50	2,97
	30/10/2012	02	52	Molinete	163	241	0,677	134,10	1,80
				ADP-GPS	161	240	0,672	135,83	1,77
				ADP-BT	162	240	0,674	135,71	1,77
	01/02/2013	03	205	Molinete	332	498	0,668	183,70	2,71
				ADP-GPS	335	482	0,695	171,18	2,82
				ADP-BT	331	481	0,689	170,94	2,81
Fazenda Porto Limpo	02/02/2012	01	138	Molinete	110	180	0,613	51,80	3,47
				ADP-GPS	110	174	0,635	52,90	3,28
				ADP-BT	108	173	0,625	52,80	3,28
	30/10/2012	02	70	Molinete	62	149	0,420	51,50	2,89
				ADP-GPS	61	140	0,437	49,19	2,84
				ADP-BT	61	140	0,434	49,60	2,83
	31/01/2013	03	179	Molinete	144	202	0,709	53,80	3,76
				ADP-GPS	145	194	0,749	54,22	3,57
				ADP-BT	143	192	0,744	53,68	3,58

6.2.2 Comparação Métodos de Medição de Vazão

Após realizar as medições de vazão pelos três diferentes métodos, foi feita a análise dos resultados através da comparação direta das variáveis do escoamento.

De acordo com Gaeuman & Jacobson (2007) o resultado da batimetria não é afetado pelo EFM, apenas a velocidade da água e conseqüentemente a vazão.

Para verificar essa afirmação, os valores de área, largura e profundidade obtidos nas medições acústicas foram comparados.

Para as medições acústicas ADP GPS e ADP BT, essas variáveis podem ser comparadas de forma direta, uma vez que a aquisição de dados ocorre de forma simultânea, ou seja, em cada travessia o medidor acústico realiza a medição de vazão com a utilização dos dados do GPS e do BT, gerando duas medições.

Ao realizar a comparação Molinete x ADP GPS ou Molinete x ADP BT podem ser verificados valores mais discrepantes, porém podem ser resultantes da diferença de procedimentos adotados em cada método de medição.

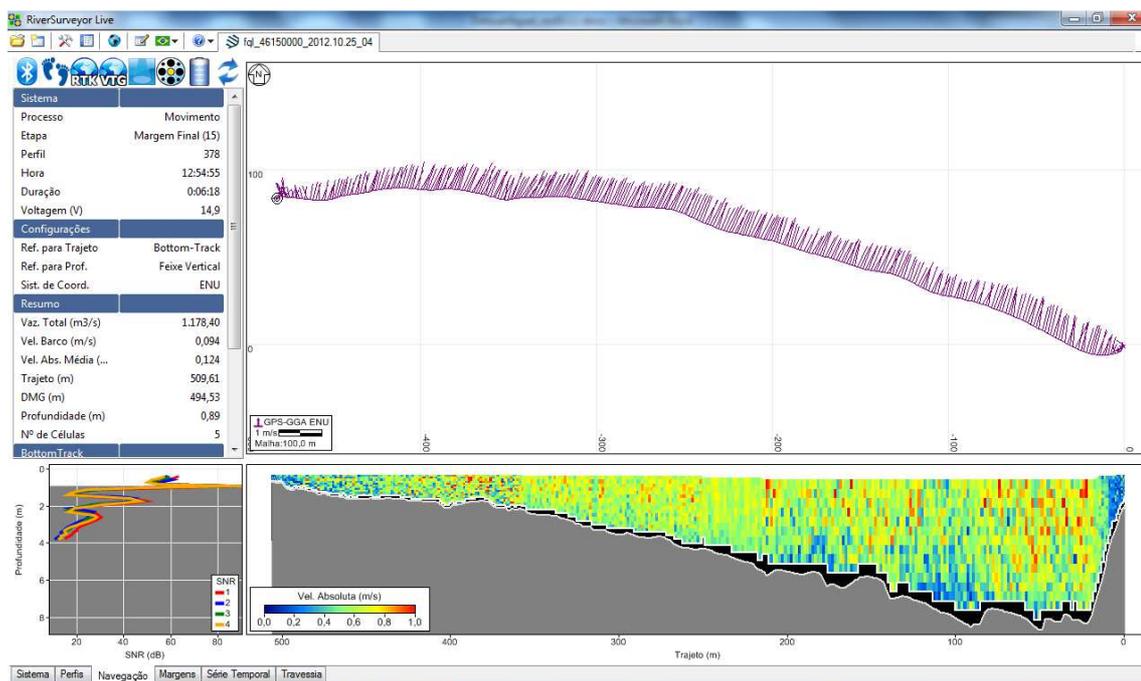
Nas medições convencionais, realizadas com Molinete o procedimento é estacionário, com o barco ancorado no alinhamento da seção transversal, além do fato da batimetria ser definida com base nas verticais da medição (cerca de 20 verticais), gerando em muitos casos uma simplificação da conformação do leito.

Nas medições acústicas, as travessias são dinâmicas, com a possibilidade de afastamento do alinhamento da seção transversal, principalmente em rios de grande largura e velocidade de escoamento da água.

A batimetria realizada pelos Perfiladores acústicos fornece um maior detalhamento da conformação do leito do rio, em comparação com as medições de molinete.

A Figura 25 apresenta o resultado de uma travessia, com medição realizada pelo ADP M9, com a referência GPS.

Figura 25 – Medição de Vazão ADP M9 – Estação Ibotirama, 3ª Campanha



Na Figura 25 pode ser observado o trajeto desenvolvido pela embarcação, os vetores resultantes da velocidade da água, em cada vertical, a batimetria com indicação da variação da velocidade da água ao longo da seção transversal, bem como o resultado da vazão total.

A Tabela 9 apresenta, para cada estação, os valores da diferença percentual entre cada uma destas variáveis, incluindo a velocidade média, nas três campanhas de medição.

Tabela 9 – Diferenças Relativas entre as variáveis de escoamento (A, L, P, V). Comparação entre os métodos de medição (ADP GPS x ADP BT)

Estação	Campanha	Diferença Relativa (ADP GPS x ADP BT)			
		Área	Largura	Profundidade Média	Velocidade Média
Bom Jesus da Lapa	01	-0,40%	-1,34%	1,19%	12,54%
	02	-0,23%	-0,20%	-0,03%	-6,88%
	03	0,36%	-0,42%	0,80%	9,37%
Gameleira	01	-0,13%	0,03%	-0,28%	7,57%
	02	0,23%	0,10%	0,12%	-0,37%
	03	0,75%	0,63%	0,16%	8,55%

Tabela 9 - Continua

Estação	Campanha	Diferença Relativa (ADP GPS x ADP BT)			
		Área	Largura	Profundidade Média	Velocidade Média
Paratinga	01	0,15%	0,63%	-0,61%	5,91%
	02	0,27%	0,21%	0,05%	2,16%
	03	0,15%	0,11%	0,05%	8,34%
Ibotirama	01	0,08%	0,15%	-0,13%	5,86%
	02	-0,78%	-0,66%	-0,12%	1,81%
	03	0,16%	0,79%	-0,66%	7,52%
Morpará	01	0,56%	0,56%	5,30%	6,79%
	02	-2,07%	-0,37%	-1,69%	-4,40%
	03	0,14%	0,24%	0,00%	8,93%
Boqueirão	01	0,00%	0,14%	0,00%	0,92%
	02	0,00%	0,09%	0,00%	-0,30%
	03	0,24%	0,14%	0,35%	0,86%
Fazenda Porto Limpo	01	0,57%	0,19%	0,00%	1,57%
	02	-0,50%	-0,83%	0,35%	0,69%
	03	0,72%	1,00%	-0,28%	0,67%

Tabela 9 - Conclusão

A análise dos resultados apresentados na Tabela 9 permite observar que não houve diferença significativa para os valores de área, largura e profundidade média nas medições realizadas com ADP GPS e ADP BT.

Dessa forma, a única variável afetada pelo EFM é a velocidade da água. Nota-se que nas estações do rio São Francisco, nas campanhas 1 e 3, referentes ao período de cheia da bacia, as velocidades medidas com o ADP GPS foram superiores as valores verificados no ADT BT, correspondentes aos campos destacados com a cor cinza, com diferenças superiores a 5%.

O resultado é compatível com o esperado em decorrência do EFM nas medições ADP BT. Na ocorrência do EFM é esperado que os valores de velocidade da água determinados com ADP BT sejam afetados, com obtenção de valores menores se comparados aos demais métodos de medição de vazão.

Na estação de Bom Jesus da Lapa, na campanha 2, período de seca da bacia, o comportamento observado é o inverso. O valor da velocidade obtida com ADP GPS foi inferior ao apresentado pelo ADP BT. Este fato ocorreu devido à perda de sinal RTK, durante a realização da travessia, interferindo na correta determinação da velocidade de deslocamento do barco no método ADP GPS.

A Tabela 10 apresenta os valores de diferença relativa das vazões entre os métodos Molinete x ADP GPS, Molinete x ADP BT e ADP GPS x ADP BT, em cada estação do estudo, nas três campanhas de campo.

A análise das diferenças percentuais para as vazões indica que as medições ADP GPS apresentam grande similaridade com as realizadas com o Molinete. Uma vez que a maior diferença verificada foi na estação de Gameleira, na campanha 2, onde a vazão determinada com Molinete foi 4,67% superior ao resultado obtido com ADP GPS.

Tabela 10 – Diferenças Relativas entre os valores de vazão obtidos pelo método convencional (Molinete) e acústico (ADP-GPS) e (ADP-BT)

Estação	Campanha	Diferenças Relativas (Vazão)		
		Molinete x ADP-GPS	Molinete x ADP-BT	ADP-GPS x ADP-BT
Bom Jesus da Lapa	01	0,16%	12,38%	12,24%
	02	4,35%	-2,42%	-7,08%
	03	3,53%	12,90%	9,71%
Gameleira	01	2,12%	9,21%	7,24%
	02	4,67%	4,28%	-0,41%
	03	0,58%	9,93%	9,40%
Paratinga	01	-1,67%	4,45%	6,02%
	02	-0,34%	0,73%	1,07%
	03	1,36%	9,77%	8,52%
Ibotirama	01	1,14%	6,98%	5,90%
	02	0,31%	1,43%	1,13%
	03	-0,07%	7,63%	7,69%
Morpará	01	-0,41%	6,87%	7,25%
	02	4,52%	-0,05%	-4,78%
	03	0,23%	9,24%	9,03%
Boqueirão	01	2,06%	3,11%	1,07%
	02	1,19%	0,94%	-0,25%
	03	-0,82%	0,31%	1,12%
Fazenda Porto Limpo	01	0,09%	1,81%	1,72%
	02	2,25%	2,52%	0,28%
	03	-1,15%	0,24%	1,38%

A comparação Molinete x ADP GPS apresentou as menores diferenças em relação aos demais pares de comparação.

As diferenças de vazão entre os métodos Molinete x ADP BT e ADP GPS x ADP BT apresentaram valores elevados nas estações do rio São Francisco, nas campanhas 01 e 03, referentes ao período de cheia da bacia. Chegando a 12% na estação de Bom Jesus da Lapa, na campanha 01, sempre com o ADP BT apresentando resultados inferiores aos demais métodos de medição.

Na Tabela 10 estão destacadas as medições que apresentaram diferenças superiores a 5%, ressaltando a necessidade de proceder com a correção do EFM nas medições ADP BT.

Na estação de Paratinga, na primeira campanha, o resultado obtido pelo ADP BT foi 4,45% inferior à vazão medida com Molinete.

Esse resultado poderia ser aceito, sem a necessidade de proceder com a correção do EFM, porém como o afastamento entre os dois métodos acústicos (ADP GPS e ADP BT) foi de 6,02%, com o ADP BT apresentando a menor vazão a medição também foi incluída no conjunto onde é necessário proceder com a correção do EFM.

Nas estações Boqueirão, do rio Grande e Fazenda Porto Limpo do rio Preto, não houve diferenças significativas entre os métodos de medição.

O mesmo pode ser aceito para as estações do rio São Francisco na campanha 02, referente ao período de seca da bacia.

Na campanha 01 e 03, nas estações do rio São Francisco, os resultados obtidos com ADP BT foram inferiores aos demais métodos de medição, indicando a possibilidade de ocorrência do EFM.

O resultado é compatível com a Tabela 6, onde o EFM era esperado para o período de cheias nas estações do rio São Francisco, de acordo com os altos valores para a relação $[\bar{V}_{80\%} / (\bar{U}_{Cr})]$.

Visando a confirmação das análises realizadas com base nas diferenças relativas observadas para as vazões, foi realizado Teste estatístico de igualdade, apresentado na Tabela 11.

Foi realizada a comparação dos valores de vazão das medições Molinete x ADP GPS, Molinete x ADP BT e ADP GPS x ADP BT, levando em consideração: (i) todas as medições; (ii) medições no rio São Francisco; (iii) medições do rio Grande e

Preto; (iv) medições das campanhas 01 e 03, período de cheia da bacia e (v) medições da campanha 02, período de seca da bacia.

Os resultados dos testes com a utilização de todas as medições de vazão permite verificar que não há evidências estatísticas que comprovem existir diferenças significativas entre as medições com Molinete e ADP GPS.

A comparação das medições Molinete x ADP BT e ADP GPS x ADP BT indicam diferença significativa entre os métodos, com ADP BT geralmente menor, caracterizando a possibilidade de ocorrência do EFM nessas medições BT.

Tabela 11 – Teste Estatístico de Igualdade – Medições de Vazão

Medições	Comparação	Parâmetros do Teste t ($\alpha = 0,05$)								
		Dif _(méd) (m ³ /s)	Dpad (m ³ /s)	n	gl	t	H0	p - valor	2 x (p -valor)	Resultado
TODAS	Mol x ADP-GPS	20,6	48,7	21	20	1,933	Mol = ADP GPS	0,0265	0,0530	H0 Verdadeira
	Mol x ADP-BT	210,3	248,4	21	20	3,880	Mol = ADP BT	0,0007	0,0014	H1 Verdadeira
	ADP-GPS x ADP-BT	189,8	240,5	21	20	3,616	ADP GPS = ADP BT	0,0009	0,0018	H1 Verdadeira
SÃO FRANCISCO	Mol x ADP-GPS	28,4	41,9	15	14	2,624	Mol = ADP GPS	0,0530	0,1060	H0 Verdadeira
	Mol x ADP-BT	293,4	249,6	15	14	4,552	Mol = ADP BT	0,0005	0,0010	H1 Verdadeira
	ADP-GPS x ADP-BT	265,0	247,8	15	14	4,141	ADP GPS = ADP BT	0,0005	0,0010	H1 Verdadeira
RIO GRANDE E PRETO	Mol x ADP-GPS	1,0	3,3	6	5	0,709	Mol = ADP GPS	0,2500	0,5000	H0 Verdadeira
	Mol x ADP-BT	2,8	3,6	6	5	1,859	Mol = ADP BT	0,0640	0,1280	H0 Verdadeira
	ADP-GPS x ADP-BT	1,8	1,7	6	5	2,643	ADP GPS = ADP BT	0,0480	0,0960	H0 Verdadeira
CAMPANHA 1 e 3	Mol x ADP-GPS	19,5	57,4	14	13	1,270	Mol = ADP GPS	0,1180	0,2360	H0 Verdadeira
	Mol x ADP-BT	311,5	248,2	14	13	4,697	Mol = ADP BT	0,0005	0,0010	H1 Verdadeira
	ADP-GPS x ADP-BT	292,0	233,8	14	13	4,674	ADP GPS = ADP BT	0,0005	0,0010	H1 Verdadeira
CAMPANHA 2	Mol x ADP-GPS	22,7	27,7	7	6	2,167	Mol = ADP GPS	0,2500	0,5000	H0 Verdadeira
	Mol x ADP-BT	7,9	23,6	7	6	-0,888	Mol = ADP BT	0,2500	0,5000	H0 Verdadeira
	ADP-GPS x ADP-BT	-14,8	33,8	7	6	1,155	ADP GPS = ADP BT	0,1590	0,3180	H0 Verdadeira

As análises realizadas permitiram observar que não houve diferença significativa entre os três métodos de medição na campanha 02, período de vazões baixas da bacia. Já para as campanhas 01 e 03 fica evidente a possibilidade de EFM atuando na redução dos valores de vazão obtidos com ADP BT, nas estações do rio São Francisco.

Os resultados obtidos para o rio Grande e Preto indicam que não há evidências estatísticas para que a hipótese de igualdade entre os diferentes métodos de medição seja descartada.

Tanto no período seco e de cheias da bacia, não houve indícios de ocorrência do EFM nas estações Boqueirão e Fazenda Porto Limpo, uma vez que as medições ADP BT se mostraram semelhantes aos resultados dos demais métodos de medição.

Esse comportamento pode ser justificado em função das condições de escoamento e da composição granulométrica do material de fundo existente nos dois rios, uma vez que o material de fundo do rio Grande é tipicamente mais grosso em comparação com as estações do rio São Francisco.

Cabe observar também que o escoamento da água, em termos médios, conforme Caracterização da Dinâmica Fluvial, apresentada no item 6.1, se dá com velocidade menor que a verificada no rio São Francisco.

Na estação de Boqueirão é possível notar a ocorrência de areia grossa e pedregulho na composição granulométrica do material de fundo, diferente do rio São Francisco, onde o material é predominantemente areia média.

