UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE HIDRÁULICA E SANEAMENTO

**HIDROGRAMAS EXPERIMENTAIS DE ÁREAS ALAGADAS
DA MICRO BACIA DO RIO JACUPIRANGUINHA, BAIXO
RIBEIRA DO IGUAPE, SP.**

Paulino de Almeida Neto

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Programa de pós graduação em
Hidráulica e Saneamento da Escola de
Engenharia de São Carlos, da
Universidade de São Paulo, como
Requisito para o título de Mestre

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Mario Mendiondo

São Carlos – SP
Julho /2007

Dedico esse trabalho aos meus pais, que são os maiores incentivadores da minha vida profissional e os meus maiores exemplos de felicidade e sucesso.

AGREDECIMENTOS

Ao professor Doutor Eduardo Mario Menciondo por orientar este trabalho com tanta dedicação e profissionalismo e pela ótima amizade desenvolvida nesses anos de convivência.

A professora Titular Maria do Carmo Calijuri e ao Professor Dr. Irineu Bianchini Jr pelas críticas e sugestões que muito colaboraram para o desenvolvimento deste trabalho.

A CAPES, pela Bolsa de Estudos fornecidas e à Fundação de Amparo à Pesquisa de São Paulo – FAPESP, processo 02/13449-1, pelo auxílio financeiro aos trabalhos de campo.

Aos meus amigos pesquisadores do Núcleo Integrado de Bacias Hidrográficas – NIBH, em especial aos meus grandes amigos Alfredo A. Ohnuma Jr. e Pedro F. Caballero pelas horas de conversas tão agradáveis.

Aos técnicos José Roberto Maramarque (Betão) e Waldomiro Antônio Filho (Miro) e ao motorista Sr. Benedito Patracon (S. Benê), por serem grandes profissionais e grandes amigos.

A toda família do Sr Hélio e Sr Zé, por monitorarem nossos equipamentos e por nos terem recebidos tão bem.

A Roseli Benassi, pela orientação e principalmente pelos dados que foram fundamentais na construção deste trabalho.

A minha namorada Lena, por ser tão meiga e compreensiva e por me proporcionar muitos momentos de alegria.

Aos meus pais, que são à base de tudo o que já aconteceu na minha vida, as minhas irmãs sempre tão carinhosas e prestativas e a minha Tia Nizinha, que com certeza é a pessoa que mais acredita em mim.

"Nunca ande por caminhos já traçados,
pois eles sempre nos levam a lugares
onde outros já foram."
Alexander Graham Bell

FIGURAS	i
TABELAS	v
LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS	vi
RESUMO	vii
ABSTRACT	viii
INTRODUÇÃO	1
1.1_ OBJETIVO GERAL E ESPECÍFICO	2
1.2_ ESTRUTURA GERAL DA DISSERTAÇÃO	2
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1_ ÁREAS ALAGADAS	5
2.2_ ECOLOGIA FLUVIAL	6
2.2.1 Continuidade	9
2.2.2 Resiliência e Vulnerabilidade	11
2.2.3 Diversidade	13
2.3_ VARIÁVEIS LIMNOLÓGICAS	14
2.4_ VARIÁVEIS HIDROLÓGICAS	15
2.4.1 Curva-chave	17
2.4.2 Incertezas dos parâmetros da curva-chave	18
2.4.3 Balanço Hídrico	19
2.4.4 Vazão Ecológica	20
MATERIAIS E MÉTODOS	25
3.1_ ÁREA DE ESTUDO	25
3.1.1 O sistema do Rio Ribeira do Iguape	25
3.1.2 A bacia do rio Jacupiranga.	26
3.1.2.1 Área Alagada da microbacia do rio Jacupiranguinha.	28
3.1.2.2 Levantamento Topográfico da Área Alagada	30
3.1.2.3 Descrição Morfológica do Rio Jacupiranguinha Segundo a Classificação de Rosgen.	31
3.1.3 Características dos municípios.	32
3.1.3.1 Cajati.	32
3.1.3.2 Jacupiranga	33
3.2_ MONITORAMENTO HIDROLÓGICO.	33
3.2.1 Estações Linimétricas.	34
3.2.1.1 Linígrafo Automático e Régua na Entrada da Área Alagada (1).	36
3.2.1.2 Linígrafo Saída da Área Alagada (2).	37
3.2.1.3 Régua 1_ Lagoa na Entrada da Área Alagada (3).	37
3.2.1.4 Régua 2_ Maior Lagoa da Área Alagada (4).	38
3.2.1.5 Régua 3_ Córrego na Saída da Área Alagada (5).	40
3.2.2 Estação Climatológica.	42
3.3_ CURVA-CHAVE	43
3.3.1 Etapas para a Geração da Curva-Chave	44
3.3.2 Metodologia para a Determinação de Vazões.	45
3.3.3 Rugosidade e Geometria do Leito do Rio.	46
3.3.3.1 Aspectos Geométricos do Leito do Rio	47
3.3.3.2 Rugosidade do Leito do Rio	47
3.3.4 Rugosidade e Geometria da Área Alagada.	49
3.3.5 Métodos de Extrapolação de Curvas-Chave.	50

3.3.5.1 Método de Stevens	51
3.3.5.2 Método da Velocidade Média	52
3.3.5.3 Método da Curva de Tendência	53
3.3.6 Comparação entre métodos de extrapolação.	54
3.4_ INCERTEZAS DA CURVA-CHAVE	54
3.4.1 Equação de Manning com Profundidade como Variável Dependente.	54
3.4.2 Equação de Manning com Vazão como Variável Dependente.	55
3.5_ BALANÇO HÍDRICO	56
3.5.1 Componentes Do Balanço Hídrico	57
3.5.1.1 Precipitação	57
3.5.1.2 Evaporação	58
3.5.1.3 Escoamento	61
3.5.2 Fluxograma das Componentes do Balanço Hídrico	62
3.6_ VAZÃO ECOLÓGICA	64
3.6.1 Métodos de Determinação da Vazão Ecológica.	64
3.6.1.1 Vazão de Referência Q90 diária.	65
3.7_ VARIÁVEIS LIMNOLÓGICAS	66
3.7.1 Local de coleta das variáveis físicas e químicas da água e da biomassa.	66
3.7.2 Períodos de Coletas das Variáveis Limnológicas.	67
3.7.3 Variáveis Físicas e Químicas das Águas.	67
3.7.4 Macrófitas Aquáticas	68
RESULTADOS E DISCUSSÕES	69
4.1_ MONITORAMENTO	69
4.1.1 Estações Linimétricas Manuais	69
4.1.2 - Estações Linimétricas Automáticas e Estação Climatológica.	72
4.1.2.1 - Estação Linimétrica Automática Entrada da Área Alagada (1).	72
4.1.2.2 - Estação Linimétrica Automática Saída da Área Alagada (2).	74
4.1.2.3 - Estação Climatológica.	75
4.1.3 – Influência do Efluente da Indústria de Fertilizante (BUNGE)	76
4.2_ CURVA-CHAVE	78
4.2.1 Aspectos Geométricos do Leito do Rio	78
4.2.1.1 Traçado	79
4.2.1.2 Seção Transversal da Estação Linimétrica da Entrada da Área Alagada.	79
4.2.1.3 Perfil Longitudinal da Estação Linimétrica da Entrada da Área Alagada.	80
4.2.2 Rugosidade do Leito do Canal	81
4.2.2.1 Rugosidade do Canal e da Planície de Inundação.	84
4.2.3 Medições de Vazões.	85
4.2.4.1 Método da Curva de Tendência.	86
4.2.4.2 Método de Stevens.	86
4.2.4.3 Método da Velocidade Média.	88
4.2.5 Curva-chave do canal e área alagada	90
4.3_ INCERTEZAS DA CURVA-CHAVE	92
4.3.1 Equação de manning com a cota hidrométrica como variável dependente.	92
4.3.1.1 Variação das cotas hidrométricas em relação à vazão medida em campo.	92
4.3.1.2 Incertezas dos métodos de extrapolação superior da curva-chave.	94
4.3.2 Incertezas das vazões da planície de inundação.	97
4.4_ ECOLOGIA FLUVIAL	98
4.4.1 Relação entre Áreas Alagadas e Cotas Hidrométricas.	98
4.4.2 Relação entre um Hidrograma do rio Jacupiranguinha e a Área Alagada.	102
4.4.3 Relação entre Biomassa das Macrófitas e Cota Hidrométrica	104

4.5_ BALANÇO HÍDRICO	106
4.5.1 Cálculo do Albedo	106
4.5.2 Componentes do Balanço Hídrico	107
4.6_ VAZÃO ECOLÓGICA	109
4.6.1 Estação DAEE	110
4.6.1.1 Seção Transversal	110
4.6.1.2 Hidrogramas	110
4.6.1.3 Curvas de Permanências	111
4.6.2 Estação (1) – Limnógrafo Entrada	112
4.6.2.1 Seção Transversal	112
4.6.2.2 Hidrogramas	113
4.6.2.3 Curva de Permanência	114
4.6.3 Cálculo da Vazão Ecológica	115
4.6.4 Comparação entre a estação DAEE e estação (1) – limnógrafo entrada	116
4.7 RELAÇÕES ENTRE VARIÁVEIS HIDROLÓGICAS E LIMNOLÓGICAS.	117
4.7.1 Condutividade Elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	118
4.7.2 Biomassa das Macrofitas ($\text{gP.S}/\text{m}^2$)	120
4.7.3 DQO Demanda Química de Oxigênio	122
4.7.4 Nutrientes (Nitrogênio e Fósforo)	123
4.7.4.1 Nitrato ($\text{N-NO}_3 \text{ mg/L}$)	124
4.7.4.2 Nitrogênio Total (N-Total mg/L)	126
4.7.4.3 Fosfato Inorgânico ($\text{P-PO}_4 \text{ mg/L}$)	127
4.7.5 - Materiais Suspensos (Sólidos Suspensos Inorgânicos SSI mg/L)	128
CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	131
5.1_ CONCLUSÕES	131
5.1.1 Área de Estudo	131
5.1.2 Monitoramento	131
5.1.3 Curva Chave	132
5.1.4 Incertezas da Curva Chave	132
5.1.5 Ecologia Fluvial	133
5.1.6 Balanço Hídrico	133
5.1.7 Vazão Ecológica	134
5.1.8 Relação entre Variáveis Hidrológicas e Limnológicas	134
5.2_ RECOMENDAÇÕES	135
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	137
ANEXO 1	148

FIGURAS

FIGURA 1.1 – FLUXOGRAMA DAS ATIVIDADES REALIZADAS NESTE TRABALHO.	4
FIGURA 1.1 – SISTEMAS (EM NEGRITO) E PRINCÍPIOS OPERACIONAIS (EM ITÁLICO) DA PESQUISA. FONTE: MENDIONDO (2001), MENDIONDO ET. AL (2000A).	9
FIGURA 2.2 - HIDROGRAMA DE INUNDAÇÃO COM SUAS RESPECTIVAS FASES DE INUNDAÇÃO.	10
FIGURA 2.3 - RELAÇÃO ENTRE ÁREA DE VÁRZEA INUNDADA E VAZÃO E SUAS RESPECTIVAS FASES DE INUNDAÇÃO.	11
FIGURA 2.4 - RESILIÊNCIA - CAPACIDADE DE RECUPERAÇÃO DO ECOSISTEMA	12
FIGURA 2.5 - VULNERABILIDADE - INCAPACIDADE DE RECUPERAÇÃO DO ECOSISTEMA	12
FIGURA 2.6 - EXEMPLO DO COMPORTAMENTO DA BIOMASSA, DO RIO PARANÁ, COM RELAÇÃO À ALTURA DA ÁGUA NAS ÁREAS DE VÁRZEA.	12
FIGURA 2.7 - RELAÇÃO ENTRE A BIOMASSA E ALTURA DA LAMINA D'ÁGUA PARA ECOSISTEMAS PRESERVADOS E NÃO PRESERVADOS. (MENDIONDO ET. AL 2000)	14
FIGURA 2.8 – HIDROGRAMA ECOLÓGICO FICTÍCIO.	22
FIGURA 2.9 – HIDROGRAMA ECOLÓGICO DESENVOLVIDO POR PETTS E MADDOCK (1996).	23
FIGURA 3.1 - MAPA DE LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO (FONTE: CALIJURI 2005).	26
FIGURA 3.2 MAPA HIDROGRÁFICO DA ÁREA DE ESTUDO (FONTE: MOCELLIN 2005).	27
FIGURA 3.3 MAPA DA DECLIVIDADE DA MICROBACIA DO RIO JACUPIRANGUINHA (FONTE: BENASSI 2006).	29
FIGURA 3.4 LOCALIZAÇÃO DA PLANÍCIE DE INUNDAÇÃO NA BACIA DO RIO JACUPIRANGUINHA, EM AZUL O SENTIDO DO RIO.	30
FIGURA 3.5 - ÁREA ALAGADA COM OS VALORES DE COTAS TOPOGRÁFICAS MEDIDAS EM CAMPO EM MARÇO DE 2006, EM AZUL O SENTIDO DO RIO.	31
FIGURA 3.6 – ILUSTRAÇÃO DO TIPO DE RIO C5 DE ACORDO COM A CLASSIFICAÇÃO DE ROSEN (1996).	32
FIGURA 3.7 - ILUSTRAÇÃO DA PLANÍCIE DE INUNDAÇÃO E AS CINCO ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS INSTALADAS E A SETA AZUL REPRESENTA O SENTIDO DO FLUXO DO RIO JACUPIRANGUINHA (BENASSI, 2006).	34
FIGURA 3.8 – LINÍGRAFO AUTOMÁTICO DA T&S EQUIPAMENTOS.	36
FIGURA 3.9 – INSTALAÇÃO DO LINÍGRAFO NO RIO JACUPIRANGUINHA.	36
FIGURA 3.10 – RÉGUAS INSTALADAS NA SEÇÃO DA ENTRADA DA ÁREA ALAGADA, VISTAM DA MARGEM ESQUERDA PRA DIREITA, A SETA REPRESENTA O SENTIDO DO FLUXO DO RIO.	37
FIGURA 3.11 – RÉGUAS LINIMÉTRICAS INSTALADAS NA LAGOA 1 – ENTRADA DA ÁREA ALAGADA.	38
FIGURA 3.12 – ESTAÇÃO LINIMÉTRICA (4) LOCALIZADA NA LAGOA 2.	39
FIGURA 3.13 – ESTAÇÃO LINIMÉTRICA (5) E AO FUNDO O RIO JACUPIRANGUINHA.	40
FIGURA 3.14 – ESQUEMA RELACIONANDO A ESTAÇÃO LINIMÉTRICA (1) E (5).	41
FIGURA 3.15 – RELAÇÃO GRÁFICA DAS ESTAÇÕES LINIMÉTRICAS (1) E (5).	42
FIGURA 3.16 – ESTAÇÃO CLIMATOLÓGICA DA BACIA DO RIO JACUPIRANGUINHA.	43
FIGURA 3.17 - ILUSTRAÇÃO DO MÉTODO DA MEIA SEÇÃO (SEFIONE, 2002).	46
FIGURA 3.18 - VARIAÇÃO DO COEFICIENTE DE MANNING DE ACORDO COM A PROFUNDIDADE DA LINHA D'ÁGUA. (YEN, 1992).	49
FIGURA 3.19 - EXTRAPOLAÇÃO PELO MÉTODO DE STEVENS (SEFIONE, 2002 ADAPTADO DE JACON E CUDO 1989).	52
FIGURA 3.20 - EXTRAPOLAÇÃO PELO MÉTODO DA VELOCIDADE MÉDIA (ADAPTADO DE JACON E CUDO 1989).	53
FIGURA 3.21 – ESQUEMA DE CANAL COM PLANÍCIE DE INUNDAÇÃO	56
FIGURA 3.22 – FLUXOGRAMA PARA A DETERMINAÇÃO DAS COMPONENTES DO BALANÇO HÍDRICO.	63
FIGURA 3.23 - LOCAL ESCOLHIDO COMO REFERÊNCIA PARA MELHOR EXPLICAR A RELAÇÃO ENTRE AS VARIÁVEIS HIDROLÓGICAS E LIMNOLÓGICAS	66
FIGURA 3.24 – HIDROGRAMA COM AS COTAS HIDROMÉTRICAS DO RIO JACUPIRANGUINHA E OS PERÍODOS EM QUE FORAM COLETADOS OS DADOS LIMNOLÓGICOS.	67
FIGURA 4.1 – LINIGRAMA DAS ESTAÇÕES (4) E (5) NO PERÍODO DE 20/10/04 A 20/07/2005.	70
FIGURA 4.2 – LINIGRAMA DAS ESTAÇÕES (3), (4) E (5) NO PERÍODO DE 25/05/06 A 14/01/2007.	71
FIGURA 4.3 – LINIGRAMA RECUPERADO DA ESTAÇÃO (1) NO PERÍODO DE 10/12/04 A 20/07/2005.	71
FIGURA 4.4 – HIDROGRAMA DA ESTAÇÃO (1) NO PERÍODO DE 25/06/06 A 14/01/2007.	72
FIGURA 4.5 – DADOS DE TEMPERATURA (OC) E COTAS HIDROMÉTRICAS (M), COLETADOS DA ESTAÇÃO (1), NO PERÍODO DE 24/05/2006 A PARTIR DAS 11:00 ATÉ 16/06/06 AS 20:00.	73
FIGURA 4.6 – DADOS DE TEMPERATURA (OC) E COTAS HIDROMÉTRICAS (M), COLETADOS DA ESTAÇÃO (1), NO PERÍODO DE 21/07/2006 DAS 19:00 ATÉ O DIA 23/09/2006 AS 01:00.	73