Essas condições favorecem o transporte de sedimentos junto ao leito do rio, nas estações do rio São Francisco, intensificando o EFM nas medições ADP BT, principalmente nos períodos de cheia da bacia, onde as velocidades de escoamento da água tendem a ser mais elevadas.

O Teste Estatístico aplicado apenas às medições do rio Preto e Grande, bem como apenas as medições da Campanha 02 possuem a limitação de um número reduzido de medições. Porém, as condições de escoamento verificadas durante as medições, bem como as características médias, referentes aos períodos de seca e cheia da bacia, reforçam a validade das análises, indicando que essas condições de escoamento não favorecem a ocorrência de EMF.

Os resultados obtidos com a realização dos testes estatísticos permitem observar uma condição semelhante ao verificado por meio da comparação direta entre os diferentes métodos de medição.

As confirmações obtidas com a aceitação ou rejeição da hipótese nula dos testes estatísticos se mostraram compatíveis com os resultados das diferenças relativas calculadas no item 6.2.1 e apresentados na Tabela 10 – Diferenças Relativas entre os valores de vazão obtidos pelo método convencional (Molinete) e acústico (ADP-GPS) e (ADP-BT)

Os valores encontrados nas medições realizadas com o ADP BT se mostraram inferiores aos dos demais métodos de medição, nas campanhas 01 e 03, apenas nas estações do rio São Francisco.

Os resultados indicam a necessidade de proceder com a correção do EFM, já que as condições de escoamento, referentes ao período de cheia da bacia são propícias à ocorrência do fenômeno e o método de medição pode ser afetado pelo mesmo.

Juntamente com as medições de vazão, em cada campanha de campo foi realizada coleta de sedimento de fundo, para caracterização granulométrica do material do leito e verificação das condições de escoamento que proporcionam o EFM, nos período de seca e cheia da área de estudo.

6.2.3 Caracterização Granulométrica

Em cada campanha de medição foi realizada coleta de sedimento de fundo, em cinco verticais de amostragem, com material coletado sendo misturado, gerando uma amostra composta e analisado em laboratório, conforme Tabela 12.

Tabela 12 – Curvas Granulométricas Campanhas de Medição – Frações de Peneiramento e Diâmetros Característicos

Nome	Camp.	Porcentagem que passa (Pk) % Pela malha da peneira (mm)										D ₅₀ (mm)	D ₉₀ (mm)
		15,90	8,00	4,00	2,00	1,00	0,50	0,25	0,12	0,06			
Bom Jesus da Lapa	1	100,0	99,7	99,4	98,9	96,6	80,8	18,0	1,0	0,0	0,377	0,791	
	2	100,0	100,0	99,9	99,7	98,3	85,3	38,9	7,1	0,3	0,310	0,682	
	3	100,0	100,0	99,7	98,9	95,8	78,0	9,0	0,6	0,1	0,399	0,837	
Gameleira	1	100,0	99,6	98,7	96,8	90,4	61,5	15,3	0,4	0,0	0,438	0,994	
	2	100,0	100,0	100,0	100,0	98,7	82,9	12,0	3,6	0,2	0,384	0,725	
	3	100,0	98,5	94,3	89,3	80,1	62,4	10,8	1,4	0,1	0,440	0,850	

Nome	Camp.	Porcentagem que passa (Pk) % Pela malha da peneira (mm)									D ₅₀ (mm)	D ₉₀ (mm)
		15,90	8,00	4,00	2,00	1,00	0,50	0,25	0,12	0,06		
Tabela 12 - Continua												
Morpará	1	100,0	98,9	96,9	94,7	90,8	77,7	10,9	1,0	0,0	0,396	0,968
	2	100,0	100,0	99,0	98,1	95,8	81,1	12,3	0,4	0,0	0,387	0,803
	3	100,0	100,0	99,9	99,6	98,3	80,8	9,2	0,6	0,0	0,392	0,762
Boqueirão	1	100,0	93,1	88,7	86,8	86,2	83,3	29,4	0,3	0,0	0,346	15,202
	2	94,3	84,9	77,1	75,1	73,8	65,8	12,8	0,4	0,0	0,426	12,274
	3	94,3	91,5	89,4	88,0	87,5	83,9	19,8	0,1	0,0	0,368	15,127

Tabela 12 - Conclusão

A Tabela 12 apresenta a listagem das frações de peneiramento e os Diâmetros D₅₀ e D₉₀ e na Tabela 13 podem ser observados as classes de tamanho de sedimentos representativos das seções transversais do estudo.

Tabela 13 – Curvas Granulométricas Campanhas de Medição – Tipo de Sedimento

Nome	Campanha	Cota (cm)	Tipo de Sedimento			
			Argila	Silte	Areia	Pedregulho
Bom Jesus da Lapa	1	695	0,0	0,0	98,8	1,2
	2	164	0,0	0,3	99,4	0,3
	3	314	0,0	0,1	98,9	1,1
Gameleira	1	716	0,0	0,0	96,8	3,2
	2	163	0,0	0,2	99,8	0,0
	3	482	0,0	0,1	89,2	10,7
Morpará	1	786	0,0	0,1	94,6	5,3
	2	286	0,0	0,1	98,1	1,9
	3	454	0,0	0,0	99,6	0,4
Boqueirão	1	203	0,0	0,0	86,8	13,2
	2	52	0,0	0,0	75,1	24,9
	3	205	0,0	0,0	88,0	12,0

As curvas granulométricas das estações do rio São Francisco estão apresentadas nas Figuras 26, 27 e 28. Para cada estação, estão plotadas a granulometria, referente às três campanhas de campo, representando a variação da composição do material de fundo entre os períodos de seca e cheia da bacia.

Figura 26 – Curvas Granulométricas Campanhas de Campo – Estação B.J. da Lapa

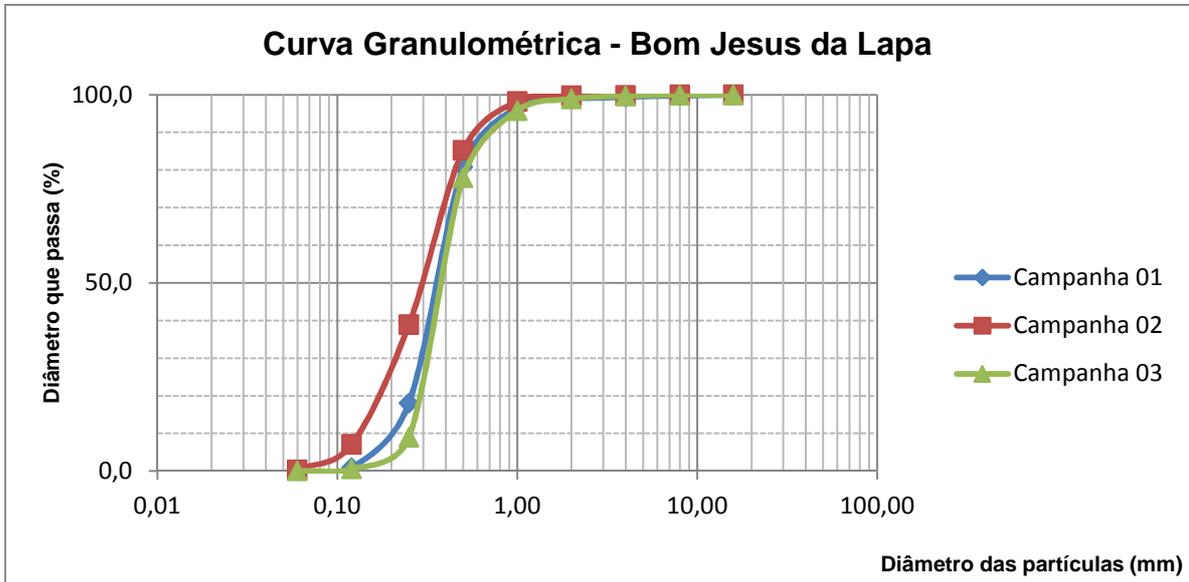


Figura 27 – Curvas Granulométricas Campanhas de Campo – Estação Gameleira

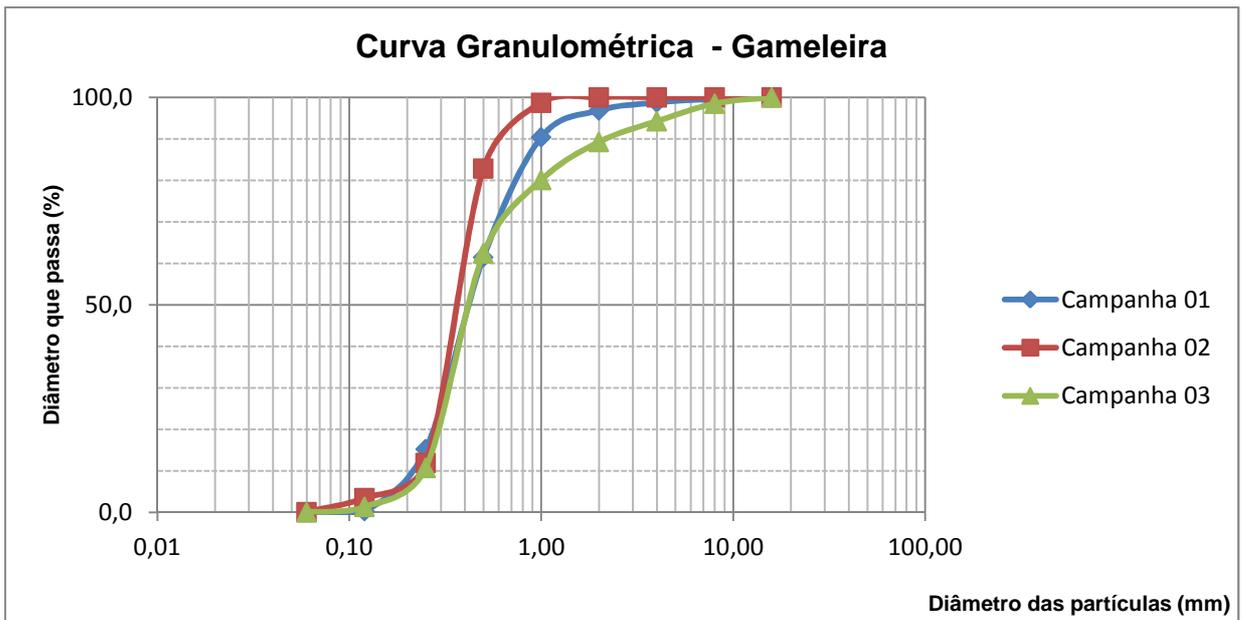
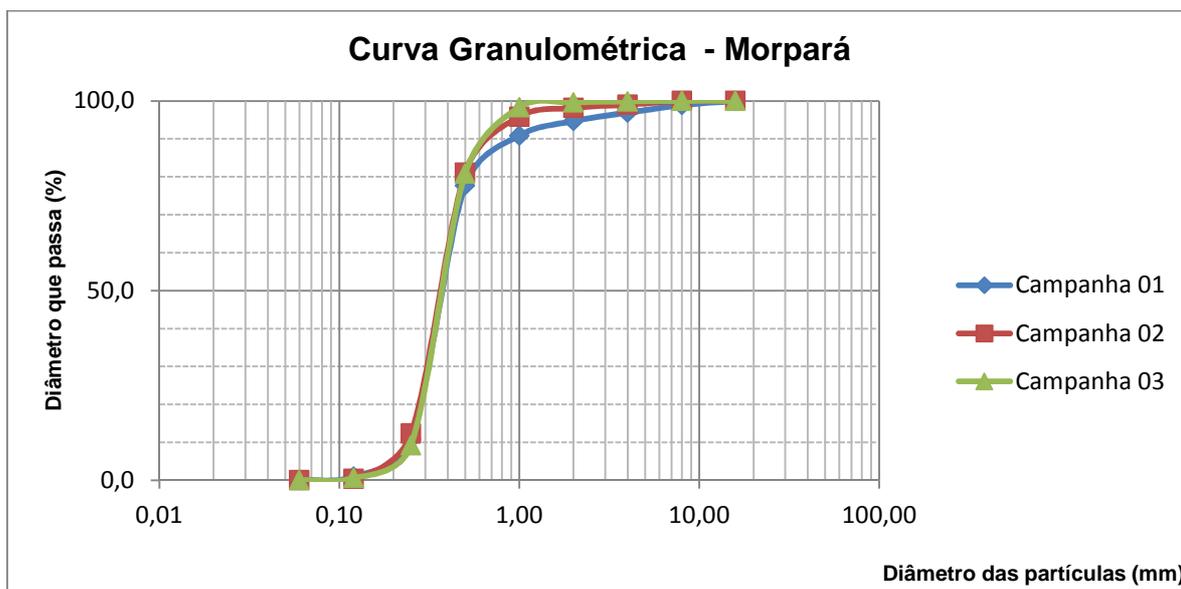


Figura 28 – Curvas Granulométricas Campanhas de Campo – Estação Morpará



Nas estações do rio São Francisco é observada uma diferença dos resultados obtidos entre os períodos de seca e de cheia da bacia, bem como quando a comparação é realizada entre as estações ao longo do trecho estudado.

O diâmetro característico D_{50} variou de 0,310 mm, na estação Bom Jesus da Lapa, no período de seca até o valor de 0,440 mm na estação Gameleira, no período de cheia da bacia.

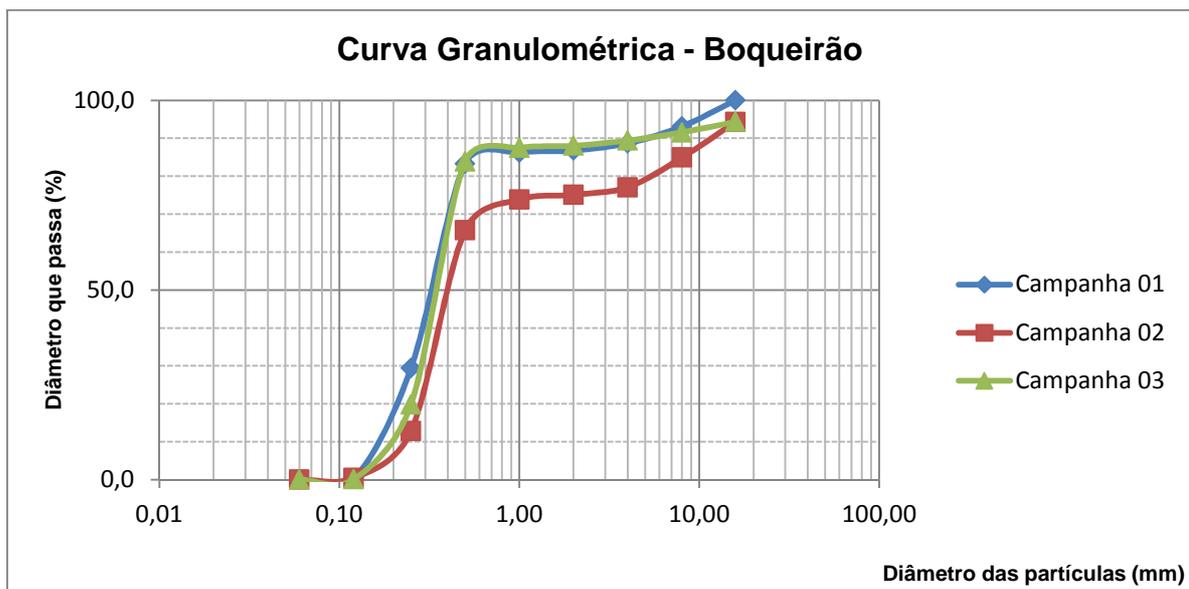
Já o D_{90} oscilou entre 0,682 mm, no período seco, na estação de Bom Jesus da Lapa, até o valor de 0,994 mm, na época de cheia na estação de Morpará.

Apesar da variação dos diâmetros característicos a composição do material de fundo se mostrou compatível com os resultados médios representativos dos períodos de seca e cheia da bacia, com material de fundo constituído predominantemente por areia média, com diâmetro menor que 2,0 mm, atingindo cerca de 90% da composição total do material amostrado.

A Figura 29 apresenta as curvas granulométricas do material coletado nas três campanhas de campo, na estação Boqueirão, no rio Grande. É possível observar condição diferente da apresentada no rio São Francisco. A areia média continua sendo o material predominante, porém há ocorrência de areia grossa e pedregulho, nas três campanhas de medição.

Na segunda campanha é verificado também um aumento da parcela de material mais grosso (areia grossa e pedregulho) depositado no leito do rio. Esta condição, somada ao escoamento ocorrendo com menores velocidades tende a atenuar a ocorrência do EFM, se mostrando compatível com o resultado verificado nas medições de vazão, onde o transporte de sedimentos não causou efeitos significativos nos resultados ADP BT.

Figura 29 – Curvas Granulométricas Campanhas de Campo – Estação Boqueirão



Nas campanhas 02 e 03 também foi realizada coleta de sedimento, com determinação da curva granulométrica para cada vertical de amostragem, ou seja, as amostras foram analisadas separadamente, com a intenção de realizar uma comparação direta com os valores de velocidade de escoamento da água em cada vertical.

Os pontos de amostragem de sedimentos são coincidentes com as posições de determinação do EFM, no teste com o barco ancorado, com distância da margem esquerda e profundidade da vertical apresentados na Tabela 20.

Os resultados dos laudos estão apresentados nas Tabelas 14 e 15.

Tabela 14 – Curvas Granulométricas por Vertical – Frações de Peneiramento

Nome	Camp	Vert	Porcentagem que passa (Pk) % Pela malha da peneira (mm)									D ₅₀ (mm)	D ₉₀ (mm)
			15,90	8,00	4,00	2,00	1,00	0,50	0,25	0,12	0,06		
Bom Jesus da Lapa	2	1	100,0	100,0	100,0	99,4	94,9	74,1	36,6	17,4	0,8	0,339	0,881
		2	100,0	100,0	100,0	99,4	97,1	81,4	25,9	0,4	0,3	0,359	0,774
		3	100,0	100,0	99,6	99,3	96,1	71,2	9,1	0,2	0,0	0,415	0,878
		4	100,0	100,0	100,0	100,0	99,8	95,8	59,2	1,6	0,1	0,230	0,460
		5	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	99,7	98,3	41,7	1,6	0,143	0,232
	3	1	100,0	100,0	100,0	100,0	99,8	97,3	17,3	1,3	0,1	0,352	0,477
		2	100,0	100,0	99,8	99,6	97,1	77,0	5,4	0,3	0,0	0,406	0,823
		3	100,0	100,0	99,9	99,7	98,6	79,7	6,3	0,5	0,1	0,399	0,772
		4	100,0	100,0	99,9	99,8	99,0	88,8	27,4	0,7	0,1	0,342	0,558
		5	100,0	100,0	98,3	92,3	77,0	42,6	10,0	0,6	0,1	0,607	1,852
Gameleira	2	1	100,0	98,6	95,4	93,9	87,7	55,8	12,8	9,5	0,4	0,467	1,365
		2	100,0	100,0	100,0	99,9	99,5	87,8	16,4	1,9	0,1	0,368	0,596
		3	100,0	100,0	100,0	100,0	99,2	88,2	11,7	2,9	0,2	0,375	0,580
		4	100,0	100,0	100,0	99,9	99,4	92,4	13,0	5,9	0,2	0,366	0,492
		5	100,0	100,0	100,0	100,0	99,8	92,2	25,0	1,5	0,1	0,343	0,492
	3	1	100,0	100,0	99,6	98,8	94,0	64,1	1,7	0,1	0,0	0,444	0,934
		2	100,0	100,0	99,0	96,7	89,0	56,3	2,0	0,2	0,0	0,471	1,136
		3	100,0	100,0	100,0	100,0	99,6	85,7	15,2	1,3	0,1	0,374	0,656
		4	100,0	100,0	100,0	100,0	99,0	84,9	10,5	0,5	0,0	0,383	0,682
		5	100,0	100,0	100,0	100,0	99,7	89,8	16,3	1,1	0,0	0,365	0,510
Morpará	2	1	100,0	100,0	100,0	99,9	98,5	67,2	5,8	0,5	0,1	0,430	0,864
		2	100,0	100,0	99,7	99,6	99,3	96,8	38,8	0,9	0,0	0,298	0,471
		3	100,0	100,0	99,4	96,2	86,8	59,7	7,2	0,6	0,1	0,454	1,342
		4	100,0	100,0	95,2	93,7	92,8	78,3	5,8	0,3	0,0	0,403	0,904
		5	100,0	100,0	100,0	99,9	99,2	91,9	30,8	0,3	0,0	0,329	0,492
	3	1	100,0	100,0	100,0	100,0	99,5	85,0	5,7	0,7	0,0	0,390	0,673
		2	100,0	100,0	99,9	99,9	99,4	84,0	20,6	2,8	0,1	0,366	0,694
		3	100,0	100,0	99,3	98,0	92,2	64,3	10,4	0,4	0,1	0,434	0,961
		4	100,0	100,0	99,7	99,3	98,2	82,2	9,1	0,3	0,1	0,390	0,744
		5	100,0	100,0	100,0	99,9	98,9	91,2	36,1	0,3	0,1	0,313	0,495

Tabela 14 - Continua

Nome	Camp	Vert	Porcentagem que passa (Pk) % Pela malha da peneira (mm)								D ₅₀ (mm)	D ₉₀ (mm)	
			15,90	8,00	4,00	2,00	1,00	0,50	0,25	0,12			0,06
Boqueirão	2	1	90,2	84,3	70,0	66,0	64,8	56,4	17,1	1,4	0,1	0,459	15,597
		2	100,0	58,6	39,8	36,2	32,9	27,0	7,5	0,8	0,0	6,170	13,991
		3	100,0	67,1	57,2	54,6	53,0	48,8	25,9	0,4	0,0	0,638	13,499
		4	100,0	76,4	73,0	72,0	71,1	66,6	28,5	0,3	0,1	0,391	12,547
		5	100,0	100,0	100,0	99,7	99,0	91,8	30,5	0,1	0,0	0,330	0,493
	3	1	83,9	65,9	48,9	39,2	37,5	34,3	12,0	0,4	0,1	4,262	16,100
		2	100,0	90,0	77,0	73,9	72,1	69,3	41,8	0,1	0,0	0,325	8,024
		3	100,0	89,2	87,1	86,2	85,6	83,1	29,1	0,1	0,0	0,347	8,576
		4	100,0	100,0	100,0	99,5	97,5	83,0	18,3	0,2	0,0	0,373	0,742
		5	100,0	100,0	100,0	99,9	99,4	90,3	19,6	0,1	0,0	0,357	0,499

Tabela 14 - Conclusão

Tabela 15 – Curvas Granulométricas por Vertical – Tipo de Sedimento

Nome	Campanha	Vertical	Tipo de Sedimento			
			Argila	Silte	Areia	Pedregulho
Bom Jesus da Lapa	2	1	0,00	0,84	98,58	0,58
		2	0,00	0,33	99,11	0,56
		3	0,00	0,00	99,33	0,67
		4	0,00	0,12	99,84	0,04
		5	0,00	1,57	98,43	0,00
	3	1	0,00	0,07	99,89	0,04
		2	0,00	0,03	99,60	0,37
		3	0,00	0,06	99,69	0,25
		4	0,00	0,07	99,77	0,16
		5	0,00	0,12	92,14	7,74
Gameleira	2	1	0,00	0,39	93,54	6,07
		2	0,00	0,07	99,87	0,06
		3	0,00	0,19	99,77	0,04
		4	0,00	0,24	99,68	0,08
		5	0,00	0,07	99,93	0,00
	3	1	0,00	0,03	98,78	1,19
		2	0,00	0,03	96,66	3,31
		3	0,00	0,08	99,92	0,00
		4	0,00	0,00	100,00	0,00
		5	0,00	0,03	99,94	0,03

Tabela 15 - Continua

Nome	Campanha	Vertical	Tipo de Sedimento			
			Argila	Silte	Areia	Pedregulho
Morpará	2	1	0,00	0,12	99,76	0,12
		2	0,00	0,04	99,59	0,37
		3	0,00	0,13	96,07	3,80
		4	0,00	0,00	93,69	6,31
		5	0,00	0,03	99,83	0,14
	3	1	0,00	0,03	99,97	0,00
		2	0,00	0,10	99,77	0,13
		3	0,00	0,06	97,92	2,02
		4	0,00	0,08	99,19	0,73
		5	0,00	0,06	99,88	0,06
Boqueirão	2	1	0,00	0,07	65,90	34,03
		2	0,00	0,04	36,16	63,80
		3	0,00	0,04	54,55	45,41
		4	0,00	0,06	71,97	27,97
		5	0,00	0,00	99,72	0,28
	3	1	0,00	0,08	39,15	60,77
		2	0,00	0,03	73,89	26,08
		3	0,00	0,04	86,21	13,75
		4	0,00	0,03	99,51	0,46
		5	0,00	0,00	99,91	0,09

Tabela 15 - Conclusão

Os resultados obtidos para as verticais apresentam valores semelhantes aos observados na análise da amostra composta. Existe uma variabilidade lateral, com variação dos diâmetros característicos, indicando presença de material mais grosso nas regiões próximas às margens.

Na estação Boqueirão, essa variação lateral é mais acentuada, podendo ser verificada que a presença de pedregulho ocorre de forma predominante junto à margem esquerda do rio, nas posições das verticais 01 e 02.

6.2.4 Velocidade Crítica

Foi realizado o cálculo da Velocidade Crítica U_{Cr} , representativo das estações Bom Jesus da Lapa, Gameleira, Morpará e Boqueirão, nas campanhas 01, 02 e 03, a partir da mistura do material coletado nos cinco pontos de amostragem, conforme valores apresentados na Tabela 16.

Para as campanhas 02 e 03 também foi possível realizar a determinação do valor de U_{Cr} para cada ponto de amostragem de sedimentos, coincidentes com os locais de medição do EFM.

Tabela 16 – Velocidades Críticas – Campanhas de Medição

Nome	Campanha	U_{Cr} (m/s)					
		Composta	V1	V2	V3	V4	V5
Bom Jesus da Lapa	1	0,311	-	-	-	-	-
	2	0,274	0,218	0,240	0,263	0,386	0,388
	3	0,229	0,399	0,164	0,188	0,316	0,133
Gameleira	1	0,287	-	-	-	-	-
	2	0,341	0,205	0,443	0,439	0,493	0,426
	3	0,119	0,298	0,264	0,422	0,375	0,490
Morpará	1	0,254	-	-	-	-	-
	2	0,210	0,246	0,367	0,142	0,101	0,360
	3	0,293	0,338	0,281	0,247	0,309	0,332
Boqueirão	1	0,318	-	-	-	-	-
	2	0,353	0,263	0,615	0,464	0,357	0,307
	3	0,324	0,253	0,401	0,349	0,484	0,206

Na Tabela 17 estão listados os valores de velocidade de escoamento da água obtidos na região junto ao leito do rio em todas as estações.

Tabela 17 – Velocidade da água junto ao leito do rio

Nome	Campanha	$(V_{80\%})$ (m/s)					
		Molinete	V1	V2	V3	V4	V5
Bom Jesus da Lapa	1	0,726	0,750	0,811	0,799	0,656	0,545
	2	0,262	0,255	0,287	0,307	0,202	0,167
	3	0,576	0,622	0,501	0,578	0,745	0,779
Gameleira	1	0,896	0,946	1,100	1,467	1,611	1,368
	2	0,318	0,437	0,443	0,478	0,436	0,186
	3	0,913	1,243	1,061	0,854	0,785	0,612
Paratinga	1	0,478	0,492	0,506	0,457	0,490	0,432
	2	0,442	0,421	0,445	0,438	0,445	0,367
	3	0,812	0,760	0,801	0,743	0,738	0,682

Tabela 17 - Continua

Nome	Campanha	$(V_{80\%})$ (m/s)					
		Molinete	V1	V2	V3	V4	V5
Ibotirama	1	0,744	0,702	0,823	0,834	0,725	0,525
	2	0,486	0,420	0,482	0,487	0,495	0,484
	3	0,941	0,715	0,685	0,751	0,711	0,632
Morpará	1	0,674	0,801	0,706	0,803	0,652	0,658
	2	0,346	0,287	0,385	0,355	0,265	0,333
	3	0,724	0,690	0,610	0,801	0,811	0,734
Boqueirão	1	0,471	0,437	0,444	0,423	0,401	0,397
	2	0,227	0,200	0,325	0,315	0,297	0,288
	3	0,360	0,348	0,357	0,389	0,321	0,317
Fazenda Porto Limpo	1	0,408	0,289	0,389	0,401	0,428	0,402
	2	0,233	0,129	0,245	0,280	0,243	0,224
	3	0,520	0,301	0,489	0,530	0,368	0,113

Tabela 17 - Conclusão

A coluna Molinete apresenta o valor médio da velocidade da água, na posição de 80% da profundidade, referente às medições de vazão realizadas em cada estação. Para as colunas V1 a V5 os valores de velocidade da água foram obtidos com o perfilador acústico, também na posição referente a 80% da profundidade, em cada vertical de amostragem.

A Tabela 18 apresenta os valores da relação $(V_{80\%} / U_{Cr})$, fazendo uso da velocidade junto ao fundo obtida com o molinete.

Também são apresentados os valores das velocidades obtidas com o ADP M9 em cada vertical de amostragem.

A relação $(V_{80\%} / U_{Cr})$ foi determinada para cada estação onde foi coletado sedimento de fundo, nas campanhas 01, 02 e 03 e em cada vertical de amostragem, nas campanhas 02 e 03.

Nessa tabela também é apresentada a coluna EFM, que representa as medições de vazão onde o resultado ADP BT se mostrou inferior aos demais métodos de medição, com diferença superior a 5%.

Tabela 18 – Relação $V_{\text{água}} / U_{Cr}$

Nome	Campanha	$(V_{80\%}) / U_{Cr}$						EFM Significativo
		Molinete	V1	V2	V3	V4	V5	
Bom Jesus da Lapa	1	2,3	-	-	-	-	-	Sim
	2	1,0	1,1	1,3	1,2	0,5	0,4	Não
	3	2,5	1,6	3,2	3,0	2,2	6,4	Sim
Gameleira	1	4,1	-	-	-	-	-	Sim
	2	0,9	2,1	1,0	1,1	0,9	0,4	Não
	3	7,7	4,2	4,0	2,1	2,1	1,4	Sim
Morpará	1	2,6	-	-	-	-	-	Sim
	2	1,7	1,3	0,6	3,1	4,4	1,0	Não
	3	2,5	2,6	3,3	3,4	2,7	2,4	Sim
Boqueirão	1	1,8	-	-	-	-	-	Não
	2	1,0	1,2	0,5	0,6	0,8	1,1	Não
	3	1,0	1,9	1,2	1,5	1,1	2,4	Não

As medições de vazão afetadas pelo EFM ocorreram nos períodos de cheia da bacia, apenas nas estações do rio São Francisco.

Os resultados acima permitem verificar que na maioria das vezes os valores de velocidade de escoamento da água, na região junto ao fundo do rio, superam o limite estabelecido pela U_{Cr} , indicando a possibilidade de ocorrência de transporte de sedimentos de fundo.

Porém, a ocorrência do EFM afetando o resultado das medições de vazão, somente se dá em condições mais elevadas da relação $(V_{80\%} / U_{Cr})$. Na estação de Gameleira a velocidade da água junto ao leito apresentou valor sete vezes superior ao limite estabelecido pela Velocidade Crítica.

A análise desses resultados permite observar que o EFM não ocorre para qualquer condição de escoamento. As medições ADP BT tiveram seus resultados afetados apenas nas campanhas de cheia nas estações do rio São Francisco, onde foram verificados elevados valores de velocidade da água e ocorrência de material mais suscetível ao transporte, com areia média sendo predominante na composição granulométrica do material de fundo.

Além da condição média de U_{Cr} , representado pela amostragem composta, a análise dos dados pontuais permite verificar que existe uma variação lateral da relação $(V_{80\%} / U_{Cr})$, o que reforça a ideia de que o EFM ocorre de forma variável ao

longo da seção transversal do rio. Desta forma, os métodos de correção do EFM que procedem com a determinação do efeito, em termos médios, apresentarão os melhores resultados.

6.2.5 Descarga de Fundo

As coletas de sedimento de leito realizadas durante as campanhas de campo permitiram definir os valores de Descarga Sólida de Fundo, calculados de maneira indireta pela formulação de Yang (1983), com resultados apresentados na Tabela 19.

Tabela 19 – Descarga Sólida de Fundo

Descarga Sólida de Fundo (t/dia)	Campanha	Bom Jesus da Lapa	Gameleira	Morpará	Boqueirão
	1	2103	2055	1778	94
	2	297	338	339	49
	3	772	1265	1201	96

Os valores são compatíveis com a Caracterização Sedimentométrica apresentada em PLANVASF (1986). Para a estação de Boqueirão, no rio Grande, o relatório apresenta valores de Descarga Sólida de Fundo na faixa de 35 a 190 t/dia. Para as estações do Rio São Francisco os valores apresentados variam de 400 a 4500 t/dia.

Os resultados permitem observar um acréscimo considerável da carga de material transportado junto ao leito do rio São Francisco no período de cheia da bacia.

O valor médio da descarga de fundo nas estações do rio São Francisco, para o período de cheia da bacia, corresponde a cerca de cinco vezes ao total verificado na campanha do período de seca.

No rio Grande, na estação Boqueirão, também pode ser verificado acréscimo do total de material transportado junto ao leito do rio entre as campanhas de seca e cheia. Os resultados verificados nas campanhas de cheia indicam que o total de sedimentos é cerca de duas vezes maior se comparado ao período seco da bacia.

Os resultados obtidos com a determinação da descarga sólida de fundo indicam que o período de cheia apresenta condições favoráveis há ocorrência do EFM nas estações do rio São Francisco. O acréscimo da descarga líquida, da velocidade de escoamento da água e o conseqüente aumento do material transportado junto ao leito são fatores fundamentais para ocorrência do fenômeno.