FIGURA 4.7 – DADOS DE TEMPERATURA (OC) E COTAS HIDROMÉTRICAS (M), COLETADOS DA ESTAÇÃO (2), NO PERÍODO DE 24/05/2006 AS 11:00 ATÉ O DIA 21/06/2006 AS 05:00.	74
FIGURA 4.8 – DADOS DE TEMPERATURA (OC) E COTAS HIDROMÉTRICAS (M), COLETADOS DA ESTAÇÃO (1), NO PERÍODO DE 24/05/2006 A PARTIR DAS 11:00 ATÉ 06/06/06 AS 16:00.	75
FIGURA 4.9 – DADOS DE COTAS HIDROMÉTRICAS (M) DAS ESTAÇÕES (1) E (2) E CHUVA DA ESTAÇÃO CLIMATOLÓGICA (MM), NO PERÍODO DE 21/05/2006 A PARTIR DAS 10:00 ATÉ 25/09/06 AS 13:00.	76
FIGURA 4.10 – LOCALIZAÇÃO DA LAGOA RECEPTORA DE EFLUENTES DA BUNGE EM RELAÇÃO A ESTAÇÃO (1).	77
FIGURA 4.11 – CANAIS DE CONCRETO QUE DESPEJAM RESÍDUOS DA INDÚSTRIA DE FERTILIZANTES.	77
FIGURA 4.12 - FOTO ÁREA DO RIO JACUPIRANGUINHA	79
FIGURA 4.13 - SEÇÃO TRANSVERSAL DO RIO JACUPIRANGUINHA NA ENTRADA DA ÁREA ALAGADA.	80
FIGURA 4.14 - DECLIVIDADE DO LEITO DO RIO E DA LINHA D'ÁGUA.	81
FIGURA 4.15 - RELAÇÃO COTA (ORDENADAS) E COEFICIENTE DE MANNING (ABSCISSA).	82
FIGURA 4.16 - RELAÇÃO DO COEFICIENTE DE RUGOSIDADE (EIXO PRINCIPAL DAS ORDENADAS) E DA VAZÃO (EIXO SECUNDÁRIO DAS ORDENADAS) PARA A MESMA COTA DO NÍVEL D'ÁGUA (ABSCISSA).	83
FIGURA 4.17 - RELAÇÃO COEFICIENTE DE RUGOSIDADE EM RELAÇÃO À CLASSIFICAÇÃO DO TIPO DO RIO SEGUNDO ROSGEN. (ROSGEN 1992).	83
FIGURA 4.18 – COEFICIENTES DE RUGOSIDADE DO CANAL DO RIO JACUPIRANGUINHA E DA PLANÍCIE DE INUNDAÇÃO.	84
FIGURA 4.19 - CURVA-CHAVE PELO MÉTODO DA CURVA DE TENDÊNCIA.	86
FIGURA 4.20 - EXTRAPOLAÇÃO PELO MÉTODO DE STEVENS.	87
FIGURA 4.21 - EXTRAPOLAÇÃO PELO MÉTODO DA VELOCIDADE MÉDIA	88
FIGURA 4.22 - CURVAS-CHAVE PELOS TRÊS MÉTODOS DE EXTRAPOLAÇÃO SUPERIOR	90
FIGURA 4.23 - CURVA-CHAVE QUANDO OCORRE EXTRAPOLAÇÃO DA CALHA DO RIO JACUPIRANGUINHA.	91
FIGURA 4.24 - COTAS HIDROMÉTRICAS COMO VARIÁVEL DEPENDENTE DA EQUAÇÃO DE MANNING.	93
FIGURA 4.25 - INTERVALO DE CONFIABILIDADE DAS COTAS HIDROMÉTRICAS.	94
FIGURA 4.26 - VARIAÇÕES DAS CURVAS-CHAVE DO MÉTODO DA VELOCIDADE MÉDIA.	95
FIGURA 4.27 - VARIAÇÕES DAS CURVAS-CHAVE DO MÉTODO DA CURVA DE TENDÊNCIA.	96
FIGURA 4.28 VARIAÇÕES DAS VAZÕES MÁXIMAS PARA A COTA MÁXIMA DE 2,474M.	97
FIGURA 4.29 – HIDROGRAMA DO RIO JACUPIRANGUINHA ENTRE OS DIAS 17/12/2004 E 20/07/2005.	99
FIGURA 4.30 – HIDROGRAMA DO RIO JACUPIRANGUINHA ENTRE OS DIAS 25/05/2006 E 14/01/2007.	99
FIGURA 4.31 – RELAÇÃO ENTRE ÁREA ALAGADA E COTA HIDROMÉTRICA DO RIO JACUPIRANGUINHA. EVENTO OCORRIDO ENTRE OS DIAS 03/01/2005 E 09/01/2005.	100
FIGURA 4.32 – RELAÇÃO ENTRE ÁREA ALAGADA E COTA HIDROMÉTRICA DO RIO JACUPIRANGUINHA. EVENTO OCORRIDO ENTRE OS DIAS 17/01/2005 E 29/01/2005.	101
FIGURA 4.33 – RELAÇÃO ENTRE ÁREA ALAGADA E COTA HIDROMÉTRICA DO RIO JACUPIRANGUINHA. EVENTO OCORRIDO ENTRE OS DIAS 05/01/2007 E 14/01/2007	102
FIGURA 4.34 – CONJUNTO DE CINCO FOTOS QUE REPRESENTAM AS RELAÇÕES ENTRE AS COTAS HIDROMÉTRICAS DO RIO JACUPIRANGUINHA E AS ÁREAS DA PLANÍCIE DE INUNDAÇÃO.	103
FIGURA 4.35 – RELAÇÃO ENTRE ÍNDICE DE BIOMASSA E COTAS HIDROMÉTRICAS TANTO DO RIO QUANTO DA LAGOA 2.	105
FIGURA 4.36 – RELAÇÃO ENTRE ÁREA ALAGADA E COTA HIDROMÉTRICA DO RIO JACUPIRANGUINHA. EVENTO OCORRIDO ENTRE OS DIAS 17/01/2005 E 29/01/2005	105
FIGURAS 4.37 –COMPONENTES DO BALANÇO HÍDRICO DA BACIA DO RIO JACUPIRANGUINHA NO PERÍODO DE JUNHO DE 2006 A JANEIRO DE 2007.	108
FIGURA 4.38 - LOCALIZAÇÃO DA ESTAÇÃO DAEE E DA ESTAÇÃO (1) A LINHA AZUL REPRESENTA O CURSO DO RIO JACUPIRANGUINHA.	109
FIGURA 4.39 - SEÇÃO TRANSVERSAL DA ESTAÇÃO DAEE (FONTE: SITE DO SIGRH).	110
FIGURA 4.40 – HIDROGRAMA DA ESTAÇÃO DAEE NO PERÍODO DE 1980 A 1997 (FONTE: SITE DO SIGRH).	111
FIGURA 4.41 – CURVA DE PERMANÊNCIA DA ESTAÇÃO DAEE NO PERÍODO DE 1980 A 1997 (FONTE: SITE DO SIGRH).	112
FIGURA 4.42 - SEÇÃO TRANSVERSAL DO RIO JACUPIRANGUINHA NA ENTRADA DA ÁREA ALAGADA.	113
FIGURA 4.43 – HIDROGRAMA DAS COTAS HIDROMÉTRICAS E DAS VAZÕES DO RIO JACUPIRANGUINHA NO PERÍODO DE 17/12/04 A 12/05/05	113
FIGURA 4.44 – HIDROGRAMA DAS COTAS HIDROMÉTRICAS E DAS VAZÕES DO RIO JACUPIRANGUINHA NOS PERÍODO DE 25/05/06 A 14/01/07	114
FIGURA 4.45 – CURVA DE PERMANÊNCIA DAS COTAS HIDROMÉTRICAS E DAS VAZÕES DO RIO JACUPIRANGUINHA NOS PERÍODOS DE 17/12/04 A 12/05/05 E DE 25/05/06 A 14/01/07	115
FIGURA 4.46 – CONDUTIVIDADE ELÉTRICA DAS ESTAÇÕES (1) E (4) DURANTE AS MISSÕES EXPERIMENTAIS.	118
FIGURA 4.47 – CONDUTIVIDADE ELÉTRICA E COTAS HIDROMÉTRICAS DAS ESTAÇÕES (1) E (4) EM JANEIRO DE 2005.	119

FIGURA 4.48 - QUADRO SÍNTESE RELACIONANDO FATORES LIMNOLÓGICOS, QUADRANTES SUPERIORES, A PARTIR DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA, COM FATORES HIDROLÓGICO-HIDRÁULICOS, QUADRANTES INFERIORES. _____	120
FIGURA 4.49 - QUADRO SÍNTESE RELACIONANDO FATORES LIMNOLÓGICOS, QUADRANTES SUPERIORES, A PARTIR DO ÍNDICE DE BIOMASSA, COM FATORES HIDROLÓGICOS, DOS QUADRANTES INFERIORES. _____	121
FIGURA 4.50 - QUADRO SÍNTESE RELACIONANDO FATORES LIMNOLÓGICOS (DQO) COM FATORES HIDROLÓGICOS. _____	123
FIGURA 4.51 - QUADRO SÍNTESE RELACIONANDO FATORES LIMNOLÓGICOS (N-NO3) COM FATORES HIDROLÓGICOS _____	125
FIGURA 4.52 - QUADRO SÍNTESE RELACIONANDO FATORES LIMNOLÓGICOS (N-TOTAL) COM FATORES HIDROLÓGICOS _____	126
FIGURA 4.53 - QUADRO SÍNTESE RELACIONANDO FATORES LIMNOLÓGICOS (P-PO4) COM FATORES HIDROLÓGICOS. _____	128
FIGURA 4.54 - QUADRO SÍNTESE RELACIONANDO FATORES LIMNOLÓGICOS (SSI) COM FATORES HIDROLÓGICOS. _____	129
FIGURA A-1 – SISTEMAS (EM NEGRITO) E PRINCÍPIOS OPERACIONAIS (EM ITÁLICO) DA PESQUISA. FONTE: MENDIONDO (2001), MENDIONDO ET. AL (2000A). _____	150
FIGURA A-2 – CENÁRIO DE RECUPERAÇÃO AMBIENTAL CRIADO A PARTIR DA CURVA DE PERMANÊNCIA DO RIO JACUPIRANGUINHA. _____	151
FIGURA A-3 – CENÁRIO DE RECUPERAÇÃO AMBIENTAL CRIADO A PARTIR DA CURVA CHAVE DO RIO JACUPIRANGUINHA. _____	151
FIGURA A-4 – CENÁRIO DE RECUPERAÇÃO AMBIENTAL CRIADO A PARTIR DAS FASES DE INUNDAÇÃO DO RIO JACUPIRANGUINHA. _	152
FIGURA A-5 – CENÁRIO DE RECUPERAÇÃO AMBIENTAL CRIADO A PARTIR DA BIOMASSA DE MACROFITAS DO RIO JACUPIRANGUINHA. _____	152

TABELAS

TABELA 3.1 – CARACTERÍSTICAS DA BACIA DO RIO JACUPIRANGA (CALIJURI 2003)	28
TABELA 3.2 ÁREA E COTA TOPOGRÁFICA DAS 4 CURVAS DE NÍVEL DA PLANÍCIE DE INUNDAÇÃO.	30
TABELA 3.3 - LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA DAS ESTAÇÕES DE MONITORAMENTO DA PLANÍCIE DE INUNDAÇÃO DO RIO JACUPIRANGUINHA.....	34
TABELA 3.4 COTAS TOPOGRÁFICAS DAS ESTAÇÕES LINIMÉTRICAS.	35
TABELA 3.5 DADOS MORFOMÉTRICOS DOS SUB-SISTEMAS 1 E 2 (BENASSI 2006)	39
TABELA 3.6 - INSOLAÇÃO MÁXIMA DIÁRIA, N, EM HORAS.....	60
TABELAS 3.7 – VARIÁVEIS FÍSICAS E QUÍMICAS ANALISADAS E OS MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO UTILIZADOS (BENASSI, 2006).....	68
 TABELA 4.1 - PARÂMETROS QUALI-QUANTITATIVOS DE TRÊS PONTOS DO RIO JACUPIRANGUINHA (DATA: 25/06/06).	78
TABELA 4.2 – VALORES DE ÁREA, PERÍMETRO E RAIOS HIDRÁULICO PARA O CÁLCULO DA RUGOSIDADE DE <i>MANNING</i> DO CANAL DO RIO E DA PLANÍCIE DE INUNDAÇÃO.....	84
TABELA 4.3 – DADOS DAS MEDIÇÕES DE VAZÃO COM SUAS RESPECTIVAS COTAS E DATAS.....	85
TABELA 4.4 - DADOS PARA EXTRAPOLAÇÃO DA CURVA-CHAVE PELO MÉTODO DE STEVENS.	87
TABELA 4.5 DADOS PARA EXTRAPOLAÇÃO DA CURVA-CHAVE PELO MÉTODO DA VELOCIDADE MÉDIA.	88
TABELA 4.6 DADOS COMPARATIVOS ENTRE OS TRÊS MÉTODOS DE EXTRAPOLAÇÃO SUPERIOR DA CURVA-CHAVE, EM m^3/s	89
TABELA 4.7 VAZÕES DA ÁREA ALAGADA A PARTIR DOS DADOS DE RUGOSIDADE DE MANNING.	91
TABELA 4.8 INCERTEZAS DAS VAZÕES DA PLANÍCIE DE INUNDAÇÃO.	98
TABELA 4.9 – REFERENCIAIS DE ALBEDO, DE ACORDO COM A CARACTERÍSTICA DO TERRENO, BACIA DO RIO JACUPIRANGUINHA.	106
TABELA 4.10 – CÁLCULO DOS ALBEDOS DA BACIA DO RIO JACUPIRANGUINHA.	107

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

LISTA DE ABREVIATURAS

ALPHA - American Public Health Association

CETESB - Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental

DAEE - Departamento de águas e Energia Elétrica

DQO - Demanda Química de Oxigênio

DBO - Demanda Bioquímica de Oxigênio

SABESP - Saneamento Básico do Estado de São Paulo

SIGRH - Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos

UGRH - Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos

USP - Universidade de São Paulo

LISTA DE SÍMBOLOS

A_m - Área Molhada

P_m - Perímetro Molhado

R_h - Raio Hidráulico

Q - Vazão

OD - Oxigênio Dissolvido

NT - Nitrogênio Total

SSI - Sólidos Suspensos Inorgânicos

NO_3 - Nitrato

PO_4 - Fósforo Inorgânico

T - Temperatura

ETP – Evapotranspiração Potencial

RESUMO

ALMEIDA NETO, P. (2007). *Hidrogramas Experimentais de Áreas Alagadas da Microbacia do Rio Jacupiranguinha, Baixo Ribeira de Iguape, SP*. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2007.

Ao longo dos anos, vêm sendo desenvolvidos trabalhos comprovando a importância de áreas alagadas naturais para a manutenção e preservação da qualidade das águas e do ecossistema fluvial. Este fato, associado à importância dos sistemas rios-planícies de inundação, fazem com que sua investigação e preservação sejam consideradas prioritárias. O objetivo desta pesquisa é analisar experimentalmente fatores que influenciam hidrogramas, conforme a ecologia fluvial de áreas alagadas da microbacia do Rio Jacupiranguinha localizado no Baixo Ribeira do Iguape, SP. A concretização deste objetivo iniciou-se com a definição da área de estudo, bem como sua importância para a região. Foram então instaladas cinco estações limimétricas e uma estação climatológica, e em seguida, com os dados de vazão coletados em campo, foram construídas a curva-chave da entrada da área alagada e as incertezas relativas aos seus parâmetros. A partir desses estudos e com o levantamento topográfico de toda planície de inundação, foi determinada a relação entre áreas inundáveis, vazões e cotas hidrométricas do rio. Além disso, com os dados climatológicas, vazões e vegetação superficial foi possível determinar as componentes (precipitação, escoamento superficial, evaporação e armazenamento) do Balanço Hídrico da micro-bacia. O monitoramento limimétrico do Rio Jacupiranguinha, junto com suas séries históricas e curvas de permanência, possibilitou também o cálculo de sua vazão ecológica. Finalmente foram construídos quadros síntese-conceituais, integrando as relações entre todas as variáveis hidrológicas e limnológicas selecionadas, demonstrando assim a forte associação entre o sistema rio-áreas alagadas.

Palavras-chaves: áreas alagadas, rio Jacupiranguinha, curva-chave, ecologia fluvial, fatores limnológicos, fatores hidrológicos, planície de inundação.

ABSTRACT

ALMEIDA NETO, P. (2007). *Experimental Hydrographs of Wetlands in Jacupiranguinha's River Microbasins in the Baixo Ribeira do Iguape Valley, SP*. M.Sc. Dissertation – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2007.

It is very important to improve our knowledge about the floodplains, which have been proved by studies, since these areas are vital to the maintenance and preservation of the quality of waters and the fluvial ecosystem. This fact, associated with the importance of the wetlands-river system, makes its investigation and preservation to be considered number one priority. The objective of this research is to analyze factors that may influence hydrographs, according to the fluvial ecology of wetlands in micro basin of Baixo Ribeira do Iguape Valley, SP. The work began with the definition of the studied field and its importance to the area. Subsequently, five hydrometric station and one meteorological station were installed, and therefore the rating curve in the entrance of floodplain was calculated along with the uncertainties related to its parameters. With these studies and with the topographic survey, it was possible to find the relation between wetlands, river stage and flow. The climatologically information, the river stage and the superficial covering vegetation are essential factors to determinate the components (precipitation, superficial flow, evaporation and the storage) of the Water Balance at the micro basis of Jacupiraguinha river. The hydrometric observation of the river along with historical series and the probability-duration curve make it possible to calculate the ecological flow. Finally, conceptual charts integrating the relations between hydrological and limnologicals factors were built showing the strong association with the wetlands-river system.

Key-words: wetlands, Jacupiranguinha River, rating curve fluvial ecology, limnological factors, hydrological factors, floodplain.

O aproveitamento auto-sustentado de recursos hídricos de uma região requer estudos de sua disponibilidade no espaço e no tempo, das demandas potenciais para usos múltiplos previstos, de projetos e construção de obras de controle e utilização de estudos para alocação de custos e benefícios entre os usos, e para determinação de uma estratégia ótima de operação (CHAUDHRY, 2000).

O uso sustentável de um rio depende de um conhecimento básico e aprofundado da sua estrutura, função e da hierarquia dos processos ecológicos. Assim, quando se pensa na hierarquia de processos ecológicos nesses sistemas é necessário identificar as funções de força controláveis (pulso de nutrientes e substâncias tóxicas) e não controláveis (precipitação, vazão, vento e radiação solar) (BORGES et al 2005).

As bacias hidrográficas do Baixo Ribeira de Iguape (SP) têm passado por mudanças complexas nos últimos 18000 anos até se consolidar no bioma atual (UNIVERSITY OF SOTHAMPTON, 2002), que é uma síntese dos complexos ciclos geológicos, biológicos, hidrológicos que atuam acoplados e em escalas espaços-temporais correlatas. Como na atualidade essas mudanças têm sido alteradas em resposta as atividades antrópicas, surge à necessidade de integrar conceitualmente esses processos aos impactos pontuais causados pelos ciclos antrópicos.

É de extrema importância ter melhor conhecimento das áreas alagadas, há tempos, estudos que contemplam a importância dessas áreas para a manutenção e preservação da qualidade das águas vêm sendo desenvolvidos, bem como seu papel no aprisionamento/reprocessamento de nutrientes como forma de contribuição destes

ecossistemas para a melhoria da qualidade da água (BENASSI, 2006). Esse fato, associado à importância dos sistemas rios-planícies de inundação, fazem com que sua investigação e preservação sejam consideradas prioritárias.

1.1_ OBJETIVO GERAL E ESPECÍFICO

O objetivo geral deste trabalho foi:

Analisar experimentalmente fatores que influenciam os hidrogramas conforme a ecologia fluvial de áreas alagadas.

Os objetivos específicos foram:

- Implantar um monitoramento hidrométrico experimental junto a áreas alagáveis na micro-bacia do Rio Jacupiranguinha;
- Avaliar as incertezas de alturas hidrométricas, vazões e áreas inundáveis durante períodos de cheias (potamofase) e estiagem (limnofase);
- Propor diretrizes para gestão aplicada dessas incertezas com contexto de ecologia fluvial e hidrogramas ecológicos.

1.2_ ESTRUTURA GERAL DA DISSERTAÇÃO

Para alcançar os objetivos propostos à pesquisa foi fundamentada em cinco capítulos divididos da seguinte maneira:

- Capítulo 1 – **Introdução**: Contém a introdução, os objetivos e a estrutura da dissertação.
- Capítulo 2 – **Revisão da Bibliográfica**: Revisão da literatura sobre o assunto ao qual deu sustentação teórica a dissertação

- Capítulo 3 – **Materiais e Métodos:** Área de Estudo, Monitoramento e Metodologias para determinação dos parâmetros hidrológicos e limnológicos que formam a base deste trabalho.
- Capítulo 4 – **Resultados e Discussão:** São apresentados neste capítulo os resultados obtidos e as discussões pertinentes.
- Capítulo 5 – **Conclusões e Recomendações:** Conclusões e Recomendações finais englobando todos os capítulos da dissertação.

As referencias bibliográficas utilizadas na dissertação encontram-se no final do capítulo 5 e estão de acordo com as diretrizes para a apresentação de dissertação e teses da USP.

A figura 1.1 ilustra todas as etapas realizadas neste trabalho, título, objetivos principais e secundários, metodologia e resultados esperados.

Figura 1.1 – Fluxograma das atividades realizadas neste trabalho.

2.1_ ÁREAS ALAGADAS

Cowardin et al. (1979), caracterizam as áreas alagáveis como sistemas de transição, entre sistemas aquáticos e terrestres, nos quais o nível das águas subterrâneas pode ser superficial, próximo da superfície do solo ou coberto por rasa camada de água, sendo o substrato composto por sedimentos pouco consolidados, hidromórficos e pobremente drenados. Tais condições permitem que, no mínimo, sazonalmente, estas áreas sejam o habitat de plantas aquáticas.

Hammer e Bastian, (1989) definem áreas alagadas como sendo áreas que são inundadas ou saturadas por água superficial ou subterrânea, com uma frequência e duração suficientes para suportarem a predominância de vegetação tipicamente adaptada à vida em condições de solo saturado, devendo possuir, ao menos, uma das seguintes propriedades: i) o solo suporta, predominantemente, macrófitas aquáticas, pelo menos periodicamente; ii) o substrato é, predominantemente, solo hídrico não drenado; iii) a cada ano, o substrato é saturado ou coberto por águas rasas por algum período, durante a época de crescimento dos vegetais.

Dentro das planícies inundáveis podem existir, localmente, ecótonos (áreas intermediárias de tensão entre duas comunidades) e também áreas contínuas, dependendo da gradação dos intercâmbios ambientais e especialmente do regime hidrológico (NEIFF, 2003).

Segundo Junk et al. (1989) as definições de áreas alagáveis usualmente mencionadas não englobam algumas características de ecossistemas tropicais. Estes autores definem as

áreas alagáveis como áreas periodicamente inundadas por enchente lateral de rios e lagos, pela precipitação direta ou por águas subterrâneas, onde pulsos de cheias mudam as características físicas, químicas e biológicas do ambiente de tal forma que a biota responde através de adaptações morfológicas, anatômicas e fisiológicas.

Nos últimos anos, no Brasil, vem sendo demonstrada a importância destas áreas num contexto regional (BENASSI, 2006). Figueroa, (1996), por exemplo, fez um levantamento das técnicas da avaliação econômica de ambientes naturais, enfatizando o caso da Represa do Lobo (Broa), SP. O autor demonstrou que estes ecossistemas têm grande importância com suas funções ecológicas (ciclos bioquímicos), as quais geram uma série de benefícios sociais e econômicos, dentre eles, recreação e agricultura.

Whitaker (1993), salientou que as áreas alagáveis do Estado de São Paulo estão desaparecendo, sendo necessário e urgente demonstrar sua importância quantitativa, para melhores condições de proteção e manejo racional. Além disso, discutiu que o estabelecimento de programas de preservação e manejo devem ser sustentados no conhecimento científico das relações e processos existentes em áreas alagáveis.

2.2_ ECOLOGIA FLUVIAL

O Relatório Bruntland ou *Our Common Future*, em 1987, convencionou denominar desenvolvimento sustentável como “aquele que satisfaça as necessidades das presentes gerações sem comprometer a capacidade das futuras gerações em satisfazer suas próprias necessidades”. Este documento ampliou a discussão sobre desenvolvimento e meio ambiente, na medida em que introduziu parâmetros como, sustentabilidade, desenvolvimento, degradação ambiental, solidariedade e compromisso entre nações de diferentes graus de desenvolvimento e, também, entre gerações; todos esses aspectos devem ser vistos sob enfoque global (MOCCELLIN, 2006).

Uma maneira efetiva de garantir a sustentabilidade dos recursos naturais utilizados pelo homem é através, por exemplo, da preservação das características naturais dos ecossistemas aquáticos. Neste caso, o monitoramento ambiental funciona como uma ferramenta fundamental da sociedade, através da qual se pode avaliar o estado de preservação e/ou grau de degradação dos ecossistemas, fornecendo subsídios para a proposição de estratégias de conservação de áreas naturais e planos de recuperação dos ecossistemas degradados (GOULART e CALLISTO, 2003).

O uso sustentável de um rio depende de um conhecimento básico e aprofundado da sua estrutura, função e da hierarquia dos processos ecológicos. Assim, quando se consideram a hierarquia de processos ecológicos nesses sistemas é necessário identificar as funções de força controláveis (pulso de nutrientes e substâncias tóxicas) e não controláveis (precipitação, vazão, vento e radiação solar).

De acordo com Callisto e Gonçalves Júnior (2005), dentre as principais perspectivas e iniciativas para a conservação dos recursos hídricos destacam-se: atividades de recomposição de mata ciliar, proteção de nascentes, mudanças cotidianas de atitudes relacionadas ao uso da água, além da ampliação no número de Estações de Tratamento de Esgotos (ETE), iniciativas no reuso da água e monitoramento da qualidade dos recursos hídricos (variáveis físicas e químicas e biomonitoramento).

Para Calijuri (2003), a gestão da qualidade dos recursos hídricos engloba, dentre outras ações, a caracterização ambiental, a avaliação dos impactos das atividades que estão inseridas ou que irão se instalar na área de influência, a investigação da capacidade de assimilação do corpo receptor (especialmente nas questões de poluição pontual por descargas de efluentes), o monitoramento ambiental e a retroalimentação do processo de gestão como um todo, de forma a permitir um aperfeiçoamento do sistema adotado.

Os rios são sistemas complexos caracterizados como escoadouros naturais das áreas de drenagem adjacentes, nos quais, em princípio, formam as bacias hídricas. A complexidade desses sistemas lóticos é devido ao uso e ocupação do solo, à geologia, tamanho e forma das bacias de drenagem, além das condições climáticas locais (TOLEDO & NICOLELLA, 2002).

De acordo com Granziera (2003), a importância em definir “bacia hidrográfica” refere-se ao fato de ela ser considerada, na legislação nacional, assim como em outras, como “unidade territorial para implementação da Política Nacional dos Recursos Hídricos e atuação do Sistema de Gerenciamento de Recursos Hídricos” (Lei das Águas, art. 1º. V) (BRASIL, 1997).

Para Lima (1999) e Odum (2001), a bacia hidrográfica é uma unidade natural de paisagem, que representa a definição de um ecossistema aberto, no qual ocorre troca contínua de energia e nutrientes com o meio, fazendo com que a qualidade da água nela produzida seja resultado de diversas características da bacia.

Devido a uma distinta dinâmica geomorfológica, alguns rios possuem áreas de planície de inundação. Junk et al. (1989) entenderam a estrutura biótica de rios como dependentes das trocas laterais entre o canal fluvial e a planície e deram a esse conceito o nome **Pulso de Inundação**. Os pulsos periódicos de inundação na planície conferem características especiais às comunidades, bastante diferentes das características de ambientes apenas lóticos ou lênticos, além de as forças serem controladoras da biota desses sistemas. Essa teoria apresenta a biomassa animal do rio como direta ou indiretamente dependendo da produção orgânica nas planícies de inundação e não considera a necessidade de alguma interferência no processamento de materiais rio acima para o funcionamento do sistema rio abaixo, como postula o conceito do *Continuum Fluvial* (VANNOTE et al, 1980).

As bacias hidrográficas do Baixo Ribeira de Iguape (SP) têm passado por mudanças complexas nos últimos 18000 anos até se consolidar no bioma atual (UNIVERSITY OF

SOTHAMPTOM, 2002), que é uma síntese dos complexos ciclos geológicos, biológicos, hidrológicos que atuam acoplados e em escalas espaço-temporais correlatadas. Como na atualidade essas mudanças têm sido alteradas em resposta às atividades antrópicas, surge a necessidade de integrar conceitualmente esses processos aos impactos pontuais causados pelas cargas poluidoras artificiais através de abordagens que possibilitem os seus manejos sustentáveis.

De acordo com Menciondo (2001), um estudo de ecologia fluvial deve integrar os seguintes conceitos: bacia hidrográfica, sistema lótico, várzea, diversidade/dinâmica, resiliência/vulnerabilidade, continuidade (Figura 2.1).

Figura 1.1 – Sistemas (em negrito) e princípios operacionais (em itálico) da pesquisa. Fonte: Menciondo (2001), MENDIONDO et. al (2000a).

2.2.1 Continuidade

A continuidade do meio ambiente está ligada diretamente com as fases de inundação dos rios, como mostra a figura 2.2, que representa um hidrograma, hipotético, de vazão e as suas respectivas fases de inundação. Na fase 1 a vazão aumenta, mas não extrapola a calha do rio, na fase 2 a descarga é máxima, inundando assim toda área de várzea. Ocorre nesse instante a conectividade entre o rio e o sistema de áreas alagadas. Na fase 3 a vazão volta para

o canal do rio, mas uma parte da área continua alagada devido à resistência do ecossistema e também à presença de lagoas, poções, pequenos córregos entre outros.

Figura 2.2 - Hidrograma de inundação com suas respectivas fases de inundação.

A hipótese sugerida por Collischonn et al. (2005) prevê que durante o período de cheias há uma conexão entre o rio e a planície de inundação, e as águas na planície recebem muitos nutrientes, devido à rápida decomposição da vegetação, de restos animais ou da camada húmifera da floresta. Isto leva a um rápido crescimento de microorganismos, seguido de uma grande explosão de crescimento de macros invertebrados (insetos, crustáceos e moluscos) dos quais se alimentam os peixes. A biomassa dos peixes aumenta rapidamente durante as cheias e, ao final deste período, conforme as águas baixam, muitos peixes ficam retidos em poças (podendo ser a fonte de alimento para inúmeros pássaros) enquanto outros peixes jovens conseguem retornar ao rio principal (podendo sofrer predação posterior nos canais que ligam os lagos da planície ao rio).

Uma possível relação entre área inundada, cota hidrométrica e vazão está mais bem exemplificada na figura 2.3. O gráfico denominado “fases de inundação” possui no eixo das ordenadas os valores de área inundada e no eixo das abscissas a vazão (podem ser usadas também as cotas hidrométricas). Após um evento a vazão aumenta (fase 1) até chegar a um nível em que começa a inundação da planície (fase 2). Posteriormente, quando o rio retoma

sua vazão normal a água não volta em sua totalidade ao canal (fase 3), uma parte fica retida na área de várzea.

Figura 2.3 - Relação entre área de várzea inundada e vazão e suas respectivas fases de inundação.

2.2.2 Resiliência e Vulnerabilidade

Paisagens naturais sofrem mudanças durante as inundações extraordinárias, sem produzir modificações drásticas nos padrões de paisagem. Isto se deve ao fato de que as formas de alívio de componentes, plantas e populações animais têm uma estrutura que foi selecionada e foi adaptada para milhares de anos. Também são caracterizadas por sua plasticidade (resistência) e pela capacidade de recuperar o equilíbrio depois de uma inundação (resiliência) (Figura 2.4). Porém, as ocorrências de eventos com intensidade de precipitação extremamente alta podem fazer com que a fase 2 de inundação tenha um tempo de duração maior que a capacidade de recuperação do ecossistema da área alagada. Podendo causar assim drásticas mudanças na paisagem da região. Tais transformações devem principalmente à vulnerabilidade do meio ambiente (Figura 2.5). Os exemplos de biomassa citados a seguir se referem somente às macrófitas aquáticas.

Figura 2.4 - Resiliência - Capacidade de recuperação do ecossistema

Figura 2.5 - Vulnerabilidade - Incapacidade de recuperação do ecossistema

Na figura 2.6, Mendiondo et al. (2000), calcularam através de sensoriamento remoto estimado, a biomassa de uma área alagada na bacia do Rio Paraná. Foi adicionado a esse gráfico a seção transversal do rio, a planície de inundação e mais três fases de altura hidrométrica. Nota-se que quando o rio está transbordando para planície de inundação (fase B) o valor da biomassa além de ser bem variado possui um alto índice de erros, entretanto, quando a área está totalmente alagada (Fase C) a variação diminui sensivelmente e o erro também. Mas o menor índice de variação e de erro ocorrem na fase A, quando a lamina d'água é pequena, ou seja, quando ainda não há extravasamento da água do rio.

Figura 2.6 - Exemplo do comportamento da Biomassa, do rio Paraná, com relação à altura da água nas áreas de várzea.

2.2.3 Diversidade

As diferentes espécies de um ecossistema associado a um rio respondem de formas diferentes aos eventos hidrológicos como cheias e estiagens. Uma grande cheia pode beneficiar uma espécie de peixe, que desenvolve uma fase de sua vida na planície inundada, porém, pode reduzir a população de insetos aquáticos, cujas larvas são carregadas para jusante. Já em anos com cheias pequenas, ou inexistentes, pode ocorrer o inverso, isto é, os peixes podem ser menos beneficiados do que os insetos. O regime hidrológico natural provê aos ecossistemas uma mistura de anos favoráveis ou não para cada espécie se avaliada individualmente. Analisando sob a ótica de períodos longos, cada espécie é beneficiada por um número suficiente de anos e prejudicada por outros poucos anos, mantendo assim o ecossistema (POSTEL e RICHTER, 2003).

A diversidade pode, também, influenciar na recuperação da biomassa de uma planície de inundação. Mendingo et al. (2000) calcularam, também, através de sensoriamento remoto, a biomassa de dois pontos distintos da bacia do Rio Paraná: no primeiro a área era preservada e continha uma variedade maior de espécies tanto na fauna quanto na flora; no segundo a área era uma região bastante alterada pela ação do homem e possuía basicamente algumas culturas de subsistência. O resultado deste trabalho pode ser observado na figura 2.7. O gráfico possui dois eixos nas ordenadas (biomassa e altura d'água) e um na abscissa (tempo). Nota-se que a biomassa tem recuperação mais rápida na área um, que possui maior diversidade, do que na área dois.

Figura 2.7 - Relação entre a biomassa e altura da lamina d'água para ecossistemas preservados e não preservados. (MENDIONDO et. al 2000)

2.3_ VARIÁVEIS LIMNOLÓGICAS

Segundo Neiff (2001), um dos principais tipos de áreas alagáveis são aquelas formadas pelos rios de planície de inundação, e essas planícies são reconhecidas como mosaicos de ecossistemas altamente dinâmicos, nas quais a estabilidade e a diversidade estão primariamente condicionadas pela hidrologia e fluxos de materiais. De acordo com Welcomme (1985), as planícies de inundação constituem um tipo de área alagável que toma a forma de uma faixa de terra sujeita a inundação, situada em torno do canal do rio.

O funcionamento e estrutura de rios de planície de inundação estão condicionados pelas inundações periódicas ou pulsos de inundação (JUNK et al., 1989). O conceito de “pulsos de inundação” foi reformulado por Neiff (1990) onde se trata de “pulsos de energia e matéria” ou pulso hidrosedimentológico. Neiff (1990; 1996; 1999) salienta que ambas as fases do pulso têm igual importância, por exemplo, em rios como o Paraguai e Paraná, as crescentes e as vazantes formam duas fases complementares do pulso, que têm muita influência na estabilidade dos ecossistemas fluviais.

As variações do nível da água e do período de inundação provocam uma série de transformações nas características limnológicas dos corpos d'água causadas por interações entre os ambientes terrestre e aquático. Promovem por exemplo, o aumento ou diminuição das seguintes variáveis estudadas neste trabalho: condutividade elétrica, biomassa das macrófitas, gases dissolvidos (oxigênio), nutrientes (nitrogênio e fósforo) e materiais suspensos. Podem provocar, portanto, alterações na quantidade e qualidade das águas das planícies de inundação que foram sujeitas ao alagamento; e estas alterações influenciam a comunidade vegetal, pois alteram a profundidade e hidrodinâmica das lagoas e modificam a qualidade da água, alterando as características físicas e químicas.

O comportamento das macrófitas aquáticas é importante na área alagada, a quantificação e a descrição matemática dos processos de crescimento, absorção de nutrientes e decomposição dessas plantas são essenciais para um bom funcionamento dos modelos desenvolvidos. Algumas dessas taxas existem na literatura, porém, cada vez mais, tem-se evidenciado que a dinâmica de nutrientes nas áreas alagadas varia de um sistema a outro.