6.3 Correção do Efeito de Fundo Móvel

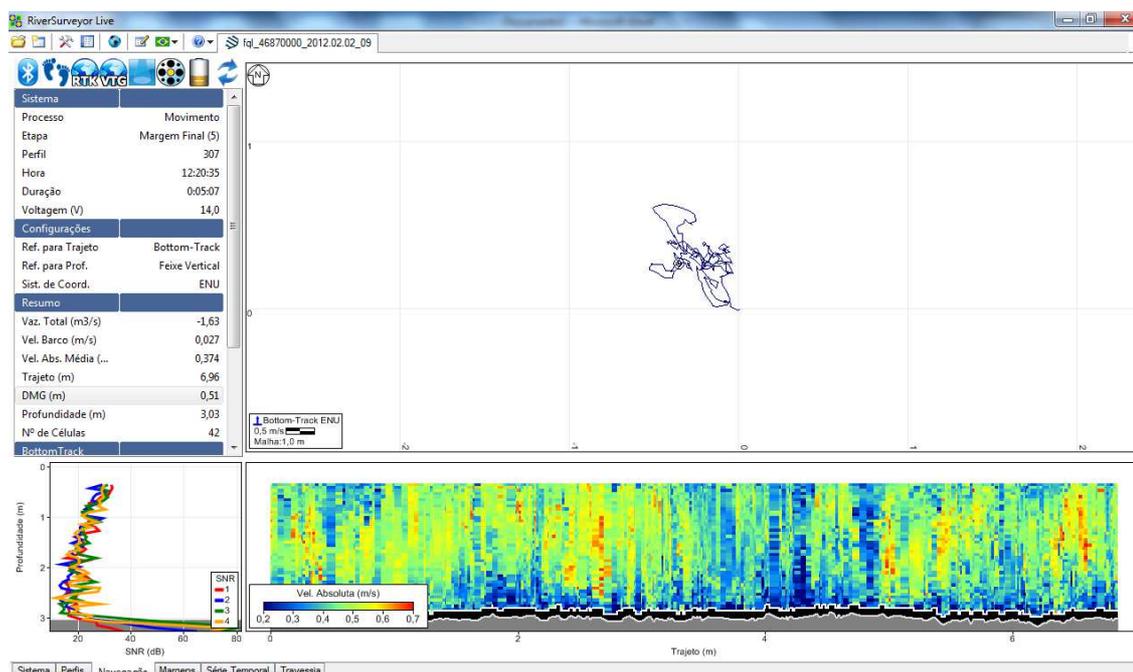
Após verificação da diferença relativa para as vazões obtidas pelos três métodos de medição do estudo, bem como a realização do teste t de Student, as medições ADP BT das campanhas 01 e 03, do rio São Francisco, foram submetidas aos métodos de correção do EFM, conforme apresentado nos itens a seguir.

6.3.1 Aplicação das Técnicas de Correção do EFM

Em cada estação foram realizadas medições da velocidade do fundo móvel, com o barco ancorado, num total de cinco verticais. O tempo mínimo de amostragem em cada vertical era de cinco minutos. Como o barco encontrava-se ancorado, os valores apresentados pela variável (DMG), que expressa o deslocamento relativo barco / leito, seria referente apenas ao deslocamento do Fundo Móvel.

Na Figura 30 pode ser verificada uma das perfilagens realizada na Estação Fazenda Porto Limpo, no rio Preto, na 3ª campanha de medição. O tempo total de amostragem foi de 307 segundos, com um deslocamento do fundo (DMG) igual a 0,51 m. Nesta vertical a VFM apresentou resultado igual a $(0,51 / 307) = 0,0016$ m/s. Valor equivalente a 0,45% da velocidade média de escoamento da água nesta vertical de amostragem.

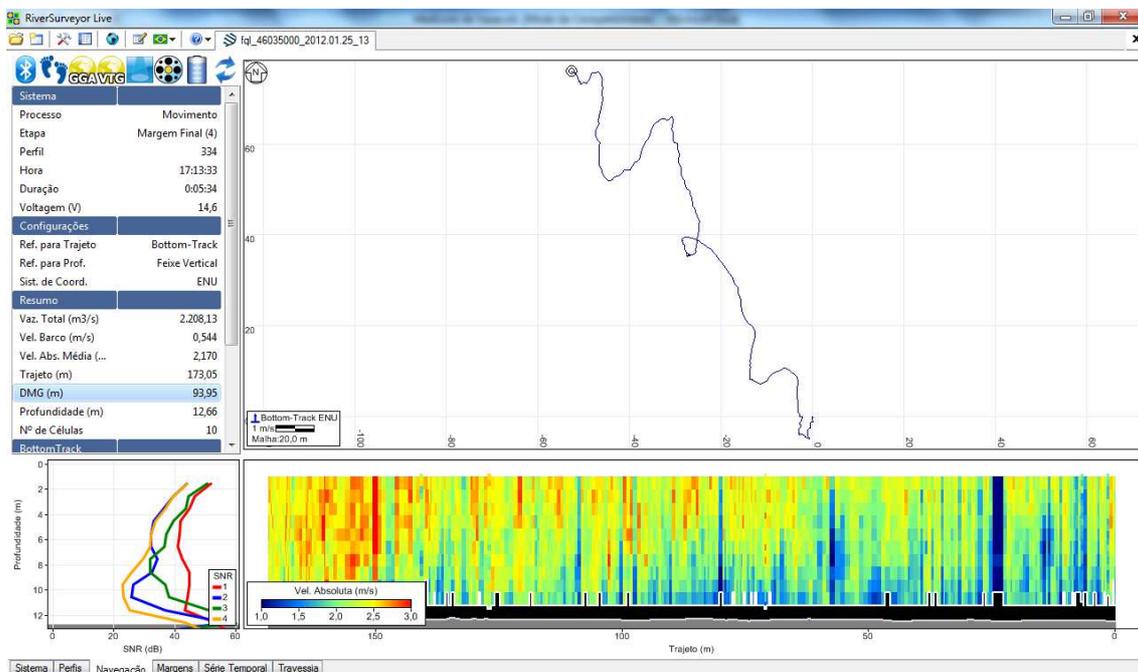
Figura 30 – Perfilagem Barco Ancorado – Estação F. P. Limpo – rio Preto – 3ª Campanha de medição de vazão – 3ª Vertical de amostragem de velocidade do fundo



Este resultado expressa que a movimentação do leito neste ponto não afeta de forma significativa o processo de medição de vazão pelo método ADP BT.

Na Figura 31 pode ser observada a perfilagem realizada na Estação Gameleira, no rio São Francisco, na primeira campanha de medição. Ressalta-se que o barco estava ancorado, o que pode ser confirmado através do perfil batimétrico, que apresenta profundidade praticamente constante ao longo de todo o processo. O valor de DMG foi de 93,95 m, num tempo total de 334 segundos, resultando na VFM de 0,281 m/s, que corresponde a 12,95% da velocidade média de escoamento da água nesta vertical.

Figura 31 – Perfilagem Barco Ancorado – Estação Gameleira – rio São Francisco – 1ª Campanha de medição de vazão – 3ª Vertical de amostragem de velocidade do fundo



A correção pelo método da Sub Seção – SS utilizou o valor máximo de Velocidade de Fundo Móvel verificado nas verticais. O método de correção Sub Seção Média – SSM fez uso do resultado obtido nas cinco verticais para definição da velocidade média de fundo da seção transversal.

No método de correção Seção por Seção - SPS a medição de vazão foi calculada utilizando os valores de velocidade da água, obtidas nas cinco verticais de amostragem. Após a determinação das velocidades em cada vertical, o cálculo da vazão foi realizado de forma análoga ao utilizado nas medições convencionais.

O resultado das amostragens da velocidade de fundo móvel nas cinco verticais, para cada estação, nas três campanhas de campo está listado na Tabela 20.

Tabela 20 – Correção do EFM – Perfilagem com Barco Ancorado para determinação da Velocidade de Fundo Móvel

Nome	Campanha	Vertical	Dist (m)	DMG (m)	P (m)	t (s)	VFM (m/s)	V Água (m/s)
Bom Jesus da Lapa	01	01	81,5	32,0	5,1	317	0,101	1,070
		02	251,1	27,0	5,6	328	0,082	1,193
		03	550,0	74,8	6,3	312	0,240	1,208
		04	700,0	12,1	9,7	326	0,037	0,997
		05	810,0	28,9	9,6	312	0,093	1,061
	02	01	72,3	19,7	3,3	336	0,059	0,592
		02	160,3	22,7	3,0	329	0,069	0,753
		03	280,0	23,2	5,3	347	0,067	0,751
		04	400,0	8,6	3,0	313	0,027	0,468
		05	480,0	9,3	0,9	310	0,030	0,418
	03	01	49,8	10,7	3,2	348	0,031	0,806
		02	155,1	32,1	1,5	315	0,102	0,663
		03	290,0	65,7	1,7	309	0,213	0,715
		04	540,0	4,2	2,7	309	0,014	0,906
		05	755,0	23,5	5,8	308	0,076	1,094
Gameleira	01	01	22,1	22,5	10,0	309	0,073	1,347
		02	51,3	15,4	11,1	331	0,047	1,667
		03	102,1	94,0	14,6	305	0,308	2,125
		04	210,1	23,5	14,9	313	0,075	2,303
		05	321,1	20,2	8,3	334	0,060	2,125
	02	01	51,4	4,9	9,7	311	0,016	0,743
		02	98,4	7,9	8,6	337	0,024	0,760
		03	133,2	30,4	7,5	324	0,094	0,803
		04	162,1	28,4	6,5	317	0,090	0,743
		05	254,2	6,5	4,2	312	0,021	0,323
	03	01	53,2	17,0	9,7	317	0,054	1,754
		02	107,3	10,3	12,6	313	0,033	1,500
		03	184,5	92,6	10,1	325	0,285	1,254
		04	218,5	24,5	7,5	345	0,071	1,098
		05	272,1	18,8	7,1	329	0,057	0,941

Tabela 20 - Continua

Nome	Campanha	Vertical	Dist (m)	DMG (m)	P (m)	t (s)	VFM (m/s)	V Água (m/s)
Paratinga	01	01	31,2	7,4	11,7	306	0,024	1,349
		02	147,2	32,9	12,3	308	0,107	1,389
		03	305,4	56,2	10,5	381	0,148	1,233
		04	399,2	77,6	8,1	372	0,209	1,315
		05	554,3	51,4	7,2	307	0,167	1,152
	02	01	59,2	22,3	3,0	321	0,069	0,620
		02	128,7	13,3	2,9	312	0,043	0,849
		03	252,1	22,2	3,1	310	0,071	0,846
		04	347,1	25,3	3,0	351	0,072	0,848
		05	451,1	27,4	2,6	315	0,087	0,695
	03	01	98,3	36,1	5,9	318	0,114	1,102
		02	204,5	9,9	6,1	325	0,030	1,164
		03	307,3	41,3	5,7	305	0,135	1,068
		04	398,4	13,2	4,6	348	0,038	1,065
		05	502,1	46,2	5,1	315	0,147	0,995
Ibotirama	01	01	59,3	41,8	4,1	309	0,135	1,125
		02	184,2	44,3	9,6	309	0,143	1,368
		03	335,1	93,2	11,7	310	0,301	1,341
		04	461,0	34,0	12,3	312	0,109	1,361
		05	560,2	22,8	4,0	311	0,073	0,750
	02	01	205,1	23,9	3,6	309	0,077	0,581
		02	321,3	8,8	5,2	311	0,028	0,594
		03	392,5	16,0	6,6	305	0,052	0,567
		04	451,1	19,7	7,9	329	0,060	0,573
		05	482,1	3,8	7,7	315	0,012	0,620
	03	01	104,5	19,3	3,8	316	0,061	1,005
		02	224,5	14,8	5,8	310	0,048	0,965
		03	321,1	60,6	7,4	319	0,190	1,050
		04	425,1	12,1	8,0	313	0,039	1,061
		05	518,7	8,1	12,5	316	0,025	1,004
Morpará	01	01	42,5	14,5	9,5	314	0,046	1,170
		02	108,6	11,5	6,7	313	0,037	1,017
		03	229,7	32,2	8,0	322	0,100	1,150
		04	560,3	73,0	5,7	315	0,232	0,933
		05	681,5	40,2	7,3	333	0,121	0,984
	02	01	35,1	5,6	4,1	308	0,018	0,543
		02	214,7	25,1	2,7	307	0,082	0,746
		03	399,9	11,1	3,0	305	0,036	0,745
		04	537,6	40,3	0,8	316	0,128	0,515
		05	663,2	10,4	2,8	352	0,029	0,663

Tabela 20 - Continua

Nome	Campanha	Vertical	Dist (m)	DMG (m)	P (m)	t (s)	VFM (m/s)	V Água (m/s)
Morpará	03	01	152,3	0,8	5,2	317	0,003	0,875
		02	386,8	63,7	3,4	315	0,202	0,770
		03	495,9	60,3	5,7	308	0,196	1,029
		04	608,9	23,1	5,3	311	0,074	1,026
		05	713,2	14,5	7,2	307	0,047	0,933
Boqueirão	01	01	47,6	9,7	3,8	309	0,031	0,897
		02	112,4	4,0	3,4	319	0,013	0,903
		03	87,5	7,8	3,1	321	0,024	0,876
		04	94,8	3,8	3,0	306	0,012	0,826
		05	115,8	2,7	3,3	302	0,009	0,797
	02	01	31,6	2,3	1,5	318	0,007	0,501
		02	44,0	2,8	2,1	317	0,009	0,809
		03	72,5	2,2	2,3	314	0,007	0,793
		04	95,2	5,2	2,1	306	0,017	0,740
		05	116,3	1,8	1,9	309	0,006	0,720
	03	01	29,8	0,4	3,1	306	0,001	0,699
		02	53,2	3,4	3,7	313	0,011	0,971
		03	84,1	4,3	3,8	307	0,014	0,944
		04	110,5	0,9	3,7	310	0,003	0,918
		05	128,8	4,1	3,4	318	0,013	0,855
Fazenda Porto Limpo	01	01	11,0	0,6	3,0	307	0,002	0,429
		02	20,0	0,6	4,4	318	0,002	0,658
		03	30,0	0,7	4,3	325	0,002	0,788
		04	40,0	0,4	4,0	327	0,001	0,781
		05	50,0	0,3	2,6	308	0,001	0,538
	02	01	8,0	0,3	2,5	310	0,001	0,256
		02	15,0	0,4	3,7	306	0,001	0,466
		03	25,0	0,3	3,8	314	0,001	0,552
		04	35,0	0,4	3,5	318	0,001	0,492
		05	45,0	0,3	2,1	312	0,001	0,456
	03	01	13,0	1,3	3,7	306	0,004	0,624
		02	22,0	1,8	4,8	310	0,006	0,791
		03	31,0	3,2	4,6	315	0,010	1,041
		04	44,0	1,5	4,0	306	0,005	0,740
		05	51,0	0,4	2,3	301	0,001	0,236

Tabela 20 - Conclusão

Nessa Tabela são apresentados os valores de Distância (Dist), medidas a partir da margem esquerda até o ponto de amostragem; DMG que corresponde ao deslocamento relativo barco / leito do rio, em linha reta ao longo do tempo de perfilagem, como o barco está ancorado o valor representa o deslocamento do Fundo Móvel; Profundidade média da vertical (P); Tempo de amostragem (t) e

Velocidade média da água na vertical ($V_{\text{água}}$). Com a razão de (DMG / t) foi calculada a VFM – Velocidade de Fundo Móvel em cada vertical.

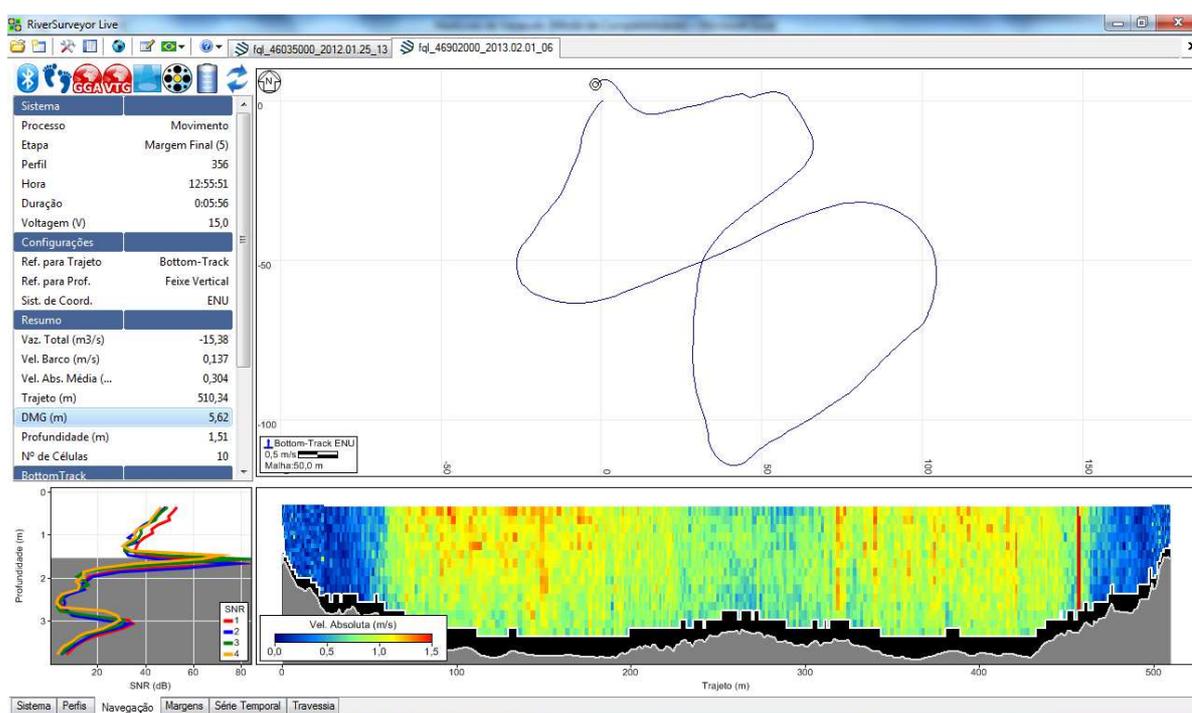
Além das medições estacionárias, realizadas com o barco ancorado nas cinco verticais, também foram executadas travessias desenvolvidas no formato de oito, com saída e chegada acontecendo no mesmo ponto, materializado por uma boia junto às margens do rio. Procedimento correspondente ao método do LOOP.