As macrófitas aquáticas exercem importante papel na filtração e sedimentação do material particulado em suspensão, e também contribuem para a remoção e a transformação dos nutrientes (NICHOLS, 1983; HAMMER e BASTIAM, 1989 e GOPAL, 1999); além de fornecerem substrato para o desenvolvimento de microorganismos que atuam na mineralização da matéria orgânica e na absorção de nutrientes (BRIX, 1997).

2.4_ VARIÁVEIS HIDROLÓGICAS

As condições hidrológicas são de extrema importância para a manutenção das funções e estruturas das áreas alagadas, embora a simples relação de causa e efeito sejam difíceis de estabelecer. As condições hídricas afetam a diversidade, a composição de espécies, a

produtividade primária, a acumulação orgânica (transporte e movimento dos sedimentos) e os ciclos e a disponibilidade de nutrientes nas áreas alagadas (MITSCH e GOSSLINK, 1993).

Segundo Whitaker (1995), a interação das águas afluentes com a vegetação condiciona de tal modo a heterogeneidade espacial de uma área alagada que o gradiente físico gerado pode ser comumente observado. Como consequência, o regime hidrológico pode ser determinado para a estrutura e funcionamento das áreas alagadas através de alterações nas propriedades físicas, químicas e biológicas, influenciando a disponibilidade de nutrientes e oxigênio dissolvido, as taxas de sedimentação, a ciclagem de matéria orgânica, etc. (GOSSSELINK e TURNER, 1978; WHITAKER, 1995; HENRY, 2003).

Uma das características da hidrologia é o hidroperíodo que é denominado como período ou ocorrência regular de cheia e/ou condições de saturação do solo. Os principais fatores que controlam o hidroperíodo são: o balanço hídrico entre entradas e saídas em uma área alagada, o relevo e a topografia da região (MISCH e GOSSILINK, 1993).

De acordo com Neiff (2001) as oscilações dos níveis hidrométricos influenciam diretamente a velocidade da água, profundidade dos ambientes aquáticos e a área superficial da planície, submetida a alagamento. Os resultados dessas alterações estão associados às mudanças das características limnológicas, ao balanço dos processos de produção e respiração e a padrões de ciclagem de nutrientes dos vários habitats da planície e da calha do rio principal.

De acordo com o estudo de Benassi (2006), poucos trabalhos descrevem com detalhes as características hidrológicas e hidrodinâmicas em áreas alagadas naturais, podendo-se destacar os trabalhos desenvolvidos por Casco (2003), Bradley (2002), Sterm et al. (2001), Rocha (2004) e Whihham e Young (2001). Ainda de acordo com Benassi (2006), a maioria dos estudos que descrevem estas características foi desenvolvido em áreas alagadas

construídas, ficando evidente, assim, a importância de calcular as características hidrológicas de áreas alagáveis naturais.

2.4.1 Curva-chave

De acordo, com Sefione (2002), curva-chave é um termo usado na hidrologia para designar a relação entre a cota (nível d'água) e a vazão que escoar numa dada seção transversal de um curso d'água. Também conhecida como curva de calibragem, cota-vazão e cota-descarga permite o cálculo indireto da vazão na referida seção a partir da leitura da cota num dado momento.

A curva-chave de uma seção pode ser representada de três formas: a forma gráfica, a equação matemática e a tabela de calibragem.

Para traçar uma curva-chave são necessárias medições de vazão feitas na maior amplitude de cotas que se possa alcançar e com a maior precisão possível, de forma a diminuir a faixa de cotas de extrapolação e ter-se maior confiança na calibração da curva. (SEFIONE, 2002, p. 03).

A curva-chave depende de forma intrínseca das condições de escoamento no curso d'água. É necessário, portanto, que o hidrólogo conheça bem as características geométricas e hidráulicas da seção e do trecho onde esta se localiza (JACCON E CUDO, 1989).

As características do escoamento num curso d'água dependem basicamente de dois fatores: geometria e rugosidade do leito. Além de se ter uma boa compreensão sobre esses parâmetros é fundamental conhecer a mobilidade do leito, ou seja, sua variabilidade no tempo e no espaço, permitindo, assim, constantes ajustes na curva-chave, por períodos e cotas (SEFIONE, 2002).

A extrapolação da curva-chave é necessária quando há valores de cota máxima observada maior que a maior cota registrada nas medições de vazão – caso da extrapolação

superior – ou quando a menor cota observada for menor que a menor cota registrada nas medições de vazão – caso da extrapolação inferior (SEFIONE, 2002).

A necessidade de extrapolação é a regra, e não a exceção entre as estações fluviométricas, principalmente a extrapolação superior da curva. Isto se dá devido a dificuldade de se ter um número suficiente de equipes a postos para efetuar medições de vazão nos momentos de cheia, ou quando isso acontece, pode haver impossibilidade de se efetuar a medição devido aos riscos, em função das altas velocidades das águas do rio (TUCCI e SILVEIRA, 1985).

Devido a fatores como a não linearidade na resposta das bacias hidrográficas, alterações no clima, e a grande heterogeneidade espacial e temporal do clima e das propriedades do solo e a extrapolação de informação ou conhecimento de bacias com dados, para bacias sem dados, permanece repleta de dificuldades e incertezas, especialmente devido ao conhecimento limitado do ciclo hidrológico. Maiores dificuldades são, ainda, verificadas em regiões onde pouco ou nenhum dado está disponível. Conseqüentemente são grandes as incertezas das atuais previsões hidrológicas (LIMA et al, 2006).

2.4.2 Incertezas dos parâmetros da curva-chave

De acordo com Chow et. al. (1988) as incertezas hidrológicas podem ser separadas em três categorias: incertezas naturais, as quais resultam da variabilidade aleatória dos fenômenos hidrológicos; incertezas do modelo, que são referentes às aproximações e hipóteses assumidas para representar os fenômenos físicos e incertezas nos parâmetros, as quais originam-se da falta de conhecimento dos coeficientes das equações.

As metodologias usadas para gestão aplicada de incertezas são baseadas em métodos simples como forma aproximativa do problema. Não existe metodologias de quantificação exata de incertezas hidrológicas (CHOW et al 1988).

2.4.3 Balanço Hídrico

Rutkowski (1999) afirma que “a capacidade de cada localidade de sustentar as atividades antrópicas que são dependentes hídricas, é determinada pelo comportamento local do ciclo hidrológico”.

O ciclo hidrológico é o fenômeno global de circulação fechada da água entre a superfície terrestre e a atmosfera, impulsionado fundamentalmente pela energia solar associada à gravidade e à rotação terrestre (TUCCI, 2002).

Entre os fatores que contribuem para que haja uma grande variabilidade nas manifestações do ciclo hidrológico, nos diferentes pontos do globo terrestre, pode-se enumerar: a desuniformidade com que a energia solar atinge os diversos locais, o diferente comportamento térmico dos continentes em relação aos oceanos, a quantidade de vapor de água, CO₂ e ozônio na atmosfera, a variabilidade espacial de solos e coberturas vegetais e a influência da rotação e inclinação do eixo terrestre na circulação atmosférica, sendo essa última a razão da existência das estações do ano (TUCCI, 2002).

O ciclo hidrológico é normalmente estudado com maior interesse na fase terrestre, onde o elemento fundamental de análise é a bacia hidrográfica. A bacia hidrográfica é uma área de captação natural da água da precipitação que faz convergir os escoamentos para um único ponto de saída, seu exutório. A bacia hidrográfica compõe-se basicamente de um conjunto de superfícies vertentes e de uma rede de drenagem formada por cursos de água que confluem até resultar em um leito único no exutório.

A bacia hidrográfica pode ser considerada um sistema físico onde a entrada é o volume de água precipitado e a saída é o volume de água escoado pelo exutório, considerando-se como perdas intermediárias os volumes evaporados e transpirados e também

os infiltrados profundamente. O balanço hídrico relaciona a quantidade de cada componente do ciclo, podendo ser efetuado em diversos níveis, de acordo com o volume de controle.

2.4.4 Vazão Ecológica

O balanço adequado entre utilização da água e manutenção de sua estrutura natural permite o uso continuado da água, no presente e futuro. Quando este balanço não é resguardado, funções exercidas pela água deixam de existir, com enormes prejuízos sociais (BENNETI, LANNA e COBALCHINI, 2003). Exemplos destas situações encontram-se descritos em Goldwater (1971), Clarke (1991), Pratt (1997), Gleick (1998).

Uma das variáveis requeridas para possibilitar a continuidade das funções oferecidas pela água é a manutenção de vazões mínimas que suportem os ecossistemas aquáticos. Estas vazões têm sido chamadas de residuais, remanescentes, ecológicas e ambientais (BENNETI, LANNA e COBALCHINI, 2003). Estas vazões são definidas através de valores numéricos que representam a quantidade de água que permanece no leito do rio depois de retirada para atender usos externos tais como abastecimento público, industrial, irrigação e em algumas instâncias, energia elétrica. Em algumas situações, vazões mínimas também são fixadas para atender atividades de recreação.

De acordo com Collischonn et al. (2005), o conceito de vazão ecológica surgiu ao longo da segunda metade do século XX, quando os problemas associados ao manejo da água começaram a serem percebidos. Nos Estados Unidos, por exemplo, pesquisadores constataram que a redução da vazão de um rio estava associada à redução da diversidade de espécies ou da população de determinada espécie. As observações destes pesquisadores, que resultaram no que atualmente é conhecido como o Método Tennant, ou Montana, de determinação de vazão ecológica, indicaram qual a porcentagem de vazão que deveria ser

deixada no rio para manter diferentes níveis de qualidade de habitat para peixes (BENNETI, LANNA e COBALCHINI, 2003).

Para Craig, (2000), as atividades humanas como a irrigação, o abastecimento público e industrial de água e a geração de energia elétrica têm causado profundas alterações nos regimes naturais de vazão dos rios. Ao longo do tempo, percebeu-se que estas alterações de regimes têm profundos impactos sobre os ecossistemas associados ao rio e à área de inundação. Em diversos casos as alterações no regime fluvial contribuíram para a extinção de espécies nativas e para a invasão por espécies exóticas.

A quantidade de água necessária para dar sustentabilidade ecológica a um rio é variável no tempo e os critérios de definição de vazão remanescente nos rios devem contemplar não apenas as situações de vazões mínimas durante os períodos de estiagem, mas também os outros períodos que caracterizam o regime hidrológico (COLLISCHONN et al., 2005).

A qualidade ambiental de um rio e dos ecossistemas associados é fortemente dependente do regime hidrológico, incluindo a magnitude das vazões mínimas, a magnitude das vazões máximas, o tempo de duração das estiagens, o tempo de ocorrência das cheias e estiagem entre outros fatores (POFF et al., 1997). Em alguns casos, a vazão mantida à jusante é sempre superior à vazão definida como “ecológica”, e mesmo assim ocorrem danos ambientais importantes (COLLISCHONN et al., 2005).

Os impactos ambientais que constantemente causam maiores preocupação são os relacionados com a inundação de grandes áreas de floresta e a transformação de ambientes típicos de rio (lótico), em ambientes típicos de lago (lêntico), devida às alterações de qualidade de água associadas a estas transformações.

A grande limitação das metodologias baseadas no conceito de vazão ecológica, vazão remanescente ou vazão residual ocorre porque estas metodologias estão focadas sobre vazão

mínima, apenas. Não há preocupação em definir outros aspectos do regime hidrológico que são fundamentais para a manutenção dos ecossistemas (COLLISCHONN et al 2005).

A figura 2.8 simula um hidrograma fictício que representa a grande limitação dos hidrogramas ecológicos, em azul está a vazão à montante de um reservatório com ciclos sazonais de cheias e estiagens.

Figura 2.8 – Hidrograma ecológico fictício.

No período apresentado na figura 2.8 ocorreram duas cheias que foram completamente amortecidas no reservatório, de tal forma que a vazão à jusante não apresenta mais nenhum ciclo sazonal reconhecível, tornando muito semelhantes os valores de vazão durante a estiagem e a cheia.

Pode-se observar, também, que em nenhum momento a existência do reservatório desrespeitou os critérios de vazão ecológica. Pelo contrário, a vazão à jusante do reservatório durante as estiagens é, até, superior à vazão afluente ao reservatório. Como consequência desta modificação no regime hidrológico e da retenção de sedimentos no reservatório, grandes alterações ocorreram no ambiente fluvial e estuarino localizado mais à jusante (COLLISCHONN et al 2005).

Ao regime hidrológico natural de vazões estão associadas diversas outras variáveis ambientais, como a temperatura da água, a concentração de sedimentos, nutrientes e oxigênio dissolvido (POFF et al., 1997). Cada componente do regime hidrológico é importante na manutenção dos ecossistemas associados ao rio; entre esses componentes estão às estiagens, as cheias, o tempo e o período de ocorrência das cheias.

Petts e Maddock (1996) desenvolveram um hidrograma contendo as vazões mínimas necessárias para a manutenção das seguintes variáveis: o vale do rio, os peixes, a vegetação ribeirinha e o canal do rio (figura 2.9). O local em que foi desenvolvida essa pesquisa foi o Rio Salomão em Idaho, USA no ano de 1991.

Figura 2.9 – Hidrograma Ecológico desenvolvido por Petts e Maddock (1996).

3.1_ ÁREA DE ESTUDO

3.1.1 O sistema do Rio Ribeira do Iguape

A bacia do rio Ribeira do Iguape situa-se entre as latitudes 23°30'e 25°30' S e longitudes 46°50'e 50°00' W, e abrange uma área de 24.980 km², dos quais 61% pertencem ao Estado de São Paulo e 39% ao Estado do Paraná. Ela apresenta uma conformação alongada no sentido SO-NE, quase paralela à orla marítima, confrontando-se com as bacias dos rios Tietê ao norte, Paranapanema a oeste, Iguaçu ao sul, e tendo a leste pequenos cursos de água da vertente atlântica.

A evolução da paisagem na bacia do Ribeira de Iguape ocorreu em ciclos diferenciados de períodos anteriores: o primeiro de 16000 a 8000 anos, a região inseriu-se em um bioma único que se estendeu desde o Maranhão até o Rio Grande do Sul; o segundo, de 8000 a 5000 anos, quando a região estabelecia uma ligação direta com o sistema fluvial da Bacia do Rio Paraná; e o terceiro, quando se configurou o bioma atual da Mata Atlântica, produto das interações naturais e antrópicas dos últimos 5000 anos. A antropização da área responde à cultura “sambaqui” de pré-colonização e a ocupação portuguesa a partir do século XVI (DEAN, 2000). Estes períodos influenciaram os recursos hídricos e, fundamentalmente, a ecologia fluvial dos tributários das bacias do Baixo Ribeira. O bioma atual apresenta padrões de zonas de cabeceira, intermediárias e de transporte. Daí a hierarquia de eco-regiões de Mata Atlântica, Sistema Estuarino Lagunar, Mangue e diferentes ecótonos. Nesses habitats

convivem mais de 40 espécies de aves, 183 de anfíbios, 146 de répteis e 131 de mamíferos (GUIA VALE DO RIBEIRA, 2002).

Situada entre as regiões metropolitanas de São Paulo e Curitiba, das quais incorpora parcelas, a bacia do Ribeira de Iguape abriga, na maior parte, cidades de pequeno porte com destaque para Registro, Iguape, Apiaí, Juquitiba; na parte paulista, e Rio Branco do Sul, na paranaense.

A localização da parte paulista da área estudada está representada na figura 3.1.

Figura 3.1 - Mapa de localização da área de estudo (Fonte: CALIJURI 2005).

3.1.2 A bacia do rio Jacupiranga.

Dentro do sistema do Ribeira de Iguape foi escolhida, para a realização deste estudo, a bacia do rio Jacupiranga região do Baixo Ribeira de Iguape. Essa seleção deveu-se aos sistemas de tratamento de esgotos sanitários utilizados pelos municípios (sistemas de lagoas de estabilização), ao lançamento dos efluentes dos sistemas de tratamento nos rios e principalmente a área alagada localizada na microbacia do rio Jacupiranguinha, afluente do

Jacupiranga. A figura 3.2 representa o mapa hidrográfico da Bacia do Baixo Ribeira do Iguape.

Figura 3.2 Mapa Hidrográfico da área de estudo (Fonte: MOCELLIN 2005).

“A bacia do rio Jacupiranga, que está localizada no sul do estado de São Paulo, possui 1350 km², o que representa aproximadamente 8,6% da área total da Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHI) Ribeira de Iguape e Litoral Sul” (BORGES 2005).

A bacia do rio Jacupiranga tem como principais formadores os rios Jacupiranguinha (nasce a 950 metros de altitude) e Guaraú (nasce a 1293 metros de altitude na Serra do Cadeado). Partindo desse ponto o rio Jacupiranga apresenta a planície de inundação bastante pronunciada e tem como principais afluentes, nessa ordem: ribeirão do Turvo, ribeirão Padre

André, córrego Vargem Grande, ribeirão da Fonte, rio do Capinzal, córrego do Quilombo, rio Bamburral; em seguida recebe pequenos afluentes até desaguar no rio Ribeira de Iguape.

Quanto à ocupação do solo, quatro municípios contribuem para a área da bacia, sendo os principais: Jacupiranga (17041 hab.), Cajati (29227 hab.) e Pariquera-Açu (17649 hab.) (IBGE, 2000). Particularmente na região do rio Jacupiranga, observa-se grandes áreas ribeirinhas dedicadas às atividades agrícolas (cultivo de banana, com aproximadamente 7000 ha), extrativismo vegetal (palmito) e pecuário (cerca de 20000 cabeças de gado). Registram-se também presença de mineradoras (cobalto, ouro e fosfato), além da extração de areia e turfa nas áreas de várzea. Contudo, observam-se trechos intactos de floresta nativa (Mata Atlântica) entre essas áreas (BORGES, 2005).

Na tabela 3.1 apresentam se os dados da microbacia do rio Jacupiranga

Tabela 3.1 – Características da bacia do rio Jacupiranga (CALIJURI 2003)

Bacia	Jacupiranga
Área de drenagem (km ²)	1350
Planície de inundação (km ²)	36
Extensão do sistema fluvial (km)	40
Extensão total (com meandros) (km)	52
Largura do canal principal (bc) (m)	40 a 60
Largura da planície de inundação (bp) (m)	2 a 3
Datum da planície de inundação (m.s.n.m.m.)	10 a 13

3.1.2.1 Área Alagada da microbacia do rio Jacupiranguinha.