Como a saída e chegada da travessia sempre aconteciam no mesmo ponto, o valor de DMG que expressa a distância entre os pontos de início e fim da travessia deveria ser nulo.

Os valores de DMG obtidos são referentes ao efeito do deslocamento médio do leito do rio, permitindo o cálculo da VFM representativa da seção transversal, a partir da divisão do DMG pelo tempo de travessia.

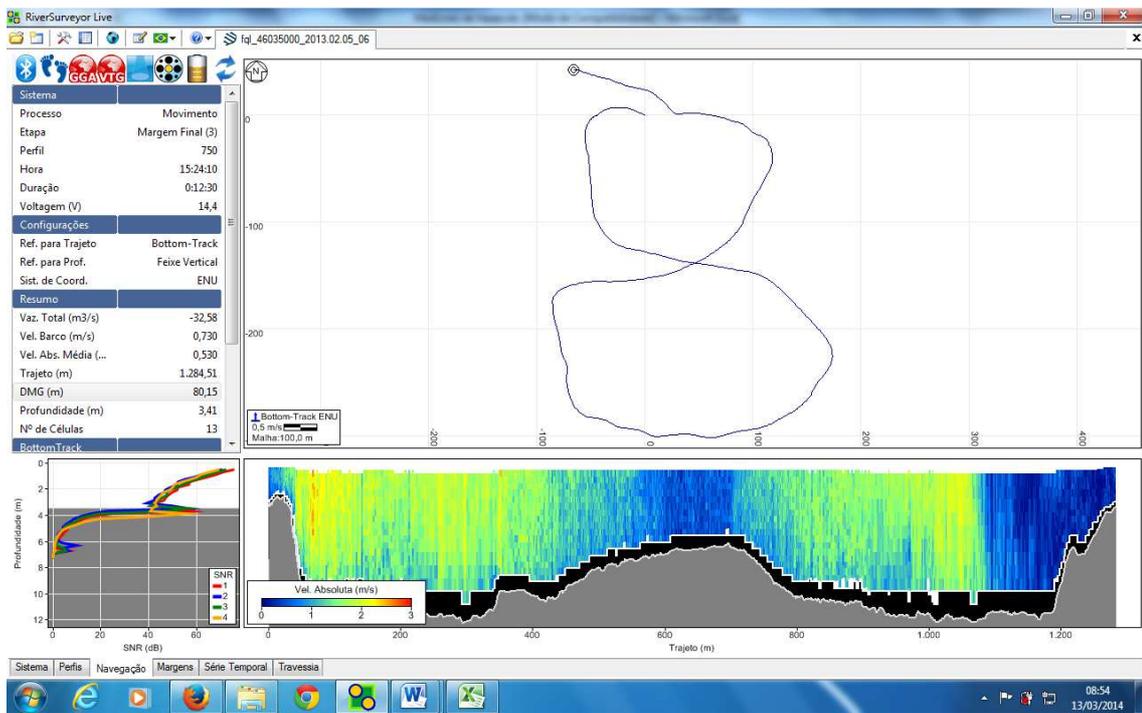
Na Figura 32 pode ser observado o traçado em forma de oito, realizado na estação Boqueirão, no rio Grande, na terceira campanha de medição. O valor de DMG resultante do Loop foi de 5,62 m num tempo total de 356 segundos. Gerando uma VFM igual a 0,016m/s, cerca de 2,4% da velocidade média de escoamento da água na seção transversal.

Figura 32 – Loop Teste – Estação Boqueirão – rio Grande – 3ª Campanha



Na Figura 33, o Loop teste foi realizado na estação Gameleira, na terceira campanha de medição. O DMG resultante teve valor de 80,15 m num tempo de 750 segundos. A VMF verificada teve valor igual a 0,107 m/s, chegando a 11% da velocidade média da água na seção.

Figura 33 – Loop Teste – Estação Gameleira – 3ª Campanha



Os resultados do Loop Teste estão apresentados Tabela 21.

Tabela 21 – Medições (ADP BT) – LOOP Teste

Nome	Campanha	DMG (m)	t (s)	VFM (m/s)
Bom Jesus da Lapa	01	34,7	740	0,047
	02	33,9	973	0,035
	03	60,4	1205	0,050
Gameleira	01	31,1	521	0,060
	02	9,7	623	0,016
	03	80,2	750	0,107
Paratinga	01	78,4	572	0,137
	02	25,9	782	0,033
	03	108,0	1084	0,100
Ibotirama	01	68,7	746	0,092
	02	27,0	682	0,040
	03	50,0	1142	0,044

Tabela 21 - Continua

Nome	Campanha	DMG (m)	t (s)	VFM (m/s)
Morpará	01	25,4	964	0,026
	02	12,0	809	0,015
	03	44,2	1132	0,039
Boqueirão	01	7,2	182	0,040
	02	7,3	333	0,022
	03	5,6	356	0,016
Fazenda Porto Limpo	01	10,9	277	0,039
	02	6,8	425	0,016
	03	6,9	325	0,021

Tabela 21 - Conclusão

Após a realização das medições de vazão e dos diferentes procedimentos visando sanar o EFM foi possível definir os valores das vazões ADP BT ajustados pelas diferentes técnicas de correção.

Os resultados das vazões corrigidas estão apresentados na Tabela 22.

Tabela 22 – Medições ADP BT – Correção do EFM

Nome	Campanha	Vazões ADP BT Corrigidas (m³/s)			
		SS	SSM	SPS	LOOP
Bom Jesus da Lapa	01	7306	6655	6440	6251
	03	2863	2483	2229	2354
Gameleira	01	6919	6428	9166	6224
	03	4418	4012	3825	4032
Paratinga	01	7212	6646	8189	6678
	03	4414	3904	3335	3928
Ibotirama	01	7083	6668	7422	6382
	03	4249	3674	3784	3575
Morpará	01	6815	6044	6150	5575
	03	4449	3928	3487	3678

Dada a similaridade entre os métodos de medição Molinete e ADP GPS, conforme resultados da Tabela 10, as vazões ADP BT corrigidas foram comparadas apenas aos valores das medições de Molinete.

Na Tabela 23 são apresentados os valores das diferenças relativas entre as medições de Molinete e dos valores de vazão calculados considerando os diferentes métodos de correção do EFM.

Tabela 23 – Medições ADP BT – Diferenças Relativas Molinete x Correção EFM

Nome	Campanha	Diferenças Relativas (%)			
		Mol x SS	Mol x SSM	Mol x SPS	Mol x LOOP
Bom Jesus da Lapa	01	-6,8%	2,7%	5,9%	8,3%
	03	-12,3%	2,6%	12,5%	7,0%
Gameleira	01	-4,8%	2,6%	-38,8%	5,7%
	03	-6,9%	2,9%	7,4%	2,4%
Paratinga	01	-15,5%	-6,4%	-31,2%	-7,0%
	03	-11,2%	1,7%	16,0%	1,1%
Ibotirama	01	-10,8%	-4,3%	-16,1%	0,1%
	03	-14,6%	0,9%	-2,1%	3,6%
Morpará	01	-17,1%	-3,8%	-5,6%	4,2%
	03	-14,5%	-1,1%	10,3%	5,4%
	Média	-11,4%	-0,2%	-4,2%	3,1%
	DP	4,1%	3,5%	18,9%	4,3%

A análise dos valores apresentados na Tabela 23 indica que os métodos de correção SSM e LOOP apresentaram os melhores resultados.

O método SS utiliza o valor da VFM referente ao ponto de maior valor da velocidade da água, verificado ao longo da seção transversal do rio. Desta forma, utiliza um valor único de VFM para representar toda a seção transversal, condição que acaba por se afastar do comportamento médio da seção, gerando superestimação dos valores corrigidos de vazão. Os valores das vazões obtidas com Molinete foram inferiores aos resultados ADP BT corridos pelo método SS.

Com base nos resultados apresentados nas medições corrigidas, o método SS deve ser utilizado apenas para verificar a ocorrência do Fundo Móvel, uma vez que expressa uma condição próxima do efeito máximo, não devendo ser utilizado para correção das vazões medidas com ADP BT.

O método SSM melhora os resultados apresentados pelo SS, uma vez que utiliza um número maior de verticais para determinar o valor de VFM, que tende a se aproximar do valor médio de velocidade de transporte de sedimentos junto ao leito, verificado na seção transversal. Entretanto, esse método pode ser menos produtivo em rios que apresentem dificuldades para ancoragem de embarcações.

A realização do perfilamento estático para tomada de VFM acrescenta um tempo considerável às medições de vazão, uma vez que, de acordo com Gamaro (2003a),

o perfilamento deve acontecer com tempo mínimo de cinco minutos por vertical de amostragem, com perfilagem de pelo menos cinco verticais, além do tempo necessário para proceder com a ancoragem da embarcação.

Para um rio com largura de 100 metros, por exemplo, numa medição de vazão com ADP M9, com a realização de cinco travessias e com velocidade da água por volta de 0,5 m/s, o tempo total gasto no processo de aquisição da vazão seria da ordem de dez minutos, considerando velocidade média de deslocamento do barco igual a 1,0 m/s. O processo de ancoragem da embarcação para determinação da VFM, em cinco verticais, já demandaria no mínimo três vezes mais tempo. Para rios de grande porte como o São Francisco esta relação pode ser ainda mais desfavorável.

Apesar das dificuldades práticas para sua realização, o método (SSM) apresentou um valor médio de diferença relativa das vazões muito pequeno, igual a -0,2%, somado também a um valor de desvio padrão reduzido, menor que 4%, indicando a eficiência do método.

O valor limite de $\pm 5,0\%$ de afastamento em relação às medições feitas com Molinete, condição de igualdade entre as medições, conforme indicações da ANA (2012), foi obtido em todas as medições com ADP BT corrigidas pelo método SSM, com exceção da estação de Paratinga, na primeira campanha, quando o a vazão corrigida superou o resultado do Molinete em 6,4%.

O método SPS utiliza procedimento de campo similar ao SSM, fazendo uso de perfilagens com o barco ancorado, porém procede com o cálculo da medição de vazão conforme o Método do Molinete. Em cada vertical, a velocidade média da água é obtida com uso do Perfilador acústico. Caso seja verificada ocorrência de Fundo Móvel, caracterizada por um deslocamento relativo barco / leito (DMG se afastando do valor nulo), a velocidade da água é acrescentada da parcela referente ao EFM.

Desta forma, em cada seção de medição deve ser utilizado um número mínimo de verticais para representar a conformação do leito, bem como a variação da velocidade de escoamento da água ao longo da seção transversal, tal qual o método do molinete, além da velocidade de transporte dos sedimentos junto ao leito.

As medições realizadas com molinete fazem uso de pelo menos vinte verticais de amostragem. Desta forma, a utilização do método SPS, obedecendo ao número

mínimo de verticais, acaba por limitar uma das grandes vantagens do uso dos Perfiladores Acústicos, que é a velocidade das medições.

Em rios onde é necessário ancorar o barco (rios de grande largura) se perde muito tempo com o processo. Outro ponto importante a ser verificado é a questão da maior segurança de realizar a medição de forma dinâmica (com travessias contínuas, sem ancorar o barco), facilidade relevante em rios no período de cheia, que acaba sendo perdida na execução do método SPS.

A realização do método com um número reduzido de verticais, semelhante ao desenvolvido nesta pesquisa, onde foram amostradas somente cinco verticais em cada seção de medição, pode não ser adequado, principalmente em rios onde o escoamento não ocorre de maneira uniforme, com grandes variações de velocidade de escoamento da água, bem como variações da profundidade ao longo da seção transversal.

O método de correção SPS vem sendo usado atualmente como um procedimento de medição de vazão, vertical por vertical. A Sontek, fabricante do ADP M9, equipamento utilizado no estudo, lançou o “Software” “*Stacionary*”, utilizado para realização de medição de vazão, com uso do ADP fazendo perfilamento estático, com a medição de vazão sendo calculado de forma similar ao molinete. O Software é recomendado como uma das soluções para utilização em rios com ocorrência de fundo móvel.

Porém, cabe ressaltar que o ADP M9 se trata de um equipamento muito caro, em comparação com o molinete e o seu uso de forma similar ao equipamento mecânico, onde a medição de vazão é realizada de forma estática, vertical por vertical, pode prejudicar a relação custo x benefício, se contrapondo às vantagens de utilização dos equipamentos acústicos.

O Método do LOOP se aproximou do SSM e também proporcionou reduções significativas das diferenças relativas (Molinete x ADP BT), fazendo com que as medições destes dois tipos de referências, após a correção, não se afastassem mais que $\pm 10\%$.

Durante a travessia, desenvolvida em formato de oito, ao longo da seção transversal, é difícil manter a velocidade do barco sem que haja oscilações bruscas, ou até mesmo fazer com que o deslocamento do barco não ocorra com velocidade

muito superior à velocidade da água. Nos trechos onde se desenvolve o deslocamento do barco contra a correnteza do rio, para possibilitar o traçado em formato de oito, é por muitas vezes necessário forçar o motor do barco para manter o trajeto. Ressalta-se que em rios de pequena largura é difícil proceder com o trajeto no formato do LOOP.

Ao utilizar o motor de popa, os maiores problemas podem estar relacionados ao controle da velocidade do barco, necessitando de um profissional com experiência para manobrar a embarcação ao longo do trajeto.

6.3.2 Teste Estatístico de Igualdade – Vazões ADP BT Corrigidas

Para reforçar a análise das diferenças relativas de vazão entre o método do Molinete e as medições ADP BT corrigidas, foi realizado teste estatístico de igualdade, nas medições do rio São Francisco, nas campanhas 01 e 03 com comparações entre os grupos Molinete x SS, Molinete x SSM, Molinete x SPS e Molinete x LOOP.

A Hipótese nula admitiu a semelhança estatística entre os métodos e o resultado dos testes pode ser verificado na Tabela 24.

Tabela 24 – Teste Estatístico de Igualdade – Medições de Vazão (ADP BT) Corrigidas

Comparação	Parâmetros do Teste t								
	Dif _(méd) (m ³ /s)	Dpad (m ³ /s)	n	gl	t	α	p - valor	2 x (p – valor)	Hip
Mol x SS	558,2	256,0	10	9	6,895	0,05	<0,0005	<0,001	H1
Mol x SSM	21,3	211,7	10	9	0,318	0,05	>0,25	>0,5	H0
Mol x SPS	388,3	1103,1	10	9	1,113	0,05	0,14	0,28	H0
Mol x LOOP	146,8	266,1	10	9	1,745	0,05	0,062	0,124	H0

O teste estatístico indica que as vazões da correção SS continuam a ser consideradas estatisticamente diferentes das vazões obtidas com Molinete. Já as medições Molinete x ADP BT passaram a ser consideradas estatisticamente iguais, após correção das medições ADP BT pelos métodos SSM, SPS e LOOP.

No caso do método SPS a condição de igualdade estatística, definida como verdadeira em termos médios, para o nível de significância adotado no teste, é limitada devido ao valor elevado do desvio padrão das diferenças de vazão Molinete x SPS.

A análise das diferenças médias e dos desvios verificados após a correção indica que os métodos mais apropriados de correção são o SSM e o LOOP.

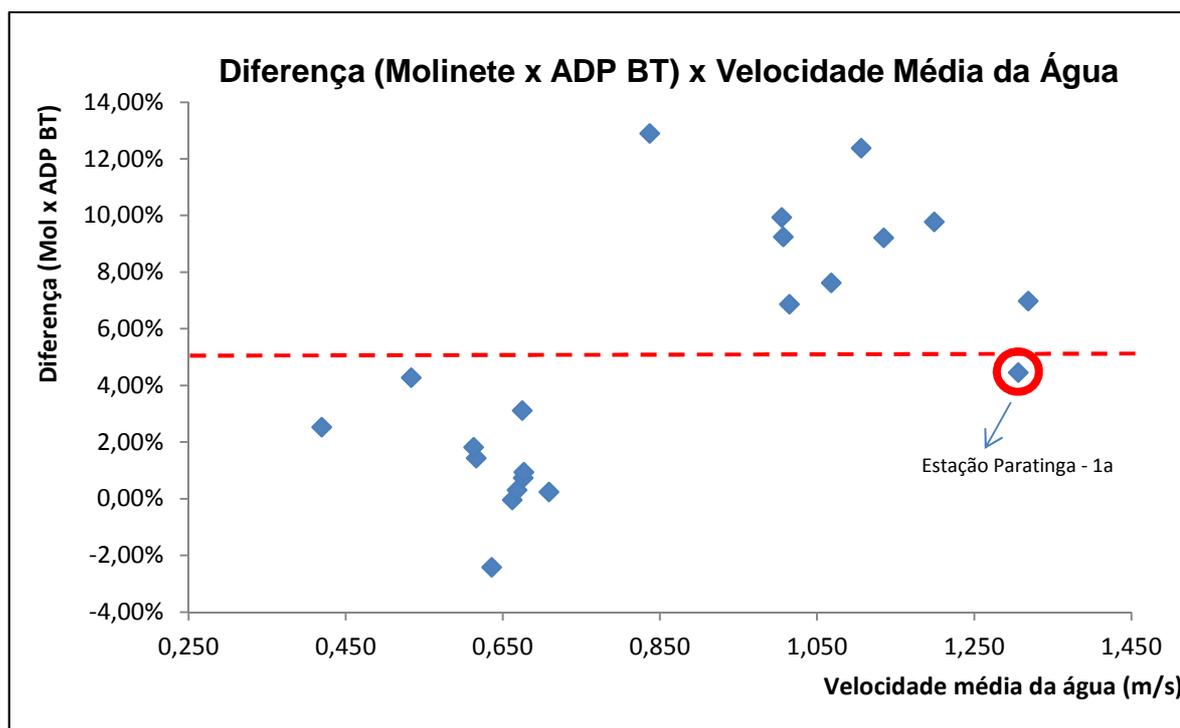
6.4 Condições de escoamento favoráveis à ocorrência de EFM

As condições de escoamento (Velocidade Média de Escoamento da Água, Velocidade Média de Escoamento da Água junto ao Fundo, Velocidade Crítica, Velocidade do Fundo Móvel, Vazão, Granulometria e Descarga de Fundo) foram comparados com os resultados das medições de vazão.