Na microbacia do rio Jacupiranguinha (figura 3.3), as áreas alagadas fazem parte de ecossistemas ligados a rios de planície de inundação e, portanto, estão sujeitas a alagamentos periódicos (JUNK et al. 1989). Nestas áreas, de acordo com Henry (2003), podem ocorrer dois tipos de interações laterais: a subterrânea, por infiltração e a superficial, pelo transbordamento do rio adjacente nos períodos de intensa precipitação pluviométrica.

Figura 3.3 Mapa da declividade da microbacia do rio Jacupiranguinha (Fonte: BENASSI 2006).

Por uma série de razões, as planícies de inundação são os ambientes que mais merecem cuidados especiais nas decisões de planejamento e gestão ambiental, o que, muitas vezes, não é levado em conta nas decisões de uso e ocupação do solo, resultando em uma série de problemas ambientais (MOCELLIN 2005).

A planície de inundação possui uma área de 125.505 m² e perímetro de 1550 m (figura 3.4). A área selecionada não apresenta em seu entorno vegetação nativa. A paisagem próxima ao sistema de áreas alagadas é dominada por pastagens, bananiculturas, gramíneas e árvores de pequeno e médio porte. O clima da região é subtropical úmido com verão quente. Observa-se também que o período chuvoso vai de setembro a março e o período de seca de abril a agosto (BENASSI 2006).

Figura 3.4 Localização da planície de inundação na bacia do rio Jacupiranguinha, em azul o sentido do rio.

3.1.2.2 Levantamento Topográfico da Área Alagada

A área da planície de inundação foi delimitada de acordo com as cotas topográficas. Para relacionar área alagada com o nível do rio, foi preciso um levantamento da topografia de toda área de várzea. O equipamento utilizado no cálculo foi um Teodolito modelo MOM-BUDAPEST TE-D43. O ponto utilizado como referência para o levantamento topográfico foi o fundo do canal do rio Jacupiranguinha na entrada da área alagada (Cota 0,00 m da figura 3.5). Essa escolha deve-se a instalação de equipamentos de monitoramento linimétricos nesse ponto do rio. Com os resultados das diferenças entre as cotas dos pontos levantados dividiu-se a planície de inundação em quatro curvas de níveis, apresentadas na tabela 3.2 e em amarelo tracejado na figura 3.5, relacionando assim a ordem das áreas mais baixas que primeiramente serão alagadas.

Tabela 3.2 Área e cota topográfica das 4 curvas de nível da planície de inundação.

Curva de Nível	Área (m ²)	% do Total	Cota Topográfica (m)
1	15438,30	12	2,474
2	55320,57	43	2,707
3	37309,22	29	3,016
4	20584,40	16	2,901

Figura 3.5 - Área alagada com os valores de cotas topográficas medidas em campo em março de 2006, em azul o sentido do rio.

3.1.2.3 Descrição Morfológica do Rio Jacupiranguinha Segundo a Classificação de Rosgen.

O rio Jacupiranguinha é um afluente do rio Jacupiranga, e está localizado entre os municípios de Jacupiranga e Cajati.

Para determinar a morfologia do rio segundo a classificação de Rosgen é necessário analisar as seguintes características do rio: sinuosidade, declividade, relação entre largura e profundidade do canal, entrincheiramento e material granulométrico predominante no leito do rio.

Moccellin (2006) caracterizou a granulometria do sedimento do leito do Rio Jacupiranguinha no período de janeiro a setembro de 2005. O canal é predominantemente formado por areia (80 – 85%) contando ainda com uma pequena porcentagem de cascalho (10 a 15%), argila (0 a 2%) e silte (0 a 1%).

Pela análise de fotografias aéreas e visitas a campo tem-se que esse rio é altamente sinuoso com alta proporção de entrincheiramento.

A relação entre largura e profundidade do canal é de 12,2, e a declividade do canal é de 0,0019 m.

De acordo com as classificações criadas por Rosgen (1996), o Rio Jacupiranguinha é considerado sendo do tipo C5 (figura 3.6), pois o leito do rio é predominantemente formado por areias com pequenos acúmulos de cascalho e ocasionalmente silte e argila, a declividade é menor que 0,02 e a razão entre a largura e a profundidade do canal, é maior que 12.

Figura 3.6 – Ilustração do tipo de Rio C5 de acordo com a classificação de Rosgen (1996).

3.1.3 Características dos municípios.

Duas cidades fazem parte da microbacia do rio Jacupiranga: Cajati e Jacupiranga.

3.1.3.1 Cajati.

O município de Cajati tem uma área correspondente a 455 km², a sede do município esta localizada nas coordenadas 24°43'39''S e 48°07'30''W. Segundo SABESP (2002), sua população está em torno de 29.018 habitantes, com 72,14% desse total na área urbana. O índice de atendimento de abastecimento de água da região é de 100%, e 71% das casas estão ligadas à rede de coleta de esgoto.

3.1.3.2 Jacupiranga

O município de Jacupiranga ($24^{\circ}41'23''\text{S}$ e $48^{\circ}00'09''\text{W}$), ocupa uma área de aproximadamente 640 km², e tem uma população de 16995 habitantes (59,95% vivem em área urbana). Neste município, 100% das casas estão ligadas a rede de abastecimento de água e 84% a rede de coleta de esgoto; destes, 90% são destinados ao tratamento em lagoas de estabilização.

3.2_ MONITORAMENTO HIDROLÓGICO.

O sistema de áreas alagadas naturais investigado está situado a aproximadamente 2500 m do perímetro urbano do município de Cajati e a 1500 m da ETE. A planície de inundação localiza-se adjacente ao canal principal do rio Jacupiranguinha (margem esquerda do rio) (BENASSI 2006). Nos períodos chuvosos e de cheias, ocorre uma evidente conectividade entre o ecossistema lótico e o sistema de áreas alagadas.

Foram selecionados cinco pontos de coletas de dados hidrométricos e um ponto de coletas de dados climatológicos, suas respectivas localizações geográficas estão na tabela 3.3.

As coletas de dados hidrométricos foram feitas através da construção de estações linimétricas compostas de réguas e/ou linígrafos automáticos, permitindo o registro manual diário ou automático do nível da água do rio ou das lagoas da planície de inundação ao longo do tempo. A coleta de dados climatológicos foi possível através de uma estação meteorológica instalada nas proximidades da área alagada.

Tabela 3.3 - Localização geográfica das estações de monitoramento da planície de inundação do rio Jacupiranguinha.

Estações Instaladas	LATITUDE			LONGITUDE		
	Graus	Minutos	Segundos	Graus	Minutos	Segundos
Limnógrafo Entrada (1)	24	43	1,9	48	5	0,2
Limnógrafo Saída (2)	24	43	0,1	48	4	40,1
Regua 1_ Lagoa 1 (3)	24	42	57,6	48	5	0,3
Regua 2_ Lagoa 2 (4)	24	42	46,8	48	4	52,2
Regua 3_ Saída (5)	24	43	0,2	48	4	42
Estação Jacupiranga	24	42	32	48	5	5

A figura 3.7 é uma vista aérea de toda a planície de inundação do rio Jacupiranguinha.

As estações linimétricas instaladas estão representadas na mesma gravura, juntamente com seus respectivos números de identificação que estão entre parênteses.

Figura 3.7 - Ilustração da planície de inundação e as cinco estações fluviométricas instaladas e a seta azul representa o sentido do fluxo do rio Jacupiranguinha (BENASSI, 2006).

3.2.1 Estações Linimétricas.

Foram instaladas cinco estações linimétricas dentro do sistema de áreas alagadas naturais selecionadas. Em três delas, as coletas dos dados hidrométricos foram monitorados através de réguas hidrométricas permitindo o registro manual diário do nível da água das lagoas da planície de inundação.

As estações de registro manual foram instaladas em três pontos da planície de inundação:

- Lagoa 1 **(3)** – Primeira área a sofrer alagamento com o extravasamento da calha do rio Jacupiranguinha.
- Lagoa 2 **(4)** – Representa a maior área alagada de toda a planície possui dois sub-sistemas (lagoas).
- Saída **(5)** – Localizada dentro de um córrego na saída da área alagada.

As outras duas estações linimétricas são automáticas e registram dados de nível e temperatura da água em intervalos de uma em uma hora, e foram instaladas dentro do rio Jacupiranguinha na entrada **(1)** e outra na saída **(2)** da planície de inundação. Porém na estação automática da entrada do rio foram colocadas três réguas linimétricas a fim de aumentar a precisão da determinação de vazão.

Cada estação linimétrica, foi instalada em uma determinada cota topográfica, esta cota é relativa ao fundo do canal do rio Jacupiranguinha na entrada da área alagada **(1)** exatamente onde foram instaladas as réguas linimétricas e o linígrafo automático. Essa escolha se deve ao fato da seção transversal deste ponto do rio ser a escolhida para a construção da curva-chave e também porque topograficamente está na menor cota entre todos os outros pontos estudados.

Na tabela 3.4 estão relacionadas às cotas topográficas das estações linimétricas situadas na planície de inundação em relação ao fundo do canal na entrada da área de várzea.

Tabela 3.4 Cotas topográficas das estações linimétricas.

Estações Instaladas	Cota Topográfica (m)
Limnígrafo Entrada (1)	0,000
Limnígrafo Saída (2)	4,603
Regua 1_ Lagoa 1 (3)	1,842
Regua 2_ Lagoa 2 (4)	2,812
Regua 3_ Saída (5)	2,901

3.2.1.1 Linígrafo Automático e Réguas na Entrada da Área Alagada (1).

Linígrafo Automático.

As figuras 3.8 e 3.9 ilustram respectivamente o linígrafo automático modelo LI3050 da T&S equipamentos e a instalação do mesmo no rio Jacupiranguinha na entrada da área alagada.

Figura 3.8 – Linígrafo automático da T&S equipamentos.

Figura 3.9 – Instalação do linígrafo no rio Jacupiranguinha.

Os dados de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) e cotas hidrométricas(m) do rio Jacupiranguinha, foram armazenados no *datalogger* (tipo de HD) do equipamento num tempo de discretização de uma em uma hora, com autonomia em campo de quatro meses.

A estação linimétrica automática (1) da entrada da planície de inundação começou a funcionar em maio de 2006, Suas atividades dependem de baterias carregadas por painel solar ou somente por um conjunto de quatro pilhas de lithium de 3.2 volts.

Réguas Hidrométricas.

Com a finalidade de facilitar e aumentar a precisão da medição de vazão do rio Jacupiranguinha, foi instalado um conjunto de três réguas na mesma seção transversal na entrada da área alagada. A figura 3.10 mostra as réguas instaladas nesta seção. A leitura máxima alcançada é de três metros e foi colocada a uma distancia de 28 a 30 centímetros do ponto mais profundo do canal.

Figura 3.10 – Réguas instaladas na seção da entrada da área alagada, vistas da margem esquerda pra direita, a seta representa o sentido do fluxo do rio.

3.2.1.2 Linígrafo Saída da Área Alagada (2).

A estação linimétrica automática da saída da área alagada **(2)** foi utilizada a aproximadamente 600 m a jusante do linígrafo automático da entrada da planície de inundação e foi composta por um linígrafo automático (modelo LI3050 da T&S equipamentos). O nível do rio e a temperatura da água foram programados com intervalos de tempo de uma em uma hora.

A cota topográfica do local em que foi instalado o *data logger* do linígrafo estava a 4,603 m em relação ao fundo do canal da estação **(1)**, entretanto a declividade entre os fundos do rio nas estações **(1)** e **(2)** foi 1,381 m.

A estação **(2)** começou a funcionar em maio de 2006, o linígrafo acabou sendo danificado e deixou de registrar dados em setembro de 2006; por decisão do pesquisador a estação **(2)** foi desativada, devido a riscos de novas ocorrências de ataques.

3.2.1.3 Régua 1_ Lagoa na Entrada da Área Alagada (3).

A lagoa na entrada da área alagada possui a menor cota topográfica em relação ao ponto de referência na entrada da planície de inundação (1,842 m). Isso faz com que seja a primeira área a sofrer interferência da água proveniente do rio.

É importante salientar que a cota de 1,842 se refere a altura do fundo da lagoa em relação ao fundo do rio e não a altura do barranco, por tanto a cota de extrapolação do rio é maior que 1,842 m como será apresentado no capítulo seguinte.

A figura 3.11, mostra às réguas linimétricas instaladas e a seta mostra o caminho da água do rio pra dentro da lagoa.

Figura 3.11 – Réguas Linimétricas instaladas na lagoa 1 – entrada da área alagada.

A estação linimétrica (3) está em funcionamento desde maio de 2006 e até a última visita a campo, não apresentou problema algum. A maior altura que pode ser registrada pelas réguas é três metros e os dados têm sido coletados duas vezes por dia às 7:00 e às 18:00.

3.2.1.4 Régua 2_ Maior Lagoa da Área Alagada (4).

A lagoa 2 representa a maior área de toda planície de inundação. Fazem parte desta área duas lagoas com o maior volume de armazenamento entre todas as outras da região. De acordo com Benassi (2006), essas duas lagoas foram divididas em dois sub-sistemas, no primeiro a largura e o comprimento máximo são respectivamente 45 m e 260 m no segundo, a largura é de 100m e o comprimento é de 90m.

Na tabela 3.5 apresentam-se os parâmetros morfométricos (área, volume, perímetro, comprimento máximo e mínimo) dos dois sub-sistemas. Nota-se que o primeiro apresentou

maior área (9.110 m^2) e maior volume (9.900 m^3) quando comparado ao segundo com 6.428 m^2 e 7.392 m^3 .

Tabela 3.5 Dados morfométricos dos sub-sistemas 1 e 2 (BENASSI 2006)

	Sub-sistema 1	Sub-sistema 2
Área (m^2)	9.100	6.428
Perímetro (m)	577	322
Comprimento (m)	260	100
Largura máxima (m)	45	85
Volume (m^3)	9900	7.392

A cota de 2,812 m representa a relação entre o fundo do canal do rio na entrada da área alagada e o espelho d'água quando o mesmo possui aproximadamente 50 cm de altura.

A figura 3.12 apresenta a estação linimétrica (4) que está localizada dentro do sub-sistema 2, a seta representa o caminho da água do rio, quando este transborda, até a área de várzea.

Figura 3.12 – Estação linimétrica (4) localizada na lagoa 2.

A estação (4) está instalada desde outubro de 2004 e foram coletados dados até julho de 2005.

A máxima altura de leitura da estação (4) é de três metros e os seus dados têm sido coletados diariamente em dois períodos as 7:00 e as 18:00.

3.2.1.5 Régua 3_ Córrego na Saída da Área Alagada (5).

A estação linimétrica (5) está localizada em um pequeno córrego de aproximadamente 2,0 m de largura de canal e 1,5 m de profundidade, ela está por volta de 4,0 m do rio Jacupiranguinha e é considerado a saída da água da área alagada.

A figura 3.13 mostra a estação (5) e ao fundo o ponto do rio jacupiranguinha onde o córrego deságua, a seta verde indica a direção da água, que em épocas de cheias nem sempre se comporta desta maneira.

Figura 3.13 – Estação linimétrica (5) e ao fundo o rio Jacupiranguinha.

A relação entre o ponto de entrada da área alagada (estação 1) e a estação (5) está representada na figura 3.14.

Nota-se pela figura que a cota hidrométrica no córrego de saída (5) tem uma relação de dependência com a cota do rio. No instante em que foi feito o estudo da declividade do fundo do rio Jacupiranguinha (24/09/06) a linha da água medida na estação (1) era de 0,84 m, no

ponto do rio em que deságua o córrego de saída à altura era de 1,09 m e na estação linimétrica (5) a cota era de 0,16 m.

Ao analisar somente os dados de declividade do fundo do canal e as cotas da linha d'água, o valor que deveria estar sendo marcado na estação linimétrica é 0,154 m o que comprova os dados de levantamento realizados em campo.

Figura 3.14 – Esquema relacionando a estação linimétrica (1) e (5).

A relação entre a estação (1) e (5) pode ser escrita também em forma de curva gráfica (figura 3.15) onde as cotas hidrográficas da estação (1) estão no eixo das ordenadas e da estação (5) na abscissa.

Como a estação (5) está operando desde outubro de 2004 e a estação (1) somente começou a funcionar em maio de 2006, utilizou-se a equação da figura 3.15 para transformar as cotas hidrométricas do córrego da saída da área alagada em cotas do rio Jacupiranguinha na entrada da planície de inundação.

A máxima altura de leitura da estação (5) é de três metros e os seus dados têm sido coletados diariamente em dois períodos as 7:00 e as 18:00.

Figura 3.15 – Relação gráfica das estações linimétricas (1) e (5).

3.2.2 Estação Climatológica.

A estação climatológica instalada na bacia do rio Jacupiranguinha está localizada a aproximadamente 1500 m de distancia da estação linimétrica da entrada da área alagada (1) e a uma altitude de 40 m em relação ao mesmo ponto. A escolha de sua localização se deve ao fato de não haver interferências ao seu redor e também por medidas de segurança, pois está dentro de uma área privada (figura 3.16).

A estação meteorológica usada determina a pressão barométrica, temperatura, umidade, ponto de orvalho, velocidade e direção de vento, precipitação e radiação solar. Na versão utilizada os Sensores Integrados é alimentado por energia solar e o console pode ser alimentado através do adaptador 12 Volts ou com três baterias.

Os dados climatológicos da estação foram coletados de uma em uma hora e foram sincronizados com o relógio das estações linimétricas automáticas (1) e (2).

Figura 3.16 – Estação climatológica da bacia do rio Jacupiranguinha.

3.3_ CURVA-CHAVE

A curva-chave de uma seção pode ser representada de três formas: a forma gráfica, a equação matemática e a tabela de calibragem.

Nesse trabalho o método de apresentação adotado foi a forma gráfica, na qual, os valores de cota (H) presentes no eixo das abscissas e os valores de (Q) no eixo das ordenadas.

São duas as formas de equações mais utilizadas para representar a curva-chave.

A forma da potencia:

$$Q = a(H - H_0)^n$$

Onde: a e n - coeficientes de ajuste para cada curva-chave

H - cota referente a uma vazão Q

H_0 – cota referente a vazão nula.

e a forma polinomial dos tipos quadráticas e cúbicas.

$$Q = a_0 + a_1H + a_2H^2 + \dots + a_nH^n$$

Onde: a_1 , a_2 , a_n , e n – coeficientes de ajuste para cada curva.