6.4.1 Velocidade da Água

Os valores médios de Velocidade de Escoamento da Água foram comparados com a diferença observada entre os métodos de medição de vazão (Molinete x ADP BT), conforme apresentado na Figura 34

Figura 34 – Diferença (Molinete x ADP BT) x Velocidade Média da Água



A observação dos pontos plotados no gráfico permite verificar a ocorrência de dois grupos distintos. O primeiro corresponde às medições do rio São Francisco na campanha de seca, juntamente com as medições dos rios Preto e Grande nas três campanhas. No segundo grupo estão as medições da campanha de cheia do rio São Francisco, no período de cheia da bacia.

O limite de 5%, que caracteriza a igualdade entre diferentes medições de vazão só foi ultrapassado nas medições do segundo grupo. Onde as medições com molinete apresentaram resultados superiores ao ADP BT.

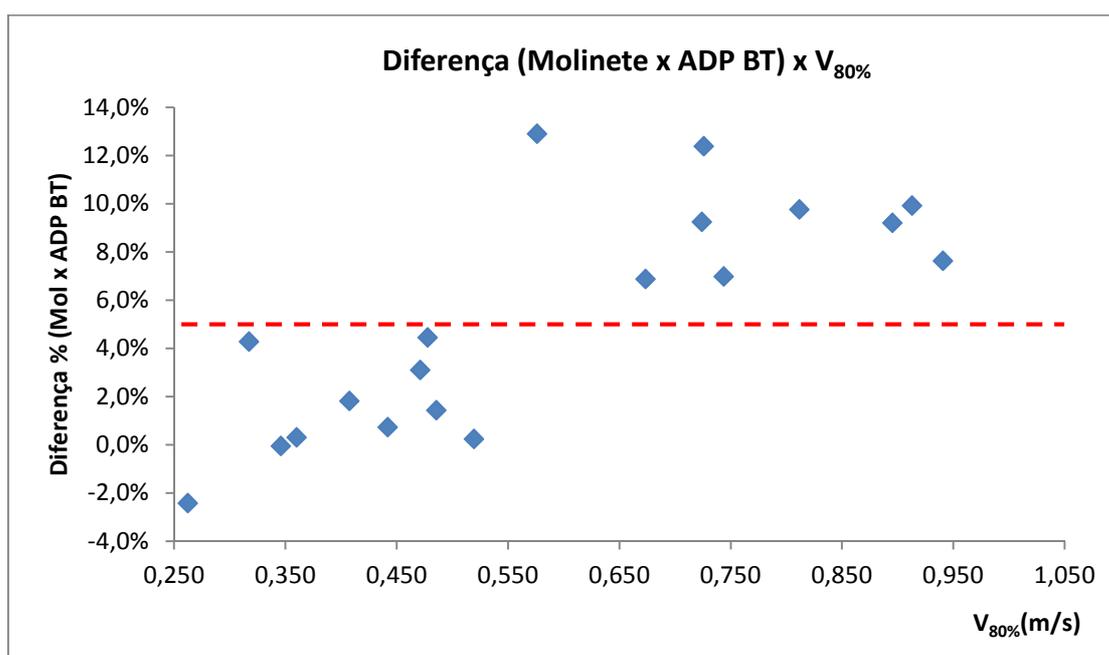
O valor máximo da velocidade média de escoamento da água que não gerou diferenças superiores a 5% entre as medições Molinete x ADP BT, foi de 0,709 m/s, correspondente à estação Fazenda Porto Limpo, na terceira campanha de medição.

Há um ponto discrepante na Figura 34, que foge do comportamento apresentado pelos dois grupos. Na estação Paratinga, na primeira campanha de medição a velocidade média de escoamento da água verificada foi de 1,3m/s, gerando uma diferença Molinete x ADP BT de apenas 4,45%.

Com relação ao grupo de medições com diferenças superiores a 5% entre os métodos Molinete x ADP BT o menor valor de velocidade média da água verificado foi de 0,837 m/s, na estação Bom Jesus da Lapa, na terceira campanha de medição.

Além da comparação com a velocidade média de escoamento da água, os valores de diferenças de vazão entre os métodos Molinete x ADP BT foram comparados com as velocidades médias de escoamento da água junto ao leito do rio, obtidas com o molinete, em cada medição, conforme Figura 35.

Figura 35 – Diferença entre as vazões (Molinete x ADP BT) x $\bar{V}_{80\%}$



Na Figura 35 é possível perceber a tendência de crescimento das diferenças entre os métodos de medição de vazão em função da elevação dos valores de velocidade da água junto ao leito. Esta condição é compatível com a ocorrência do EFM que tende a ser acentuada com o aumento da velocidade da água na região próxima ao leito do rio, favorecendo o transporte de sedimento de fundo.

A maior velocidade de escoamento da água junto ao fundo, que não provoca diferenças superiores a 5% entre os diferentes métodos de medição de vazão é igual a 0,520 m/s, referente à terceira campanha de medição, na estação Fazenda Porto Limpo.

Já o valor mínimo de velocidade da água junto ao fundo, quando o limite de 5% entre os métodos de medição foi superado, é igual a 0,576 m/s, sendo cerca de 15% superior à condição máxima de velocidade da água junto ao leito que não causa o EFM.

A estação de Paratinga, que na primeira campanha de medição apresentou resultados incompatíveis entre a velocidade média de escoamento da água (valor igual a 1,3m/s) e a intensidade do EFM, representada pela diferença entre os métodos de medição de vazão Molinete x ADP BT, (com apenas 4,45% de diferença), pode ter seu comportamento explicado, em função da baixa velocidade de escoamento da água junto ao leito do rio, com valor igual a 0,478 m/s (35% do valor da velocidade média da seção).

6.4.2 Vazão

A realização das campanhas de medição de vazão permitiu verificar que a ocorrência do EFM se deu apenas nas estações do rio São Francisco, nas campanhas 01 e 03, referentes ao período de cheia da Bacia.

Nas três campanhas de medição de vazão não foi possível verificar a ocorrência de EFM nas medições realizadas nas estações do Boqueirão (Rio Grande) e Fazenda Porto Limpo (Rio Preto).

Na estação Boqueirão, o maior valor de vazão medido nas três campanhas corresponde à 332 m³/s. Na estação Fazenda Porto Limpo o máximo valor de vazão foi de 144 m³/s, ambos verificados na última visita ao campo.

Na estação de Boqueirão, a vazão média diária de 332 m³/s, tem permanência de 15%, verificada através da série de dados disponíveis no HIDROWEB – ANA. Desta forma, esta vazão só é igualada ou superada em 15 % do tempo.

Para a estação Fazenda Porto Limpo a vazão de 144 m³/s tem permanência ainda menor, sendo igualada ou superada em apenas 10% do tempo.

A não ocorrência do EFM durante as campanhas de medição, nas estações de Boqueirão e Fazenda Porto Limpo, não refutam a possibilidade de existência do fenômeno para vazões superiores às medidas em campo.

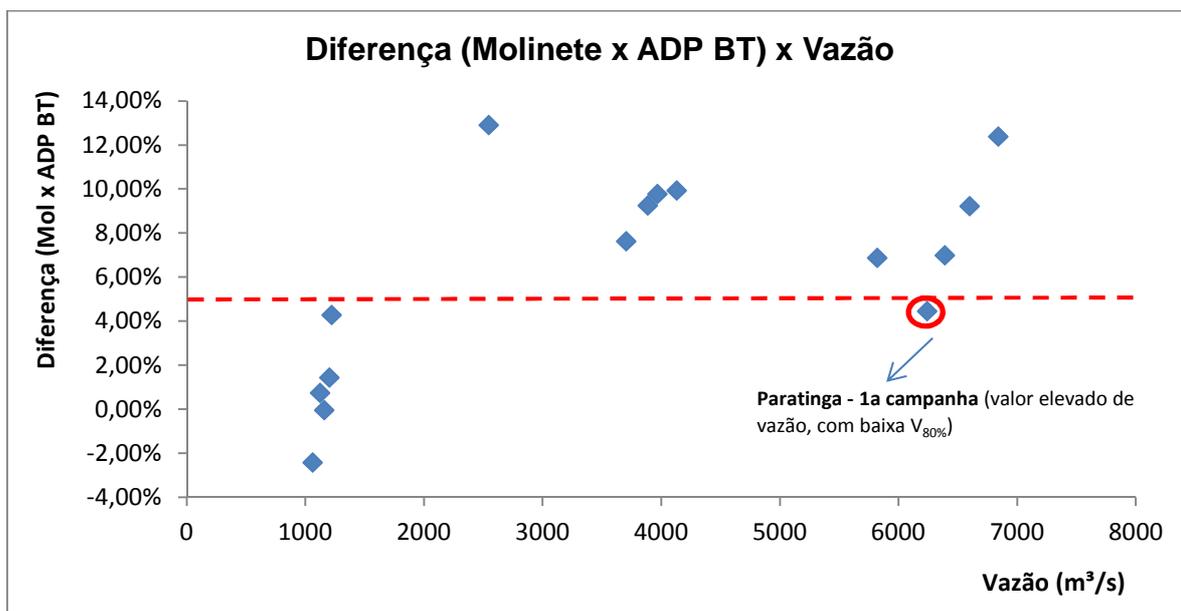
Com base na análise da permanência das vazões médias diárias, o EFM nas duas estações consiste num problema com pequena possibilidade de ocorrência, restrita apenas aos períodos de vazões mais elevadas nas estações.

Para as estações do rio São Francisco, onde as medições das campanhas 01 e 03 (cheia) apresentaram diferenças, com ADP BT fornecendo menores valores de vazão em comparação aos demais métodos, foi possível construir o gráfico das Diferenças entre as vazões (Molinete x ADP BT) contra as Vazões medidas em campo, conforme Figura 36.

O grupo de medições referente à segunda campanha teve valor médio de vazões em torno de 1.100 m³/s. Nesta condição, referente ao período de seca da bacia, não foi verificada ocorrência significativa do EFM.

O menor valor de vazão que produziu diferenças superiores a 5% entre os métodos de medição Molinete e ADP BT foi de 2.549 m³/s, observado na estação de Bom Jesus da Lapa, na terceira campanha.

Figura 36 – Diferença (Molinete x ADP BT) x Vazão – Estações do rio São Francisco



Analisando a série histórica de vazões médias diárias da estação de Bom Jesus da Lapa é possível verificar que o referido valor de vazão tem uma permanência média de 30% do tempo. Porém, considerando apenas o período de cheia da bacia, a vazão de 2.549 m³/s é igualada ou superada com uma frequência de 85%.

Outro ponto importante a ser verificado é que na estação Gameleira, na segunda campanha, a vazão de 1.224 m³/s resultou na diferença de 4,28% entre os métodos Molinete e ADP BT, próximo ao limite de 5%, demonstrando a necessidade de novas medições de vazão na faixa de transição de cotas baixas para médias, o que pode indicar uma frequência ainda maior de ocorrência do EFM.

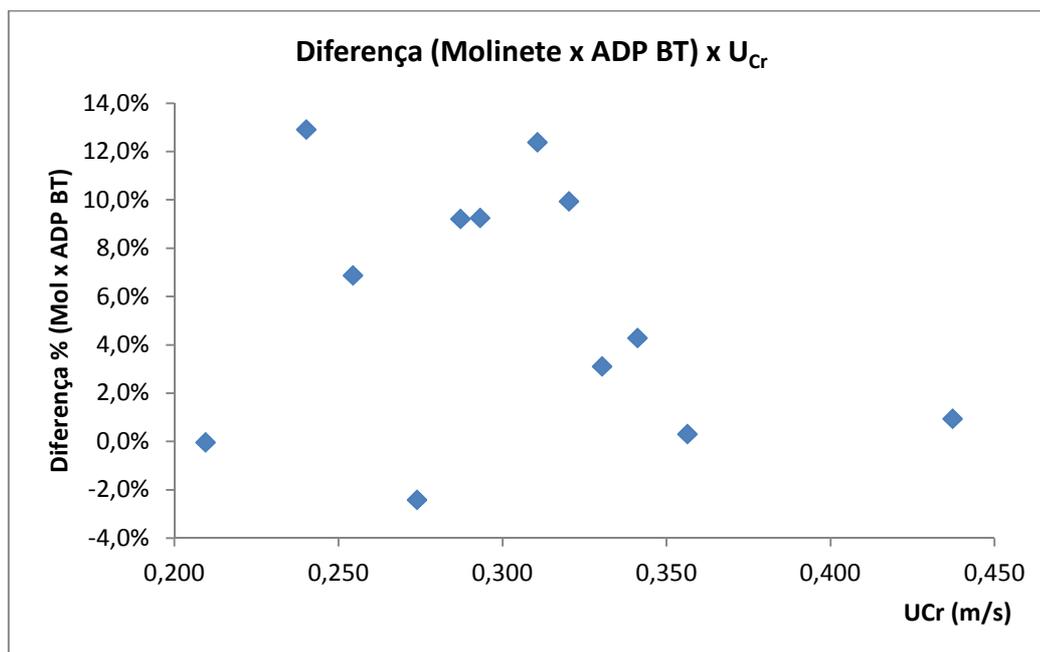
Esses resultados indicam a necessidade de reforçar os procedimentos para detecção e correção do efeito do fundo móvel, uma vez que a utilização do ADP em períodos de cheia é de fundamental importância, permitindo a realização das medições com maior segurança e agilidade.

6.4.3 Velocidade Crítica e Velocidade do Fundo Móvel

Para as estações de Bom Jesus da Lapa, Gameleira e Morpará, no rio São Francisco e Boqueirão no rio Grande, onde foi realizada coleta de sedimento de fundo, foi possível determinar os valores de Velocidade Crítica - U_{Cr} .

Os valores de U_{Cr} foram comparados com as diferenças entre as medições Molinete x ADP BT, conforme apresentado no gráfico a seguir.

Figura 37 – Diferença (Molinete x ADP BT) x U_{Cr}

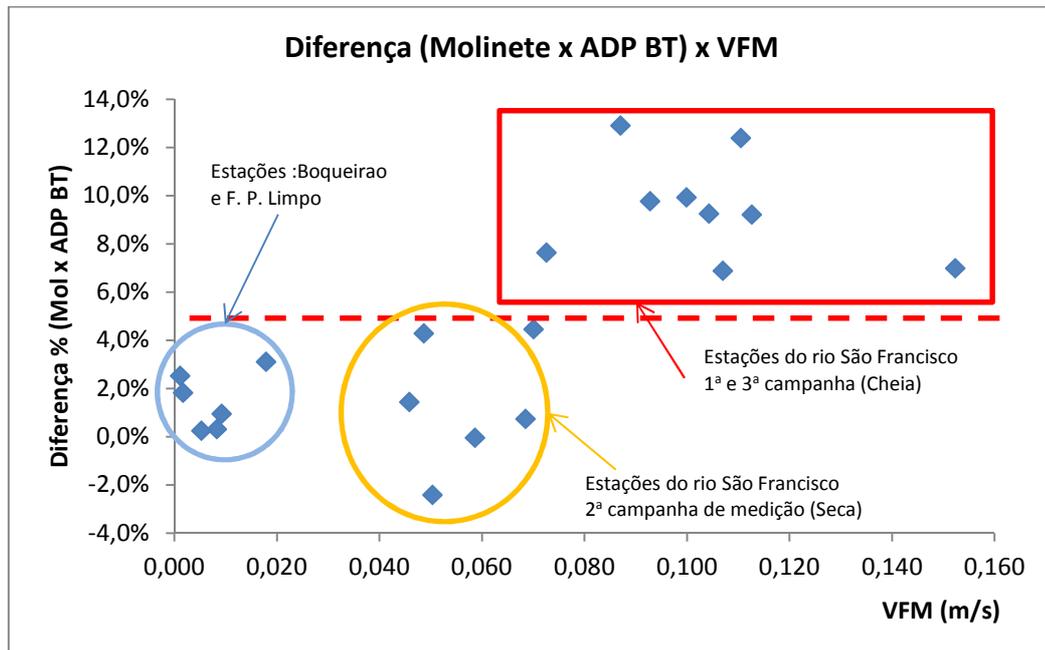


Não é possível observar uma relação / tendência definida entre as duas variáveis. Este resultado pode ser explicado com base na definição da Velocidade Crítica, que representa apenas a condição mínima de velocidade que deve ser superada pelo escoamento da água, permitindo o início da ocorrência do transporte de sedimentos.