H – cota referente a uma vazão Q.

3.3.1 Etapas para a Geração da Curva-Chave

Para construir a curva-chave devem-se seguir quatro etapas descritas por Sefione (2000):

- Determina-se por uma série de critérios hidráulicos e logísticos um local ao longo do curso d'água, onde se deseja conhecer os valores de vazão. Instala-se então, uma estação fluviométrica contendo equipamentos de medição de nível d'água como réguas linimétricas ou linígrafos, permitindo o registro manual diário ou automático do nível de água do rio ao longo do tempo, que compõe a série histórica de cotas observadas da estação;
- Periodicamente fazem-se medições diretas da vazão junto ao local escolhido da estação. Associa-se a cada medida de vazão a cota referente, obtendo-se um ponto no gráfico $H \times Q$. Procura-se, dentro do possível, determinar esses valores de vazão para uma faixa de cotas medidas mais ampla e contínua possível, obtendo-se um conjunto de pontos;
- Traça-se então a curva de maior aderência aos pontos, utilizando-se de programas ou planilhas computacionais geralmente pelo método da potencia, no final, pode-se dispor da(s) equação(ões);
- Finalmente, através da curva-chave, convertem-se os valores de cotas observadas em vazões, obtendo-se assim uma serie de vazões históricas ou fluviograma, produto final do processo.

Geralmente a seção transversal do rio sofre ao longo do tempo alterações no seu perfil, devido principalmente a erosão, a deposição de sedimentos, ações antrópicas, a vegetação etc. por isso pode ser necessário fazer novos ajustes, na curva-chave apoiadas em novas medidas de vazão.

3.3.2 Metodologia para a Determinação de Vazões.

“Para se traçar uma curva-chave, são necessárias medições de vazão feitas na maior amplitude de cotas que se possa alcançar e com a maior precisão possível, de forma a diminuir a faixa de cotas de extrapolação e ter-se maior confiança na calibração da curva”(SEFIONE, 2002, p. 03).

Existem vários métodos de medição de vazão tais como, medição feita em barco com *Cabo Estendido*, *Método dos Grandes Rios*, *Método de Pontes*, etc. Porém, para esses trabalho foi utilizado o método da *Meia Seção* (OLIVEIRA, 1973).

Todos os métodos de medição de vazão descritos calculam a vazão a partir da medição de velocidade da água no rio e da aplicação da continuidade para os fluidos.

Segundo Martins e Paiva (2001) o aparelho geralmente utilizado para medição de velocidade é o molinete hidrométrico, o mesmo, permite a determinação das velocidades através da contagem do número de rotações de sua hélice em um dado período de tempo, ou, alternativamente, através da marcação do tempo levado para sua hélice executar um predeterminado número de rotações. Uma vez obtidos o número de rotações (N) e o tempo decorrido (t) correspondente a estas, calcula-se o número de rotações por segundo $n = N/t$ (rps). Com esta velocidade angular obtém-se, a partir de equações calibradas pelo fabricante, a velocidade da corrente fluida. Estas equações são do tipo $V = a + bn$ (m/s), onde a e b são constantes do aparelho (MARTINS E PAIVA 2001).

A medição de vazão consiste então em determinar a área da seção de medição e a velocidade em vários pontos distribuídos em verticais desta mesma seção para posterior obtenção da velocidade média em cada vertical (MARTINS E PAIVA 2001).

Com as velocidades médias calculadas para cada vertical, a profundidade de cada vertical e a distancia entre verticais é possível calcular a vazão utilizando métodos numéricos

simplificados. Entre estes se destaca o método da seção média (ou método de Simpson simplificado) e o método da meia seção (figura 3.17).

Figura 3.17 - Ilustração do método da Meia Seção (SEFIONE, 2002).

Os erros totais na determinação da vazão, segundo Silveira (1974), no caso de uma medição bem feita executada, não devem ultrapassar os 5%, sendo 2% devido à determinação da distancia entre as margens e verticais; 2% devido à medição das profundidades e perfil transversal e 1% nas medições de velocidade.

3.3.3 Rugosidade e Geometria do Leito do Rio.

De acordo com Jacon e Cudo (1989) a curva-chave depende de forma intrínseca das condições de escoamento no curso d'água. É necessário, portanto, que se conheça bem as características geométricas e hidráulicas da seção e do trecho onde esta se localiza.

As características do escoamento num curso d'água dependem basicamente de dois fatores: geometria e rugosidade do leito. Além de se ter uma boa compreensão sobre esses parâmetros é fundamental conhecer a mobilidade do leito, ou seja, sua variabilidade no tempo e no espaço, permitindo assim constantes ajustes na curva-chave, por períodos e cotas (SEFIONE, 2002).

3.3.3.1 Aspectos Geométricos do Leito do Rio

Na geometria, três aspectos podem influenciar no traçado da curva chave:

- Traçado – diz respeito à forma em planta do rio, sendo mais ou menos meandrante ou sinuoso. Curvas mais fechadas, confluências e defluências são as singularidades no traçado que podem refletir sobre a curva (SEFIONE, 2002);
- Perfil Longitudinal – diz respeito à declividade do rio, reflexo da topografia da região. Existem duas declividades importantes, a do leito do rio e da linha d'água (SEFIONE, 2002);
- Seção transversal – no caso da curva chave, a seção transversal considerada é aquela relativa às águas linimétricas. Admite-se também, para efeito de simplificação, muito próximo da realidade, a seção transversal como sendo uma seção vertical e perpendicular às margens, o que a rigor não é verdade dado a inclinação do leito e a complexidade nas direções de escoamento (JACCOM E CUDO, 1989). Os dois parâmetros mais importantes neste caso são a Área Molhada (A_m) – calculada através da batimetria da seção – e o Raio Hidráulico (R_h), calculada pela equação:

$$R_h = \frac{A_m}{P_m}$$

Onde P_m é o perímetro molhado, comprimento da linha de contato entre a água e o leito numa seção transversal do curso d'água.

3.3.3.2 Rugosidade do Leito do Rio

A Rugosidade do Leito é a medida do quanto à superfície de contato do leito do rio com a água proporciona a esta uma resistência ao fluxo. Essa resistência varia conforme a

natureza, granulometria do material, a conformação do fundo do leito e a ocorrência de elementos singulares como vegetação, pedras, etc. (SEFIONE, 2002).

Formula de Manning.

Diferentes fórmulas de origem empíricas são propostas para o cálculo do coeficiente de rugosidade do leito do rio. Uma relação simples, e atualmente a mais empregada, foi proposta por *Manning* em 1889, através da análise de resultados experimentais obtidos por ele e outros pesquisadores (PORTO 1998). A relação empírica é da forma:

$$\frac{nQ}{\sqrt{I_0}} = AR_h^{2/3}$$

Onde a n - o coeficiente de rugosidade de *Manning*

Q - vazão em m³/s

I_0 - declividade do canal em m/m

A e R_h - respectivamente área m² e raio hidráulico m.

A equação é denominada *fórmula de Manning*, válida para escoamentos permanentes, uniformes e turbulentos rugosos, com grande número de Reynolds e é à base de cálculos para os problemas sobre escoamentos livres (PORTO 1998).

É importante citar que à medida que aumenta a lâmina d'água, diminui a influência da rugosidade do leito sobre o escoamento. Quando a água extrapola a calha do rio e começa a invadir a planície de inundação, este prognóstico muda, conforme exemplificado pelo exemplo empírico de Yen (1992) (figura 3.18).

Figura 3.18 - Variação do coeficiente de manning de acordo com a profundidade da linha d'água. (YEN, 1992).

3.3.4 Rugosidade e Geometria da Área Alagada.

De acordo com Yen (1992), a rugosidade da planície de inundação, em geral, é maior do que a do canal do rio, isso se deve, a vegetação e aos obstáculos encontrados pela água nas áreas alagadas. Essa variação da rugosidade foi apresentada na figura 3.18.

Para calcular a rugosidade da planície de inundação, Yen (1992), apresenta algumas equações, que para serem usadas, deverão ser assumido hipóteses relativas principalmente a declividade, vazão e velocidade.

A formula de n_c (rugosidade do canal) a ser empregada, sugere que a vazão total é a soma de todas as vazões geradas por todas suas respectivas sub-áreas. Isso quer dizer que a declividade da área alagada é a mesma do canal do rio ($S = S_i$) e que $Q = VA = \sum (V_i A_i)$.

$$n_c = \frac{PR^{\frac{5}{3}}}{\sum \frac{P_i R_i^{\frac{5}{3}}}{n_i}}$$

Onde: P e R são respectivamente, perímetro e raio hidráulico do canal e

P_i , R_i e n_c são respectivamente, perímetro, raio hidráulico e *manning* de todas as sub-áreas que são alagadas.

Existem outras formulas para o cálculo da rugosidade de manning na planície de inundação, que não serão utilizadas, devido principalmente, as diferenças entre as hipóteses necessárias para o uso correto dessas equações e as realidades que ocorrem na área estudada.

3.3.5 Métodos de Extrapolação de Curvas-Chave.

A extrapolação da curva-chave é necessária quando há valores de cota máxima observada maior que a maior cota registrada nas medições de vazão – caso da extrapolação superior – ou quando a menor cota observada for menor que a menor cota registrada nas medições de vazão – caso da extrapolação inferior (SEFIONE 2002).

A necessidade de extrapolação é a regra, e não a exceção entre as estações fluviométricas, principalmente a extrapolação superior da curva. Isto se dá devido a dificuldade de se ter um número suficiente de equipes a postos para efetuar medições de vazão nos momentos de cheia, ou quando isso acontece, pode haver impossibilidade de se efetuar a medição devido aos riscos, em função das altas velocidades das águas do rio (TUCCI e SILVEIRA, 1985).

Os métodos descritos a seguir são os mais simples e tradicionalmente utilizados. Uma condição comum a todos é que o escoamento seção linimétrica seja uniforme ou bem próximo disto.

Os métodos utilizados neste trabalho foram os métodos de Stevens, Velocidade Média, e a equação da curva de tendência da relação vazão cota através da forma de potência.

3.3.5.1 Método de Stevens

Esse método utiliza a formula de Chezy e só é aplicável aos escoamentos pseudos-uniformes como mostra o desenvolvimento a seguir baseado em Jaccom e Cudo (1989).

Princípio do método: Equação de Chezy

$$U = C\sqrt{RI}$$

Onde U - a velocidade média

R - é o raio hidráulico

I - a declividade da linha de carga

C - é um coeficiente variável, função principalmente do raio hidráulico e da natureza do leito.

Entre as formulas empíricas que exprimem o coeficiente C de Chezy, foi escolhida a de Strickler, que é expressa por:

$$C = KR^{1/6} \quad \text{sendo K - o inverso do coeficiente de rugosidade de Manning.}$$

Stevens apresenta a formula de Chezy sob a forma $Q/S\sqrt{R} = C\sqrt{J}$, após separação das quantidades $S\sqrt{R}$ e $C\sqrt{J}$, denominadas respectivamente fator geométrico e fator de declividade.

Nos limites da aplicação da formula de Chezy, os dois termos da equação variam muito pouco.

$Q/S\sqrt{R} = \text{constante}$, significa que a descarga (Q) em função de $S\sqrt{R}$ é representada, em um sistema de eixos retangulares, por uma reta que passa pela origem. Esta reta traçada a partir das medições disponíveis pode ser prolongada até o valor do fator geométrico correspondente à cota máxima observada.

O método é totalmente gráfico como mostra a figura 3.19.

Figura 3.19 - Extrapolação pelo método de Stevens (SEFIONE, 2002 adaptado de JACOON E CUDO 1989).

Constroem-se sobre o mesmo gráfico, as curvas de Vazão (Q) em função de $S\sqrt{R}$ e de cotas (h) em função de $S\sqrt{R}$: as quantidades de $S\sqrt{R}$ são plotadas na ordenada, as cotas e as descargas nas abscissas sobre 2 semi-eixos opostos.

Além do fato de que o escoamento deve ser quase uniforme, o método de Stevens só é aplicado:

- se o perfil é estável: $S\sqrt{R}$ não deve variar entre cheias e depleção.
- se dispõe de um número de medições corretamente alinhadas.

Esse método, segundo Tucci e Silveira (1985), tem a vantagem de não depender das velocidades medidas, já que, nas medições de vazão, é comum utilizar-se duas ou até três seções diferentes o que poderia implicar em diferenças.

3.3.5.2 Método da Velocidade Média

Esse método ao contrário do precedente é aplicável às seções de forma irregular e admite que, para as cotas elevadas, a velocidade média cresce linearmente em relação às cotas (TUCCI e SILVEIRA, 1985). A extrapolação da curva chave é feita considerando-se separadamente as duas componentes de descargas:

- a área molhada S , de dimensão m^2 (comprimento ao quadrado) é conhecida, com uma boa precisão, se dispõe de um perfil transversal até a cota máxima;

- a velocidade média do escoamento U , de dimensão m/s cujo crescimento com a cota, em águas medias e altas, é muito menos rápida do que a descarga.

Esse método resume-se então, a extrapolação da curva $U(h)$ como indica a figura 3.20. A seção transversal considerada é a seção das réguas.

Figura 3.20 - Extrapolação pelo método da Velocidade Média (adaptado de JACOON E CUDO 1989).

A velocidade média de escoamento é calculada para cada descarga média, usando-se a área molhada do perfil transversal da seção de réguas.

As duas curvas $S(h)$ e $U(h)$ são traçadas na abscissa em eixos opostos já a cota (h) é traçada no eixo das ordenadas.

A extrapolação da curva $U(h)$ é feita conservando-se a tendência das ultimas medições.

Uma desvantagem desse método, segundo Tucci e Silveira (1985), é a sua dependência da variável velocidade, medida comumente em seções diferentes, o que pode comprometer os resultados.

3.3.5.3 Método da Curva de Tendência

O método da extrapolação da curva-chave através da curva de tendência é o mais simples dentre os métodos utilizados neste trabalho.

O método consiste em graficar as vazões medidas em campo nas ordenadas e as cotas relativas a essas descargas nas abscissas e adicionar a linha de tendência, na forma de potencia, desta relação.

A maior deficiência deste método é não levar em conta nem o fator geométrico nem o fator de declividade da seção transversal além de considerar a mesma como sendo uma seção regular, o que na maioria das vezes não é real.

3.3.6 Comparação entre métodos de extrapolação.

Dada as imprecisões inerentes à extrapolação das curvas-chave é de grande valia a aplicação do maior número de métodos disponíveis, tanto quanto permitam os dados e as limitações impostas por cada método. No entanto, uma questão fundamental que surge é a escolha ou a ponderação que se deve dar a cada método, uma vez que na faixa de extrapolação não se tem medição de vazão para balizar uma comparação entre métodos (SEFIONE 2002).

3.4_ INCERTEZAS DA CURVA-CHAVE

De acordo com Chow et al. (1988), as metodologias usadas para gestão aplicada de incertezas são baseadas em métodos simples como forma aproximativa do problema. Não existem metodologias de quantificação exata de incertezas hidrológicas..

3.4.1 Equação de Manning com Profundidade como Variável Dependente.

Para o dimensionamento de um canal calculam-se a profundidade do fluxo “y” para um dado valor de vazão “Q”, um coeficiente de rugosidade “n” e uma declividade de energia “Sf”, a partir da equação de Manning:

$$Q = \frac{1}{n} AR^{2/3} S_f^{1/2}, \quad (1)$$

sendo A e R a área e o raio hidráulico da seção transversal. Utilizando a equação de propagação da variância têm-se:

$$s_y^2 = \left(\frac{dy}{dQ} \right)^2 s_Q^2 \quad (2)$$

Demonstra-se que:

$$\begin{aligned} \frac{dQ}{dy} &= \frac{1}{n} S_f^{1/2} \left(\frac{dA}{dy} R^{2/3} + \frac{2}{3} AR^{-1/3} \frac{dR}{dy} \right) = \frac{1}{n} AR^{2/3} S_f^{1/2} \left(\frac{1}{A} \frac{dA}{dy} + \frac{2}{3} \frac{1}{R} \frac{dR}{dy} \right) \\ \frac{dQ}{dy} &= Q \left(\frac{1}{A} \frac{dA}{dy} + \frac{2}{3R} \frac{dR}{dy} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

Substituindo a (3) na (2), têm-se:

$$s_y^2 = \frac{s_Q^2}{Q^2 \left(\frac{1}{A} \frac{dA}{dy} + \frac{2}{3R} \frac{dR}{dy} \right)^2} = \frac{\Omega_Q^2}{\left(\frac{1}{A} \frac{dA}{dy} + \frac{2}{3R} \frac{dR}{dy} \right)^2}$$

Incluindo-se as incertezas da declividade e rugosidade resulta:

$$s_y^2 = \frac{\Omega_Q^2 + \Omega_n^2 + (1/4)\Omega_{S_f}^2}{\left(\frac{1}{A} \frac{dA}{dy} + \frac{2}{3R} \frac{dR}{dy} \right)^2} \quad (4)$$

3.4.2 Equação de Manning com Vazão como Variável Dependente.

A vazão de um canal ou de uma estrutura hidráulica é função da profundidade de fluxo, do coeficiente de rugosidade, da declividade do leito e da geometria da seção transversal. Através da equação de Manning, pode ser avaliado o coeficiente de variação para canais (geometrias) simples e também com planícies de inundação (figura 3.21) com geometrias compostas (indicando “c”: canal, “b”: planície).

Figura 3.21 – Esquema de canal com planície de inundação

Canal simples:

$$Q = \frac{1}{n} AR^{2/3} S_f^{1/2} = \frac{1}{n} KS_f^{1/2}$$

Capacidade :

$$\text{Coeficiente de variação: } \Omega_Q^2 = \Omega_n^2 + \Omega_k^2 + (1/4)\Omega_{S_f}^2$$

Canais compostos, com planícies de inundação simétricas:

$$Q = \left(\frac{1}{n_c} A_c^{5/3} P_c^{-2/3} + \frac{2}{n_b} A_b^{5/3} P_b^{-2/3} \right) S_f^{1/2}$$

Capacidade:

$$\text{Coeficiente de variação: } \Omega_Q^2 = (1/4)\Omega_{S_f}^2 + \Psi^{-2}\Omega_{n_c}^2 + (\Psi - 1)^2 \Psi^{-2}\Omega_{n_b}^2$$

para

$$\Psi = 1 + 2 \left(\frac{n_c}{n_b} \right) \left(\frac{A_b}{A_c} \right)^{5/3} \left(\frac{P_c}{P_b} \right)^{2/3},$$

$$\Omega_{A_c}, \Omega_{P_c}, \Omega_{A_b}, \Omega_{P_b} \text{ muito pequenos, quando as paredes são regulares.}$$

3.5_ BALANÇO HÍDRICO

A bacia hidrográfica pode ser considerada um sistema físico no qual a entrada é o volume de água precipitado e a saída é o volume de água escoado pelo exutório, considerando-se como perdas intermediárias os volumes evaporados e transpirados e também os infiltrados profundamente. O balanço hídrico relaciona a quantidade de cada componente

do ciclo, podendo ser efetuado em diversos níveis, de acordo com o volume de controle. Nesse caso, a equação hidrológica fundamental é expressa por (Righetto, 1998):

$$Q_e - Q_s = V \quad (1)$$

Na qual Q_e a vazão de entrada, Q_s a vazão de saída e V o volume armazenado na bacia ou no sistema hídrico.

3.5.1 Componentes Do Balanço Hídrico

Todos os processos componentes do ciclo - precipitação, infiltração, escoamento superficial, evaporação e transpiração, além da ação humana - integram-se em um ciclo dinâmico que se estende por todo o planeta. Para que ele subsista, é necessário que haja suprimento de energia proveniente do Sol e do interior da Terra.

3.5.1.1 Precipitação

As características principais da precipitação são o seu total, duração e distribuições temporal e espacial. Precipitação é medida como altura de água ou lâmina que seria acumulada em superfície plana se nenhuma perda ocorresse. O aparelho utilizado para esta medição é o pluviômetro ou o pluviógrafo (MARTINS E PAIVA 2001).

No trajeto em direção à superfície terrestre a precipitação já sofre evaporação. Em algumas regiões esta evaporação pode ser significativa, existindo casos em que a precipitação é totalmente vaporizada.

Caindo sobre um solo com cobertura vegetal, parte do volume precipitado sofre *interceptação* em folhas e caule, de onde evapora (TUCCI, 2002).

3.5.1.2 Evaporação

Em meteorologia, o termo evaporação restringe-se à mudança da água no estado líquido para vapor devido à radiação solar e aos processos de difusão molecular e turbulenta. Além da radiação solar, as variáveis meteorológicas que interferem na evaporação, particularmente de superfícies livres de água, são a temperatura do ar, vento e pressão de vapor (TUCCI E BELTRAME, 1993).

As taxas de Evapotranspiração Potencial (ETP) foram calculadas pelo Método Combinado (PENMAN, 1956), através das componentes monitoradas pela estação climatológica: precipitação diária (mm), temperatura do ar média no dia (°C), radiação solar incidente na superfície terrestre [cal/(cm².dia)], o tempo de insolação (horas), pressão atmosférica (mb), umidade relativa (%) e velocidade e direção do vento (m/s).

No método utilizado, considera-se que a taxa de evaporação E em uma superfície de 1 m² de água aberta é dada pela seguinte formulação:

$$E(m/s) = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \cdot E_R + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} \cdot E_A \quad (2)$$

sendo E_R a taxa de evaporação por radiação, E_A a taxa de evaporação aerodinâmica, Δ o gradiente da curva pressão x vapor de saturação (Pa/°C) e γ a constante psicrométrica (Pa/°C). A taxa de evaporação aerodinâmica (E_A) corresponde, em geral, a 30% da taxa de evaporação por radiação (E_R) (Chow, 1900).

Taxa de evaporação por radiação (E_R):

$$E_R(m/s) = \frac{1}{l_v \cdot \rho_w} (R_N - H_s - G) \quad (3)$$

sendo l_v o calor latente de vaporização (J/kg), necessário para transformar de líquido a vapor 1 mm/cm² de água, dado por:

$$l_v = 2500000 - 2360.T \quad (4)$$

em que T é a temperatura ambiente (°C); ρ_w é a massa específica da água (kg/m³), variável com a temperatura; R_N é a radiação líquida disponível para a mudança de estado da água (W/m²), dada por:

$$R_N = \varepsilon \cdot \left(a + b \frac{n}{N} \right) \cdot (1 - \alpha) - \sigma \cdot T^4 \cdot (0,56 - 0,078 \cdot \sqrt{e}) \cdot \left(0,1 + 0,9 \frac{n}{N} \right) \quad (5)$$

sendo que ε é a radiação incidente global [cal/(cm².dia)], a e b constantes locais para o estado de São Paulo a = 0,24 e b = 0,58, α é o coeficiente de albedo, quociente entre a radiação refletida e a radiação incidente e estimado de acordo com as características da superfície, σ a constante de Stephan-Boltzmann [117x10⁻⁹ cal/(cm².dia.°K⁴)], T a temperatura ambiente (°K), n o número de horas de brilho solar efetivo, N o número máximo de horas de brilho solar teórico, função da latitude e época do ano (Tabela 3.6), e a pressão de vapor de água, dada por:

$$e = 611 \cdot \exp\left(\frac{17,27.T}{237,3 + T}\right) \quad (6)$$

sendo T a temperatura no ponto de orvalho (°C).

Para o cálculo da taxa de evaporação por radiação, foi suposto que o calor sensível HS e o fluxo de calor no solo G foram nulos.

Tabela 3.6 - Insolação Máxima Diária, N, em horas.

Latitude	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
0	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1
10°S	12,6	12,4	12,1	11,9	11,7	11,5	11,6	11,8	12,0	12,3	12,6	12,7
20°S	13,2	12,8	12,2	11,6	11,2	10,9	11,0	11,4	12,0	12,5	13,2	13,3
22°S	13,4	12,5	12,2	11,6	11,1	10,8	10,9	11,3	12,0	12,6	13,2	13,3
30°S	13,9	13,1	12,3	11,4	10,6	10,2	10,4	11,0	11,9	12,8	13,6	14,1
40°S	14,7	13,6	12,4	11,1	9,9	9,3	9,6	10,5	11,6	13,1	14,3	15,0

Fonte: Riguetto 1998.

A constante psicrométrica é dada por:

$$\gamma = \frac{C_p \cdot K_h \cdot p}{0,622 \cdot I_v \cdot K_w} \quad (7)$$

sendo C_p o calor específico a pressão constante igual a 1005 J/(kg.°K), p a pressão atmosférica (Pa) e K_h/K_w a relação de difusividades de calor e vapor, suposto igual a 1.

O gradiente da curva pressão x vapor de saturação é dado por:

$$\Delta = \frac{de_s}{dT} = \frac{4098 \cdot e_s}{(237,3 + T)^2}$$

(8)

sendo T a temperatura ambiente (°C) e S a pressão de vapor de saturação (Pa), dada pela equação:

$$e_s = \frac{e}{HR} \quad (9)$$

sendo HR a umidade relativa (%).

Taxa de evaporação aerodinâmica (E_a):

$$E_a = 0,27 \cdot (a_1 + b_1 \cdot u) \cdot [e_s(T) - e] \quad (10)$$

sendo $(a_1; b_1) = (0,5; 0,00625)$ para a água e $(1; 0,00625)$ para superfícies vegetadas, u em km/d e e em mb.

3.5.1.3 Escoamento

O escoamento é impulsionado pela gravidade para as cota mais baixas, vencendo principalmente o atrito com a superfície do solo. Com raras exceções, a água escoada pela rede de drenagem mais estável destina-se aos oceanos (TUCCI, 2002). O escoamento total é formado pelo escoamento superficial e subterrâneo.

Escoamento subterrâneo

O escoamento subterrâneo ou a capacidade de infiltração é a taxa máxima de com que um determinado solo pode absorver água em uma dada condição. É um parâmetro da mais alta importância no processo de transformação de chuva vazão. Seu valor depende da umidade, permeabilidade, temperatura do solo, e da capacidade da camada impermeável, grau de compactação do solo e cobertura vegetal.

No início do processo de infiltração, estando o solo seco, existirão grande diferenças de potencial entre a água na superfície do solo e o solo seco. A infiltração ocorre devido a essa diferença de potencial. Inicialmente em taxas elevadas, diminuindo gradativamente até atingir valores constantes, correspondentes a condutividade hidráulica do solo saturado, quando este atingir a saturação (MARTINS E PAIVA 2001).

Escoamento superficial

O escoamento superficial é a parcela do ciclo hidrológico em que a água se desloca na superfície da bacia até encontrar a calha do rio. Quando a bacia é rural e possui cobertura vegetal, o escoamento sofre a interferência desta cobertura e grande parte dele se infiltra. O escoamento em bacias urbanas é regido pela interferência do homem através de superfícies impermeáveis e sistemas de esgotos pluviais.

O escoamento superficial é, portanto, a combinação do fluxo de pequena profundidade na superfície com escoamento em pequenos canais que constituem a drenagem da bacia

hidrográfica. Para se determinar o escoamento superficial é necessário encontrar a vazão do rio e sua respectiva curva chave (capítulo 4).

3.5.2 Fluxograma das Componentes do Balanço Hídrico

Na figura 3.22 está representado através de um fluxograma o método de determinação do balanço hídrico da bacia do rio Jacupiranguinha. O primeiro passo foi à instalação dos equipamentos de monitoramento. Com as estações linimétrica e climatológica alojadas, calcula-se o escoamento superficial através da transformação de cotas hidrométricas (m) em descarga (m^3/s) (curva-chave). Com os dados climatológicos fornecidos pela estação meteorológica tem-se a precipitação e calcula-se a evaporação.

Figura 3.22 – Fluxograma para a determinação das componentes do balanço hídrico.

3.6_ VAZÃO ECOLÓGICA

3.6.1 Métodos de Determinação da Vazão Ecológica.

Atualmente os métodos de determinação da vazão ecológica podem ser classificados como métodos hidrológicos, hidráulicos, métodos de classificação de habitat e métodos holísticos (COLLISCHONN et al 2005).

Os métodos hidrológicos não analisam o aspecto ambiental, apenas presumem que a manutenção de uma vazão de referência, calculada com base em alguma estatística da série histórica, possa acarretar em benefício ao ecossistema. A principal vantagem destes métodos está na pequena quantidade de informações necessárias para sua implementação, em geral apenas a série histórica de vazões.

Os métodos hidráulicos relacionam características do escoamento com necessidades da biota aquática. Estes métodos têm maior consideração ecológica que os métodos hidrológicos, mas para sua correta aplicação, os métodos hidráulicos necessitam de relações específicas para a região em estudo.

Os métodos de classificação de habitat e os métodos holísticos são mais completos em termos de consideração de aspectos ambientais (BENNETI et al., 2003a). Estes, contemplam várias etapas, incluindo uma identificação das características físicas e ambientais do local em estudo, um plano de estudo elaborado por uma equipe multidisciplinar, chegando até a análise de diferentes alternativas antes da tomada de decisão. Estes métodos podem considerar aspectos econômicos, valorando a disposição a pagar pela preservação ambiental e os benefícios gerados pelo uso da água, em busca do ponto ótimo da quantificação da vazão ecológica (PANTE et al., 2004).

Neste trabalho foi utilizado somente um método hidrológico para se obter a vazão mínima:

O Método da curva de permanência de vazões, esse método utiliza valores de curva de permanência para estabelecer vazões ecológicas em uma base mensal ou anual. A curva de permanência é calculada através dos dados históricos de vazões, os quais são ordenados de forma crescente. A permanência de cada vazão observada é o percentual de vezes em que ela foi igualada ou superada (BENETTI 2003).

A escolha desse método se deve principalmente ao fato de se ter uma serie histórica de dados muito pequena.

3.6.1.1 Vazão de Referência Q90 diária.

As práticas adotadas para a definição da vazão ecológica em diversos estados brasileiros enquadram-se dentro dos métodos hidrológicos. Dentre as mais usadas está a vazão de referência Q90, que é a vazão com 90% de permanência no leito do rio no ponto de análise (SANTANA et al, 1998). Citando o exemplo do decreto de regularização da outorga, para o Estado da Bahia, a vazão de referência é a Q90 diária, desta vazão, apenas 20% poderá ser outorgada no pleito individual e, no máximo, 80% da Q90% poderá ser comprometida com as outorgas, em qualquer ponto do manancial, isto quer dizer, que a vazão ecológica indiretamente estabelecida é 20% da Q90.

A maioria dos estados que estabeleceram critérios de outorga de direitos de uso da água são provenientes do Nordeste, isso aconteceu devido a acordos entre os governos estaduais com organismos financiadores de projetos (Banco do Brasil, Banco do Nordeste e outros), que tinham fonte principal de desenvolvimento a água usada, por exemplo, na irrigação. Houve-se então a necessidade de se estimar com maior agilidade e precisão as disponibilidades hídricas (SANTANA et al, 1998). É importante salientar que praticamente todas abordagens que visam esse tipo de disponibilidade hídrica são destituídas de significados ecológicos (BENNETI, LANNA E COBALCHINI, 2003).

A grande limitação das metodologias baseadas no conceito de vazão ecológica, vazão remanescente ou vazão residual é que estas metodologias estão focadas sobre vazão mínima, apenas. Não há preocupação em definir outros aspectos do regime hidrológico que são fundamentais para a manutenção dos ecossistemas (COLLISCHONN et al. 2005).

3.7_ VARIÁVEIS LIMNOLÓGICAS

3.7.1 Local de coleta das variáveis físicas e químicas da água e da biomassa.

A estação (4), que está dentro da lagoa 2 do sistema de áreas alagadas (figura 3.23), foi o local escolhido como referência para melhor explicar a relação entre as variáveis hidrológicas e limnológicas. Essa escolha deve-se ao fato de que foram feitas varias coletas de variáveis físicas e químicas da água e de macrófitas aquáticas por Benassi (2006) e pelo fato de se encontrar no local, uma estação linimétrica manual operando desde outubro de 2004.

Figura 3.23 - Local escolhido como referência para melhor explicar a relação entre as variáveis hidrológicas e limnológicas

3.7.2 Períodos de Coletas das Variáveis Limnológicas.

As coletas dos dados limnológicos foram feitas durante os meses de janeiro, abril e julho de 2005. A figura 3.24 apresenta o hidrograma com os dados de cotas hidrométricas do rio Jacupiranguinha e os períodos de coletas em relação a essas cotas.

Figura 3.24 – Hidrograma com as cotas hidrométricas do rio Jacupiranguinha e os períodos em que foram coletados os dados limnológicos.

Nota-se através da figura 3.24 que durante as coletas de janeiro o rio estava com as suas cotas hidrométricas altas representando assim o período de potamofase. No mês de abril os dados foram extraídos no período de estiagem e em julho as alturas d'água do rio chegaram ao seu menor valor, representando assim a maior fase de seca de todo hidrograma.

3.7.3 Variáveis Físicas e Químicas das Águas.

As variáveis químicas e físicas da água analisadas neste trabalho foram retiradas de Benassi (2006), a tabela 3.7 apresenta as variáveis com suas respectivas unidades, método de determinação e referencia bibliográfica.

Tabelas 3.7 – Variáveis físicas e químicas analisadas e os métodos de determinação utilizados (BENASSI, 2006).

Variáveis	Unidade	Método	Referencia Bibliográfica
DQO (demanda química de oxigênio)	(mgO ₂ /l)	Titulométrico	APHA (1999)
Nitrato (N-NO ₃)	(mg/l)	Espectrofotométrico	APHA (1999)
Nitrogênio Total (N-Total)	(mg/l)	Titulométrico	APHA (1999)
Fosfato Inorgânico (P-PO ₄)	(mg/l)	Espectrofotométrico	APHA (1999)
Sólidos Suspensos Inorgânicos (SSI)	(mg/l)	Gravimétrico	APHA (1999)

Os dados de condutividade elétrica foram medidos através de uma sonda multi-parâmetros modelo YSI 556 MPS e sua unidade é $\mu\text{S}/\text{cm}$.

As coletas de condutividade foram realizadas em quatro períodos distintos, entre outubro de 2004 e julho de 2005, completando assim as quatro estações do ano e a cada visita experimental a campo, os dados eram medidos durante cinco dias.

3.7.4 Macrófitas Aquáticas

Para a determinação da biomassa da comunidade de macrófitas aquáticas, Benassi (2006), utilizou um amostrador, através de um quadro de 0,25 m², introduzidos nos pontos de coleta onde havia macrófitas aquáticas, em seguida, coletou-se em sacos plásticos todo material contido no seu interior. As plantas foram transportadas para o laboratório, para lavagem e remoção do material aderido. Posteriormente, em laboratório, as plantas foram secas a 70 °C, por aproximadamente 72 horas, até atingirem peso constante. .

Os resultados foram divididos em sete partes formadas por: Monitoramento, Curva-Chave, Incertezas Relativas aos Parâmetros da Curva-Chave, Ecologia Fluvial, Balanço Hídrico, Vazão Ecológica e Relações entre Variáveis Limnológicas e Hidrológicas.

4.1_ MONITORAMENTO

Os resultados serão divididos em dois grupos: estações linimétricas manuais **(3)**, **(4)** e **(5)** e estações automáticas **(1)** e **(2)**, junto com a estação climatológica.

4.1.1 Estações Linimétricas Manuais

Os resultados das estações linimétricas **(4)** e **(5)**, em função de estarem em funcionamento desde outubro de 2004, serão as primeiras a serem apresentadas (figura 4.1).

No eixo das ordenadas estão às cotas hidrométricas e nas abscissas os valores de tempo em dias, os pontos rosa representam a estação **(4)** e os azuis o **(5)**. O período de coleta foi de 20/10/04 a 20/07/2005. Durante alguns dias, houve falhas nas coletas fazendo com que existam alguns espaços vazios.

Figura 4.1 – Linigrama das estações (4) e (5) no período de 20/10/04 a 20/07/2005.

É importante salientar que os dados de cotas hidrométricas nestes linigramas não estão alinhados com as cotas topográficas e que os valores apresentados representam somente os dados obtidos pela leitura das réguas.

A partir de maio de 2006 a estação linimétrica (1) começou a funcionar e as estações (4) e (5) foram reativadas, o linigrama a seguir (figura 4.2) apresenta os dados das três estações coletados no período de maio de 2006 a janeiro de 2007. O intervalo de discretização dos linigramas é em dias.

Nota-se que a curva em azul, estação (5), possui uma sensibilidade maior que as outras duas curvas (estações (3) e (4)), isso porque a estação (5) está dentro de um córrego diretamente ligado ao rio, ou seja, qualquer alteração da altura do rio resulta imediatamente em mudanças nas cotas da régua da estação linimétrica da saída da área alagada (5).