Desta forma, foram utilizados os valores médios de Velocidade do Fundo Móvel, medidos com o ADP M9 no teste do barco ancorado SSM, na etapa de correção das vazões ADP BT em todas as estações do estudo. Estes valores indicam de forma direta a intensidade do transporte de sedimento e foram comparados com as diferenças observadas entre as medições Molinete x ADP BT e estão apresentados na Figura 38.

Um primeiro grupo de medições corresponde às estações Boqueirão e Fazenda Porto Limpo, nas três campanhas de medição, resultando num total de seis pontos no gráfico. O valor máximo de VFM verificado neste conjunto é igual a 0,018 m/s, gerando uma diferença Molinete x ADP BT de 3%.

Figura 38 – Diferença (Molinete x ADP BT) x VFM



O segundo grupo de medições é composto pelas estações do rio São Francisco, na segunda campanha, período de seca da bacia, com um total de cinco pontos no gráfico. Neste conjunto o maior valor de VFM diz respeito à estação Paratinga, com 0,069 m/s. A maior diferença Molinete x ADP BT obtida nesta campanha é igual a 4,3%, na estação Gameleira.

Um terceiro grupo de medições pode ser verificado, correspondendo às estações do rio São Francisco, na primeira e terceira campanha de medição, com um total de nove pontos no gráfico, todos com diferença Molinete x ADP BT com valores superiores a 5%.

Nas medições de vazão onde a diferença entre os resultados obtidos com Molinete e ADP BT foi considerável, acima de 5%, o menor valor da velocidade de fundo verificada foi de 0,073 m/s, na estação de Ibotirama, na terceira campanha. Este valor representa cerca de 7% da velocidade média de escoamento da água.

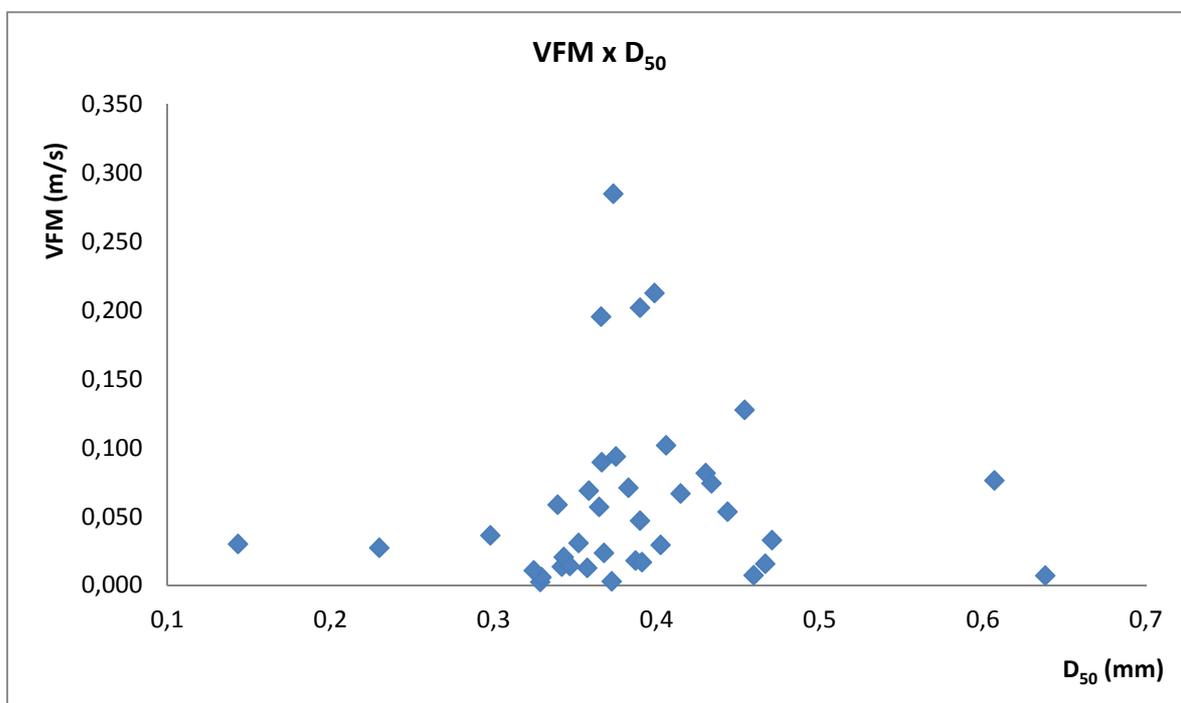
A estação de Paratinga na primeira campanha de medição, único ponto discrepante do terceiro grupo, apresentou valor de VFM igual a 0,070 m/s, correspondendo ao máximo valor de VFM para diferenças Molinete x ADP BT inferiores a 5%.

6.4.4 Diâmetros Característicos D_{50} e D_{90}

Com a coleta de sedimentos realizada nas campanhas 2 e 3, nas estações Bom Jesus da Lapa, Gameleira, Morpará e Boqueirão, foi determinado o valor dos diâmetros característicos D_{50} e D_{90} em cada vertical de amostragem, listados na Tabela 14.

Esses valores pontuais de granulometria foram comparados com a VFM verificada em cada vertical, conforme apresentado nas Figuras 39 e 40.

Figura 39 – Velocidade de Fundo Móvel x Diâmetro característico - D_{50}



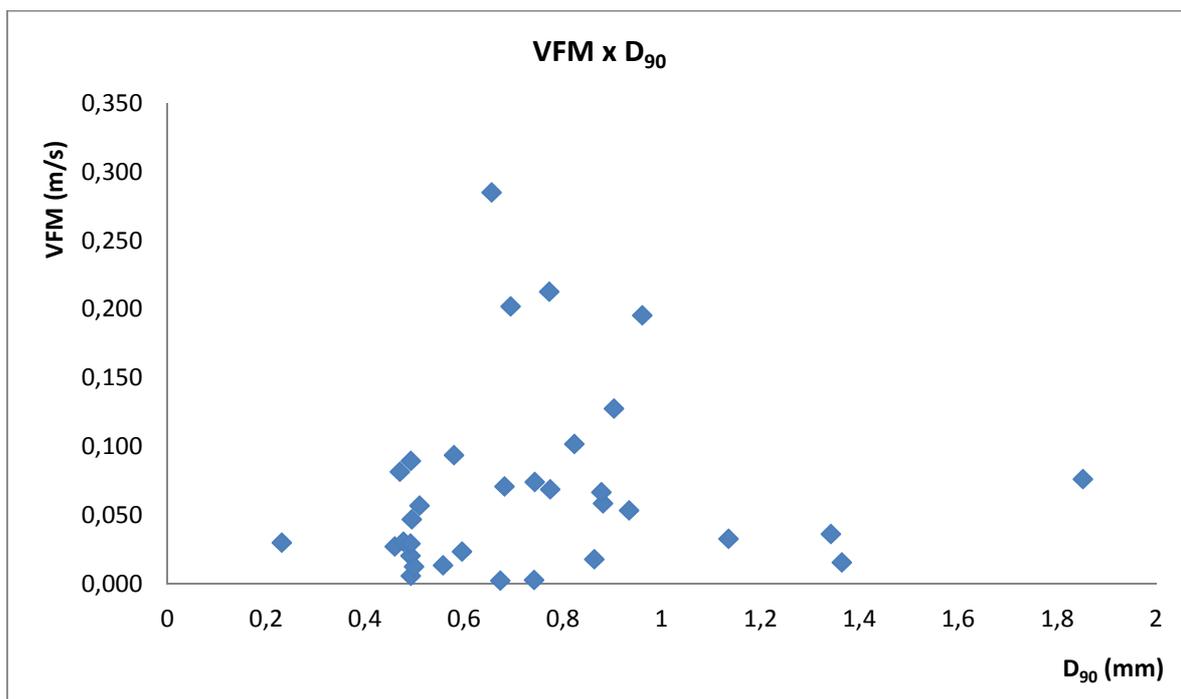
Os valores mais elevados de D_{50} (4,3 e 6,2 mm) e D_{90} (de 8,0 a 16,1 mm) observados nas verticais amostradas foram obtidos na estação de Boqueirão, no rio Grande.

Para esses pontos, os resultados de VFM foram próximos do valor nulo. Estes pontos não estão plotados no gráfico.

Nas demais verticais, os diâmetros variaram sem ultrapassar o limite de 2 mm, que caracteriza o material como areia. O D_{50} variou de 0,14 a 0,61 mm, com média igual a 0,38 mm.

Os valores do diâmetro característico D_{90} estiveram na faixa de 0,2 a 1,8 mm, com valor médio de 0,76 mm.

Figura 40 – Velocidade de Fundo Móvel x Diâmetro característico - D_{90}



Pode ser verificado um número grande de pontos próximos ao valor da média, para os dois diâmetros característicos. Porém os valores de VFM apresentam grande variação (de 0,01 a 0,30 m/s), indicando não haver relação direta que seja função unicamente do tamanho das partículas do material de leito.

6.4.5 Descarga Sólida de Fundo

O Cálculo da Descarga Sólida de Fundo realizado para as estações de Bom Jesus da Lapa, Gameleira, Morpará e Boqueirão foi realizado pelo Método de Yang (1983).

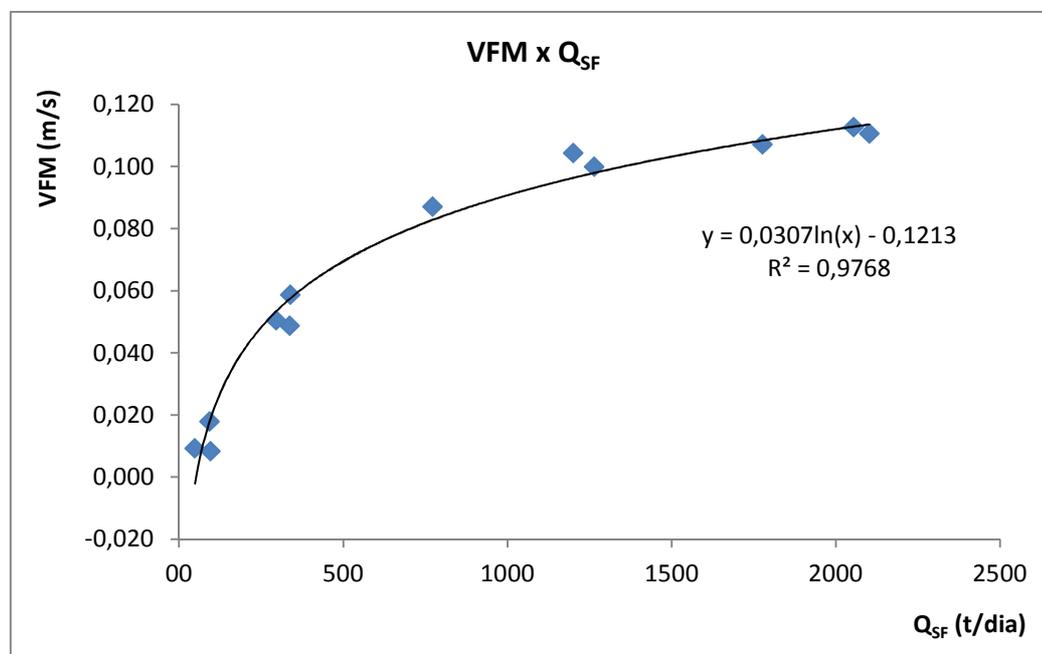
A Figura 41 apresenta a relação entre a Descarga Sólida de Fundo (Q_{SF}) e a Velocidade do Fundo Móvel. No gráfico, é possível verificar o ajuste de linha de tendência, seguindo modelo logarítmico, com coeficiente de regressão maior que 0,95.

O menor valor da Velocidade de Fundo Móvel que causa EFM nas medições de vazão ADP BT é igual a 0,073 m/s, conforme apresentado no item anterior. Este valor corresponde à Descarga Sólida de Fundo da ordem de 550 t/dia.

A Descarga de Fundo é uma variável que incorpora os valores de velocidade média de escoamento da água na seção transversal e junto ao leito do rio, bem como as características granulométricas do material de fundo. Desta forma, os resultados

obtidos de grande correlação com as Velocidades de Fundo Móvel verificadas durante as campanhas de campo já eram esperados.

Figura 41 – Velocidade de Fundo Móvel x Descarga Sólida de Fundo - Q_{SF}



A realização da análise das condições de escoamento nas estações do rio São Francisco, permitiu construir a Tabela 25, apresentada a seguir, com a listagem dos valores mínimos de velocidade média da água, na seção e junto ao leito, velocidade de fundo móvel, vazão e descarga de fundo, observados na ocorrência de EFM significativo, superior a 5%.

Tabela 25 – Valores Mínimos dos Parâmetros de Escoamento para ocorrência do EFM no rio São Francisco

EFM > 5%	$V_{\text{água}}$ (m/s)	$\bar{V}_{80\%}$ (m/s)	VFM (m/s)	Q (m^3/s)	Q_{SF} (t/dia)
	0,837	0,576	0,073	2.549	550

Para EFM afetando os resultados das medições ADP BT acima de 5%, o menor valor da Velocidade média de escoamento da água foi de 0,837 m/s. A $\bar{V}_{80\%}$ teve valor correspondente a 70% de $V_{\text{água}}$. O menor valor de VFM verificado correspondeu a 9% de $V_{\text{água}}$ e 13% de $\bar{V}_{80\%}$. A menor vazão observada para EFM superior a 5% foi de 2.549 m^3/s e a descarga de fundo teve o valor de 550 t/dia.

7 CONCLUSÃO

De acordo com a proposta desta pesquisa, que teve como objetivo principal a análise do Efeito de Fundo Móvel em medições de vazão com perfiladores acústicos, foram desenvolvidos os procedimentos metodológicos, com resultados que permitiram a obtenção das conclusões apresentadas a seguir.

As medições de vazão realizadas com o ADP GPS apresentaram resultados semelhantes às medições convencionais - Molinete, em praticamente todas as estações do estudo, nas três campanhas de medição de vazão, representativas do período de seca e cheia da bacia, com exceção da estação de Bom Jesus da Lapa, na segunda campanha, devido a falhas de recepção do sinal do GPS.

Os resultados obtidos pelo ADP BT se mostraram compatíveis com os demais métodos de medição de vazão na campanha 02, período de seca da bacia, em todas as estações do estudo; e nas estações do rio Grande e Preto em todas as campanhas de medição.

Os resultados de vazão obtidos pelo ADP BT se mostraram inferiores aos demais métodos de medição para as condições de escoamento verificadas nas campanhas 01 e 03, desenvolvidas no período de cheia da bacia, indicando a ocorrência do EFM apenas nas estações do rio São Francisco.

As medições acústicas ADP BT e ADP GPS apresentaram, para as estações do estudo, valores semelhantes para as variáveis (Área, Largura e Profundidade Média), indicando que as medições de batimetria não são afetadas pelo EFM.

As diferenças para os valores de (Área, e Profundidade Média) observadas em comparação ao método convencional (Molinete) podem ser resultado do maior número de verticais de amostragem de profundidade realizadas no método acústico com travessias dinâmicas e uma taxa de aquisição de dados de uma vertical por segundo, gerando um melhor detalhamento do leito do rio, em comparação com a batimetria simplificada realizada pelo método convencional, com apenas vinte verticais por medição.

As vazões obtidas pelo método acústico ADP BT, menores em comparação aos demais métodos, nas estações do rio São Francisco, no período de cheia da bacia, campanha 01 e 03, são decorrentes, basicamente, da determinação

subdimensionada da velocidade da água, em função da ocorrência do EFM, uma vez que as demais grandezas (área, largura e profundidade) são bastante semelhantes entre os métodos de medição.

O EFM, afetando os resultados das medições acústicas ADP BT nas estações do rio São Francisco, no período de cheia da bacia, reforça a necessidade de aplicação de procedimentos para mensuração do EFM e conseqüente correção das vazões obtidas pelo ADP BT.

Os Métodos de correção do EFM que apresentaram os melhores resultados no estudo são: SSM e LOOP.

O método SS deve ser utilizado apenas para verificação da ocorrência do EFM. A aplicação deste método apresentou resultados de vazão ADP BT corrigidas muito elevados, não sendo condizentes com os demais métodos de medição de vazão que não estão submetidos ao EFM.

O Método SSM pode triplicar o tempo médio de execução das medições acústicas de vazão. Porém, os resultados de correção obtidos no método justificam a sua aplicação em rios que apresentem o EFM.

O método SPS, utilizado neste estudo com apenas cinco verticais, não produziu resultados satisfatórios de correção do EFM. O método SPS deve ser utilizado com um número de verticais similar à quantidade mínima definida no método convencional (pelo menos vinte verticais).

O ADP M9 se trata de um equipamento muito caro, em comparação com o molinete e o seu uso de forma similar ao equipamento mecânico, conforme proposto pelo método SPS, pode prejudicar a relação custo x benefício, se contrapondo as características de facilidade, velocidade e segurança das medições, principais vantagens de utilização dos equipamentos acústicos em relação aos Molinetes.

O método do LOOP produziu resultados satisfatórios de correção, porém a sua realização pode ser dificultada em função das características dos rios (largura e velocidade da água) e da falta de barqueiro experiente para desenvolver as travessias.

Mesmo com a possibilidade de utilização do ADP GPS para realização de medições de vazão, os testes para detecção e os procedimentos de correção do EFM devem

ser desenvolvidos, permitindo obter as correções das medições ADP BT, uma vez que não se tem garantia da qualidade do sinal ADP GPS, devido aos diferentes fatores que podem interferir na recepção do sinal dos satélites durante as medições.

Como a verificação da qualidade dos resultados obtidos nas medições de vazão utilizando ADP GPS e ADP BT é realizada de forma detalhada no escritório, na fase de pós-processamento, é necessário proceder com ações de mitigação dos erros associados a cada um dos métodos, no momento de execução das medições.

O Efeito de Fundo Móvel, decorrente do transporte de sedimentos junto ao leito dos rios, se mostrou presente nas medições ADP BT realizadas no período de cheia nas estações do rio São Francisco, que possuem a composição do material de leito composta basicamente por areia média.

Os valores obtidos para a Velocidade Crítica (U_{Cr}), em termos médios, representando os períodos de seca e cheia da bacia se mostram compatíveis com os resultados obtidos nas campanhas de campo, com valores sendo superados pela velocidade da água, indicando a possibilidade de ocorrência de transporte de sedimentos.

A ocorrência significativa do EFM aconteceu na condição onde a razão entre os valores de velocidade de escoamento ($V_{\text{água}}$ e $\bar{V}_{80\%}$) em comparação com a Velocidade Crítica (U_{Cr}) foi superior a duas unidades.

A composição granulométrica de material de fundo verificada na estação Boqueirão não se mostrou favorável à ocorrência do EFM, nas condições de escoamento verificadas nas campanhas de medição desenvolvidas no estudo.

Os resultados de vazão obtidos na estação Boqueirão, do rio Grande e Fazenda Porto Limpo, no rio Preto, apresentando grande semelhança entre os três diferentes métodos de medição em todas as campanhas de campo, não refutam a possibilidade de ocorrência do EFM para valores de vazão superiores aos observados nas campanhas de medição desenvolvidas no estudo, apesar da baixa probabilidade de ocorrência.

Os valores médios de velocidade de escoamento da água nas estações do rio São Francisco foram maiores que os verificados nas estações Boqueirão e Fazenda Porto Limpo. O mesmo comportamento foi observado com relação à velocidade de escoamento da água junto ao leito do rio.

Nas estações do rio São Francisco, a granulometria indicou a ocorrência de areia, predominando na composição do material de leito.

Todos esses fatores favoreceram a ocorrência do EFM nas estações do rio São Francisco.

A análise do EFM, representado pelas diferenças verificadas entre os métodos de medição de vazão (Molinete x ADP BT), apresentou tendência de crescimento em função do acréscimo das vazões nas seções do rio São Francisco, porém a maior relação observada se deu na comparação com a descarga de fundo, uma vez que estava variável incorpora em seu resultado os valores de vazão, velocidades e da granulometria do material de leito do rio.

O EFM é um problema com grande possibilidade de ocorrência nas estações do rio São Francisco, nos períodos de cheia da bacia, onde o uso do ADP apresenta grandes vantagens, seja pela agilidade e segurança na realização das medições, indicando desta forma, a necessidade de se continuar com a investigação da ocorrência do EFM no trecho médio da bacia do rio São Francisco, com a realização de outras campanhas de medição de vazão, em diferentes regimes de escoamento.

Os valores mínimos dos Parâmetros de Escoamento ($V_{\text{água}}$, $\bar{V}_{80\%}$, VFM, Q e Q_{SF}), propícios à ocorrência significativa do EFM, apresentados na Tabela 25, para as estações do rio São Francisco tem apenas caráter indicativo, representando as condições verificadas durante as campanhas de medição realizadas nesta pesquisa.

A realização de novas campanhas de medição, em diferentes níveis de vazão poderá permitir a definição de valores limites desses parâmetros, para cada estação do estudo, aumentando a segurança na indicação das condições mínimas de velocidade, vazão e descarga sólida que favorecem a ocorrência do EFM na bacia.

O desenvolvimento desta pesquisa esteve vinculado ao tempo de duração do mestrado (com prazo máximo de dois anos), limitando o período de realização das campanhas de medição ao intervalo definido pelos meses de janeiro de 2012 a fevereiro de 2013.

Outra limitação da pesquisa diz respeito às estações de medição selecionadas para o estudo. Foram realizadas medições nas estações do Roteiro 09, da Rede Básica Nacional ANA / CPRM, aproveitando a estrutura de operação da rede.

Seria interessante adicionar estações do rio Corrente, que constitui grande afluente do rio São Francisco, no trecho sub-médio da bacia.

Recomenda-se em trabalhos futuros o desenvolvimento de novas campanhas de medição de vazão e análise de material de fundo, possibilitando a obtenção de resultados para outras faixas de vazão, bem como a realização de medições em outras estações da bacia.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Projeto de gerenciamento integrado das atividades desenvolvidas em terra na bacia do São Francisco. Resumo Executivo do Relatório Final. Brasília, DF. ANA/GEF/PNUMA/OEA. 2003.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Plano de Trabalho da Operação da Rede Básica Nacional de Monitoramento Hidrometeorológico. Brasília, DF. ANA. 2012.
- BAGNOLD, R. A. Bed load transport by natural rivers. *Water Resources Research* v13, i2, p. 303–312, 2012.
- BOITEN, WUBBO. Flow measurement structures. In: *Flow Measurement and Instrumentation* v. 13, i. 5–6. p. 203–207. 2002.
- BRASIL. Política Nacional de Recursos Hídricos, Lei 9 433, 8 de janeiro de 1997.
- BRIDGE, J. S. The interaction between channel geometry, water flow, sediment transport and deposition in braided rivers. *Remagnetization and Chemical Alteration of Sedimentary Rocks* v.371, 2012.
- BUNN, S. E.; ARTHINGTON, A. H. Basic principles and ecological consequences of altered flow regimes for aquatic biodiversity. *Environmental Management* Vol. 30 No. 4 pp. 492-507. 2002.
- CALLEDE, J. *et al.* Discharge determination by Acoustic Doppler Current Profilers (ADCP): a moving bottom error correction method and its application on the River Amazon at Óbidos. *Hydrological Sciences Journal*. v. 45, i 6, 2000.
- CARVALHO, N. O. *Hidrossedimentologia prática*. 2ª ed., versão atualizada e ampliada. Rio de Janeiro: Interciência, 2008.
- CARVALHO, T. M. Avaliação do transporte de carga sedimentar no médio rio Araguaia. *Geosul, Florianópolis*, v. 24, n. 47, p 147-160, jan./jun. 2009.
- CASTRO, J. A. G., *et al.* Comparison of Discharge Estimates from ADCP Transect Data with Estimates from Fixed ADCP Mean Velocity Data. In: *HYDRAULIC MEASUREMENTS AND EXPERIMENTAL METHODS SPECIALTY CONFERENCE (HMEM)*, 2002.
- CHANSON, H. Sediment transport mechanisms. Bed-load transport. *The Hydraulics of Open Channel Flow*: London, UK. 1999.
- CHIU, C. L., *et al.* Efficient methods of discharge measurements in rivers and streams based on the probability concept. *Hydrological Process.*, 19. p. 3935–3946. 2005.

COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO FRANCISCO. Plano Decenal de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco – PBHSF (2004-2013). 2004. (CBHSF - Resumo Executivo).

COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO DO VALE DO SÃO FRANCISCO. Caracterização da Bacia do rio São Francisco. CODEVASF. 2011.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. Análises Microbiológicas da água. São Paulo, CETESB. 2002. 131 p.

CZUBA J. A. , OBERG K. Validation of Exposure Time for Discharge Measurements made with Two Bottom-Tracking Acoustic Doppler Current Profilers. California. 2009. (USGS Annual Report).

DEFENDIA, V. K, *et al.* Estimating sediment transport from acoustic measurements in the Venice Lagoon inlets. Continental Shelf Research. V. 30, p 883-893, 2010.

DINEHART R.L., BURAU J.R. Repeated surveys by acoustic Doppler current profiler for flow and sediment dynamics in a tidal river. Journal of Hydrology XX. p.1–21, 2005.

FENTON, J. D., KELLER, R. J. The calculation of streamflow from measurements of stage. 2001. (Technical Report).

FONG, D. A., MONISMITH, S. G. Evaluation of the Accuracy of a Ship-Mounted, Bottom-Tracking ADCP in a Near-Shore Coastal Flow. Environmental Fluid Mechanics Laboratory, Stanford University. Stanford, California, 2004. (Technical Report).

FORREST, J. Standard Operating Procedure for Streamflow Measurement. United States. Environmental Protection Agency. Region 6, Dallas, Texas. 2012. (Technical Report).

GAEUMAN D., JACOBSON R. B. Field Assessment of Alternative Bed-Load Transport Estimators. Journal Of Hydraulic Engineering, 2007.

GAMARO, P. E. M. ADCP: Problema ou Solução. In: HYDROLOGICAL AND GEOCHEMICAL PROCESSES LARG SCALE RIVER BASIN. Manaus, 1999.

GAMARO, P. E. M. Compensações das vazões medidas com ADCP em seções com fundo móvel. In: XV SIMPÓSIO DA ABRH, Curitiba, 2003a.

GAMARO, P. E. M. Avaliação do uso do GPS em medições acústicas Doppler na Itaipu Binacional. In: XV SIMPÓSIO DA ABRH, CURITIBA, 2003b.

GAMARO, P. E. M., MALDONADO, L. H., LIMA, K. A. Avaliação da Descarga de Sedimento de Leito pelo método do Deslocamento de Dunas e Medidores Acústicos Doppler. In: XIX SIMPÓSIO DA ABRH, MACEIÓ, 2011.

GOLTERMAN *et al.* Study of the relationship between water quality and sediment transport. Technical Papers in Hydrology. In: INTERNATIONAL HYDROLOGICAL PROGRAMME. UNESCO. 1983.

GOMES, J., SANTOS, I. Análise comparativa de campanhas de medição de descarga líquida pelos métodos convencional e acústico. In: XIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS. 1999.

GRIFFITHS, G. Intercomparison of an acoustic Doppler current profiler with conventional instruments and a tidal flow model. In: CURRENT MEASUREMENT, PROCEEDINGS OF THE IEEE THIRD WORKING CONFERENCE. Institute of Oceanographic Sciences, England. 2006.

GUNAWAN, B., Using an acoustic Doppler current profiler in a small river. Water and Environment Journal. v. 24, i. 2, p. 147–158. 2010.

HALLIDAY, *et al.* Fundamentos da Física: v. 3, 4a Ed, 1993. 382 p.

HARTE, P. T., KIAH, R. G. Measured river leakages using conventional streamflow techniques: the case of Souhegan River, New Hampshire, USA. Hydrogeology Journal. v. 17, i. 2, p. 409-424, 2009.

HEYMAN, J. F. Statistics of bedload transport over steep slopes: Separation of time scales and collective motion. Geophysical Research Letters. v. 40, i 1, p. 128–133, 2013.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MEIO AMBIENTE. A Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco. Centro de Sensoriamento Remoto. IBAMA - MMA – CSR – CEMAM. 2008. (Relatório Técnico IBAMA).

ITAIPU BINACIONAL. V Curso de medidores de vazão acústico doppler. Foz do Iguaçu-PR: Módulo Básico, 2009. 131 p.

LEEKES, ROBERTS. 2009. The effects of forestry on upland streams - with special reference to water quality and sediment transport. Environmental Aspects of Plantation Forestry in Wales. Grange-over-Sands. In: ITE SYMPOSIUM, 22. NERC/ITE, p. 64-69. 2009.

MEDEIROS, P. C. *et al.* Aspectos conceituais sobre o regime hidrológico para a definição do hidrograma ambiental. Ambi-Agua, Taubaté, v. 6, n. 1, p. 131-147, 2011.

MILLAR, R. C., CHURCH, M. Measurement of Bed Load Velocity using an Acoustic Doppler Current Profiler. J. Hydraul. Eng., 128(5), p. 473–483, 2002.

MOORE, R.D. Introduction to Salt Dilution Gauging for Streamflow Measurement. Streamline Watershed Management Bulletin v. 7. n. 4, 2004.

MUSTEA, M., YUA, K., PRATTB, T., ABRAHAMB, D. Practical aspects of ADCP data use for quantification of mean river flow characteristics; Part II: fixed-vessel measurements. *Flow Measurement and Instrumentation*. v. 15. p. 17–28, 2004.

NAGHETTINI, M., PINTO, E. J. A. *Hidrologia Estatística*. Belo Horizonte: CPRM, 2007. 552 p.

NATIONAL HYDROLOGICAL MONITORING PROGRAMME. *Hydrological Summary for the United Kingdom*. 2009. (NHMP Technical Report).

OBERG, K. *Processing ADCP Discharge Measurements*. p. 28, 2003. (USGS. Training Notes).

OBERG, K., MUELLER, D. Validation of Streamflow Measurements Made with Acoustic Doppler Current Profilers. *Journal of Hydraulics. Eng.* 133: Acoustic Velocimetry for Riverine Environments, p. 1421–1432, 2007.

ONISHI *et al.* Critical review: Radionuclide transport, sediment transport, and water quality mathematical modeling; and radionuclide adsorption/desorption mechanisms., Washington, DC (United States) 2010. (Nuclear Regulatory Commission Technical Report).

PETRIE, J., *et al.* Data evaluation for acoustic Doppler current profiler measurements obtained at fixed locations in a natural river. *Water Resources Research*. 2013.

PLANO DIRETOR PARA O DESENVOLVIMENTO DO VALE DO SÃO FRANCISCO. Diagnóstico sedimentométrico na bacia do rio São Francisco. 1986. (Relatório Técnico PLANVASF).

RAINVILLE, R. C., KASHYAP, S. Improved Estimation of ADCP Apparent Bed-Load Velocity Using a Real-Time Kalman Filter. *J. Hydraul. Eng.* 133. Acoustic Velocimetry for Riverine Environments, p. 1337–1344. 2007.

RAINVILLE, R. C., *et al.* Case study of precision of GPS differential. Correction strategies: Influence on ADCP velocity in discharge estimates. In *Journal of Hydraulic Engineering*, 2006.

RD Instruments. *Acoustic Doppler Current Profilers, Principles of operation: a practical primer*. San Diego – California. P. 36, 1989. (Technical Report).

RD Instruments. *Winriver 2 User Guide*. San Diego - California, 2001. (Technical Report). Disponível em: <http://rdinstruments.com>.

SANTOS, I., *et al.* *Hidrometria Aplicada*. Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento. Curitiba-PR, 2001. 327 p.

SASSI, M. G., *et al.* Discharge estimation from H-ADCP measurements in a tidal river subject to sidewall effects and a mobile bed. *Water Resources Research*. v. 47, i. 6, 2011.

SCOTT E. MORLOCK. Evaluation of Acoustic Doppler Current Profiler Measurements of River Discharge U.S. GEOLOGICAL SURVEY. Water-Resources Investigations. Report 95-4218 Indianapolis, Indiana 1996.

SIMPSON, M. R.; OLTMANN, R. N. Discharge – Measurement System Using an Acoustic Doppler Current Profiler with Applications to Large Rivers Estuaries. USGS Supply Paper 2395: p. 33, 1993.

SONTEK. Acoustic Doppler Profiler (ADPTM) Principles of Operation. Technical Notes: 2000. Disponível em: <http://sontek.com>

SONTEK. Apresentação dos medidores acústicos modelos M9 e S5. Treinamento para usuários dos equipamentos, Itacimirim – BA. 15 slides, 2010.

STELCZER, K. *et al.* Thechnique for indirect estimation of bed sediment load. Sequence os acsition and processing of river sediment. In: WMO/HOMS. Budapest. 1984.

STU, H. The Five Essential Elements of a Hydrological Monitoring Program. StormWater. The Journal for Surface Water Quality Professionals. 2012

STURM, T. W. Open Channel Hydraulics. Second Edition. McGraw Hill. 2010.

SZUPIANY, R. *et al.* Comparison of Fixed - and Moving - Vessel Flow Measurements with an aDp in a Large River. J. Hydraul. Eng. 133, SPECIAL ISSUE: Acoustic Velocimetry for Riverine Environments. p. 1299–1309. 2007.

TUCCI, C. E. M. Organização. Hidrologia – Ciência e Aplicação. 4º Ed. Rio Grande do Sul: ed. UFRGS. 2002, 944pg.

TUNDISI, J. G. Ciclo hidrológico e gerenciamento integrado. Ciência e Cultura: Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência. Campinas-SP, v.55, n. 4, p.31-33, 2003.

UNITED STATE GEOLOGICAL SERVICE. Measurement and Computation of Streamflow: Computation of Discharge. v.2. 1982. (USGS Technical Report).

UNITED STATE GEOLOGICAL SERVICE. Measurement of StreamFlow. 2012. (USGS Technical Report).

VAN RIJN, L. C. Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal areas. Aqua Publications, Netherlands. 1993.

WAGNER, C. R., MUELLER, D. S. Comparison of bottom-track to global positioning system referenced discharges measured using an acoustic Doppler current profiler. Journal of Hydrology . n. 401, p. 250–258, 2011.

WANG, Z. Y., LEE, J. H. W., MELCHING, C. S. River Dynamics and Integrated River Management. Tsinghua University Press. 2013. 600p.

WARSSS – Channel Process: Bedload transport. Watershed Assessment of River Stability & Sediment Supply. United State Environmental Protection Agency. 2009.

YUQIAN, L. Manual on operational methods for the measurement of sediment transport. WMO – n. 686. Secretariat of the World Meteorological Organization. Geneva, Switzerland. 1989.

ZELLWEGER, G. W. Testing and comparison of four ionic tracers to measure stream flow loss by multiple tracer injection. Hydrological Process. v. 8, p. 155–165, 2006.