Figura 4.2 – Linigrama das estações (3), (4) e (5) no período de 25/05/06 a 14/01/2007.

O gráfico da figura 4.3 apresenta os resultados de cota hidrométrica do rio Jacupiranguinha na estação (1) a partir de dados recuperados da estação (5).

Figura 4.3 – Linigrama recuperado da estação (1) no período de 10/12/04 a 20/07/2005.

A recuperação dos dados não monitorados pela estação (1) é de extrema importância para a continuação do trabalho, pois como se nota pelo gráfico da figura 4.3, ocorreram vários eventos que resultaram em cheias do rio aumentando assim a conectividade com as planícies de inundação, essas relações serão melhores estudadas nos próximos capítulos.

Na figura 4.4 está o hidrograma construído a partir das cotas hidrométricas do rio coletadas entre junho de 2006 e janeiro de 2007.

Figura 4.4 – Hidrograma da estação (1) no período de 25/06/06 a 14/01/2007.

4.1.2 - Estações Linimétricas Automáticas e Estação Climatológica.

4.1.2.1 - Estação Linimétrica Automática Entrada da Área Alagada (1).

Os dados de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) e cotas hidrométricas (m), coletados da estação (1), estão divididos em duas partes devido ao intervalo de tempo de armazenamento de uma em uma hora que faz com que os gráficos fiquem carregados de informação.

O primeiro gráfico (figura 4.5) foi plotado com os dados obtidos no período de 24/05/2006 a partir das 11:00 até 16/06/06 as 20:00. O segundo gráfico (figura 4.6) representa as coletas de 21/07/2006 das 19:00 até o dia 23/09/2006 as 01:00. Não foi possível coletar os

dados durante os intervalos dessas duas coletas por problemas ocorridos com as baterias dos equipamentos.

Figura 4.5 – Dados de temperatura (0C) e cotas hidrométricas (m), coletados da estação (1), no período de 24/05/2006 a partir das 11:00 até 16/06/06 as 20:00.

Nota-se que os eixos das ordenadas dos gráficos 4.5 e 4.6 não estão com os mesmos valores de cota hidrométrica e de temperatura, isso porque a visualização das curvas ficaria prejudicada se fossem igualados os valores máximos e mínimos dos dois eixos.

Figura 4.6 – Dados de temperatura (0C) e cotas hidrométricas (m), coletados da estação (1), no período de 21/07/2006 das 19:00 até o dia 23/09/2006 as 01:00.

4.1.2.2 - Estação Linimétrica Automática Saída da Área Alagada (2).

Como já foi discutido a estação (2), por problemas de vandalismo, foi desativada no dia 06/09/06. Entretanto, foram coletadas informações importantes que serão melhores discutidos nos próximos tópicos deste trabalho.

Na figura 4.7 estão os dados de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) e cotas hidrométricas (m), obtidos no período de 24/05/2006 as 11:00 até o dia 21/06/2006 as 05:00. No segundo gráfico (figura 3.19) estão as coletas de 27/07/2006 das 13:00 até o dia 06/09/2006 as 16:00.

Pelas mesmas razões ocorridas com a estação (1), não foi possível coletar os dados durante os intervalos dessas duas coletas (problemas ocorridos com as baterias dos equipamentos).

Figura 4.7 – Dados de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) e cotas hidrométricas (m), coletados da estação (2), no período de 24/05/2006 as 11:00 até o dia 21/06/2006 as 05:00.

Nota-se que as cotas hidrométricas medidas no linígrafo da entrada da área alagada são maiores que as cotas medidas na saída da planície de inundação, isso se deve ao fato, da largura do canal no ponto (1) ser menor do que no ponto (2) conseqüentemente a

profundidade será maior na estação (1), visto que as vazões são praticamente as mesmas nos dois pontos. Essa diferença entre as cotas será mais bem visualizada na figura 4.8.

Outro fator importante a ser observado é a variação diária que ocorre no nível d'água e na temperatura do rio Jacupiranguinha. Essas mudanças são frutos da emissão de efluentes de uma indústria produtora de fertilizantes. Esse assunto será discutido no item 4.1.3.

Figura 4.8 – Dados de temperatura (oC) e cotas hidrométricas (m), coletados da estação (1), no período de 24/05/2006 a partir das 11:00 até 06/06/06 as 16:00.

4.1.2.3 - Estação Climatológica.

A estação climatológica instalada na bacia do rio Jacupiranguinha mede pressão barométrica, temperatura e umidade do ar, ponto de orvalho, velocidade e direção de vento, precipitação e radiação solar, que são os itens essenciais para estimativa do balanço hídrico. Entretanto os resultados que serão apresentados na figura 4.9 são somente referentes à precipitação com as cotas das estações (1) e (2). Essa relação deve-se, principalmente, a necessidade de se apontar uma analogia entre: causa (precipitação) e efeito (nível hidrométrico) que ocorre no Rio Jacupiranguinha.

A figura 4.9 indica que existem outras fontes influenciando o nível do rio. Pois, acontecem grandes variações linimétricas da água, em ciclos curtos e bem definidos, mesmo sem nenhuma ocorrência de eventos significativos (precipitação).

Essa possível influencia será mais bem discutida no próximo item.

Figura 4.9 – Dados de cotas hidrométricas (m) das estações (1) e (2) e chuva da estação climatológica (mm), no período de 21/05/2006 a partir das 10:00 até 25/09/06 as 13:00.

4.1.3 – Influencia do Efluente da Indústria de Fertilizante (BUNGE)

Duzentos metros à montante da estação (1) existe um emissário de efluentes de uma indústria produtora de fertilizantes (figura 4.10) que possui grande influência da qualidade e quantidade de água no Rio Jacupiranguinha e conseqüentemente na área alagada estudada.

Figura 4.10 – Localização da Lagoa Receptora de Efluentes da Bunge em relação a estação (1).

Todos os dias são despejados no rio Jacupiranguinha, através de dois canais de aproximadamente um metro de diâmetro (figura 4.11), altas vazões provenientes da indústria de fertilizante. Essas descargas variam entre de 0,5 m³/s e 1,0 m³/s podendo chegar até 4,0 m³/s por canal.

Figura 4.11 – Canais de concreto que despejam resíduos da indústria de fertilizantes.

Com a finalidade de analisar a influência desse afluyente, foram analisadas as características físicas e químicas da água em três pontos chave do rio: a montante da lagoa da indústria de fertilizante (aproximadamente 20 metros acima); dentro da lagoa; e na entrada da área alagada (estação (1)). Os parâmetros estudados da água (temperatura, condutividade, oxigênio dissolvido e pH) foram medidos através de uma sonda multi-parâmetros modelo YSI 556 MPS, e estão descritos na tabela 4.1, junto com os fatores quantitativos.

Tabela 4.1 - Parâmetros quali-quantitativos de três pontos do rio Jacupiranguinha (Data: 25/06/06).

Local Parâmetros	Temperatura da água (°C)	Condutividade ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Oxigênio Dissolvido %	Dissolvido mg/l	pH	Vazão (m^3/s)	Profundidade Máxima (cm)
Montante	21,33	148	92,5	8,17	6,51	1,233	0,41
Bunge Saída	22,25	1038	72	6,26	6,07	1,503	0,46
Limnógrafo	21,73	572	87	7,6	6,33	2,751	0,8

Nota-se pela tabela 4.1 que os fatores analisados, quando medidos à montante do rio e comparados ao efluente da empresa, possuem pequenos valores de condutividade e temperatura e altos índices de oxigênio dissolvido e o pH bem maiores.

De acordo com Benassi (2006) a condutividade elétrica está diretamente relacionada com a quantidade de materiais dissolvidos presentes, sendo considerado um bom indicador da poluição das águas. Os valores de condutividade elétrica encontrados no efluente da empresa são bem superiores ao esperado para as águas naturais ($100\mu\text{S}.\text{cm}^{-1}$). Comprova-se assim que, embora com tratamento, existe alto índice de poluição sendo despejado diariamente no rio Jacupiranguinha pela empresa de fertilizantes BUNGE.

À jusante desses dois pontos (estação 1) pode-se se dizer que ocorre uma média das duas leituras devido ao balanço de massa, pois, a vazão é praticamente a mesma tanto a montante quanto no efluente da BUNGE. Isto explica a variação diária e cíclica da temperatura e das cotas hidrométricas do rio na estação (1) e (2) (figuras 4.5 a 4.9).

4.2_ CURVA-CHAVE

4.2.1 Aspectos Geométricos do Leito do Rio

Entre os aspectos geométricos do leito do rio destacam-se: traçado, seção transversal e perfil longitudinal. Segundo a classificação de Rosgen (1996), todos esses itens são essenciais para a determinação do tipo de rio que está sendo estudado.

4.2.1.1 Traçado

Pelas análises de fotografias aéreas e visitas a campo tem-se que o rio Jacupiranguinha, é sinuoso com alta proporção de entrincheiramento e curvas bem fechadas. A figura 4.12 expõe, em planta, a sinuosidade do rio.

Figura 4.12 - Foto área do rio Jacupiranguinha

4.2.1.2 Seção Transversal da Estação Linimétrica da Entrada da Área Alagada.

Foram realizadas, durante o ano de 2006, quatro levantamentos da seção transversal do rio Jacupiranguinha na entrada da área alagada entre os períodos de abril a setembro. Dentro dessas medições não foi constatada mudanças significativas do leito do rio, assim, será utilizada, em todo trabalho, o levantamento da seção transversal realizado em maio pois está na media dos erros das medições anteriores.

A figura 4.13 mostra a seção transversal do Rio Jacupiranguinha na entrada da área alagada, do dia 25/05/06. A altura de extravasamento da água do rio para a área alagada, foi medida em campo através de réguas e niveladores topográficos e possui cota de 2,474 m de altura.

Figura 4.13 - Seção Transversal do rio Jacupiranguinha na entrada da área alagada.

A linha d'água no instante em que foi feito o levantamento da seção transversal era de 0,8 metros e a vazão correspondente a essa altura era de $3,174 \text{ m}^3/\text{s}$. A largura total do canal é 28 m a área molhada $7,954 \text{ m}^2$, o perímetro molhado 14,146 m e o raio hidráulico 0,558 m.

Quando a lâmina d'água alcança a cota 2,474 m, a área molhada da seção transversal é de $38,644 \text{ m}^2$, o perímetro molhado é de 30,037 m e o raio hidráulico 1,287 m.

4.2.1.3 Perfil Longitudinal da Estação Linimétrica da Entrada da Área Alagada.

O perfil longitudinal diz respeito à declividade do rio, reflexo da topografia da região. Para ser determinado o declive na seção da estação linimétrica foi utilizado um aparelho de topografia denominado *Teodolito modelo MOM-BUDAPEST TE-D4*. Foi medido o desnível 50 metros acima e 50 metros abaixo da estação, e o resultado foi um declive de 0,19 m/100m.

Foi avaliada a declividade do fundo do rio e a declividade da linha d'água ao longo de toda planície de inundação, o resultado está representado na figura 4.14.

A coleta foi realizada no dia 21/07/06 as 15:00 h e a cota hidrométrica inicial era de 0,80 m a vazão era de $3,14 \text{ m}^3/\text{s}$.

Figura 4.14 - Declividade do leito do rio e da linha d'água.

O ponto 1 representa a estação linimétrica e foi considerado o local de referência para todos os pontos medidos ao longo do rio, por isso, possui cota do leito do rio de 0,00 m.

No eixo das ordenadas aparecem os valores de cotas, em metros, do fundo do rio e da linha d'água e na abscissa estão os valores de distância entre os pontos medidos em metros.

Em alguns locais, o fundo do canal possui um declive muito maior do que a cota hidrométrica da água; isso ocorre porque em algumas partes do rio a largura da calha diminui fazendo com que a profundidade da linha da água aumente.

4.2.2 Rugosidade do Leito do Canal

A rugosidade do leito é a resistência ao escoamento causado pelo contato entre a superfície do leito e margens com o fluxo d'água. A *fórmula de Manning* foi utilizada em 19 medições de vazão para definir a influência da altura do nível d'água na rugosidade do canal. O resultado está representado nas figuras 4.15 e 4.16. O primeiro gráfico relaciona cota em metros (eixo das ordenadas) e o coeficiente de rugosidade de Manning (eixo das abscissas).

Figura 4.15 - Relação cota (ordenadas) e coeficiente de manning (abscissa).

De acordo com Yen (1992), à medida que aumenta a lâmina d'água, diminui a influência da rugosidade do leito sobre o escoamento. Quando a água extrapola a calha do rio e começa a invadir a planície de inundação, este prognóstico muda. Esta tendência ocorre principalmente pela presença da vegetação numa determinada faixa de área. Na figura 4.15 nota-se que quanto maior é a altura da água, menor o coeficiente de rugosidade, confirmando, assim, a teoria de Yen.

O segundo gráfico (figura 4.16), expõe a relação entre a rugosidade (eixo principal das ordenadas) e vazão em m^3/s (eixo secundário das ordenadas) para as mesmas alturas de linha d'água em metros (eixo das abscissas). A progressão do fator de rugosidade é inversamente proporcional ao aumento da vazão; isso quer dizer que quanto maior rugosidade menor a velocidade de escoamento dentro do canal.

Figura 4.16 - Relação do coeficiente de rugosidade (eixo principal das ordenadas) e da vazão (eixo secundário das ordenadas) para a mesma cota do nível d'água (abscissa).

Rosgen (1992) encontrou, para cada tipo de rio, um valor de rugosidade (figura 4.17). Esses valores são referentes à seção plena do canal. O rio Jacupiranguinha é o tipo C5, segundo a classificação de Rosgen. De acordo com a figura 4.17 o coeficiente da rugosidade do canal do rio, a seção plena, é de aproximadamente 0,037. O valor estimado experimentalmente é 0,040, próximo do valor sugerido por Rosgen para esse tipo de rio.

Figura 4.17 - Relação coeficiente de rugosidade em relação à classificação do tipo do rio segundo Rosgen. (ROSGEN 1992).

4.2.2.1 Rugosidade do Canal e da Planície de Inundação.

Para determinar o coeficiente de rugosidade “n” na planície de inundação foram usadas as áreas delimitadas da várzea e dados de perímetro, área e raio hidráulico (tabela 4.2).

Tabela 4.2 – Valores de área, perímetro e raio hidráulico para o cálculo da rugosidade de Manning do canal do rio e da planície de inundação

Cotas (m)	ÁREA DE VÁRZEA				CANAL			
	Área(m ²)	Perímetro (m)	Raio Hidráulico(m)	$n_{várzea}$	Área (m ²)	Perímetro (m)	Raio Hidráulico(m)	n_{rio}
2,474	0,0	0,0	0,0	0,00	38,6	30,0	1,29	0,0427
2,707	15438,3	332,3	46,5	114,0	51,9	37,1	1,40	0,0371
2,901	70758,8	1230,3	57,5	352,9	73,6	48,7	1,51	0,0324
3,016	108068,1	1489,7	72,5	407,9	100,2	63,0	1,59	0,0296
3,240	128652,5	1552,6	82,8	309,8	136,5	82,5	1,65	0,0242

A figura 4.18 apresenta os dados da rugosidade de manning calculados a partir da equação sugerida por Yen (1992). O gráfico possui escalas logarítmicas devido aos altos valores apresentados. Uma hipótese para esses altos valores é a não uniformidade da declividade da planície de inundação, e micro-relevo, quando comparada com o rio.

Figura 4.18 – Coeficientes de rugosidade do canal do rio Jacupiranguinha e da planície de inundação.

4.2.3 Medições de Vazões.

De acordo com Sefione (2002), para traçar uma curva-chave, são necessárias medições de vazão feitas na maior amplitude de cotas que se possa alcançar e com a maior precisão possível, de forma a diminuir a faixa de cotas de extrapolação e ter-se maior confiança na calibração da curva. Foram medidas 19 (dezenove) vezes a vazão do rio Jacupiranguinha durante seis períodos diferentes com alta variação das cotas hidrométricas.

A determinação da vazão foi feita através do **método da meia seção**. A tabela 4.3 mostra as datas das medições junto com a vazão e sua respectiva cota do rio. O período de coletas foi de abril de 2005 até setembro de 2006. Infelizmente durante a coleta do mês de janeiro, onde se esperava medir a vazão do rio extrapolada, não foi possível, devido às baixas cotas em que o mesmo se encontrava nos dias de visitas.

Tabela 4.3 – Dados das medições de vazão com suas respectivas cotas e datas.

Data	Nível do Rio (m)	Vazão (m³/s)
5/4/2005	1,310	9,529
6/4/2005	1,220	8,109
7/4/2005	1,230	7,948
8/4/2005	1,210	7,531
9/4/2005	1,180	7,376
16/7/2005	0,890	3,485
17/7/2005	0,900	3,431
18/7/2005	0,880	3,452
19/7/2005	0,880	3,439
20/7/2005	0,880	3,438
11/7/2005	0,910	3,917
12/7/2005	0,910	3,900
13/7/2005	0,900	3,812
26/9/2005	1,970	29,768
27/9/2005	1,560	16,646
28/9/2005	1,400	13,479
21/7/2006	0,680	2,212
21/5/2006	0,800	3,174
25/9/2006	0,800	2,751

4.2.4 Curva-Chave

Foram utilizados três métodos de determinação da curva-chave neste trabalho: Método de Stevens, Velocidade Média e Curva de Tendência. Os resultados destes estudos serão apresentados a seguir começando pelo método da curva de tendência.

4.2.4.1 Método da Curva de Tendência.

Dentre os métodos utilizados neste trabalho, o método da extrapolação da curva-chave através da curva de tendência é o mais simples (figura 4.19). O método consiste em plotar as vazões medidas em campo nas ordenadas e as cotas relativas a essas descargas nas abscissas e adicionar a linha de tendência e a equação na forma de potência, desta relação.

Figura 4.19 - Curva-chave pelo método da curva de tendência.

O gráfico da figura 4.19 apresenta a relação entre cotas hidrométricas e a vazão da seção transversal da estação linimétrica da entrada da área de várzea. A equação desta relação e o R^2 da curva também estão expostos na figura abaixo.

4.2.4.2 Método de Stevens.

Este método, proposto por Stevens está baseado na fórmula de Chezy para o escoamento uniforme em canais como mostra a metodologia baseada em Jaccon e Cudo (1989).

Depois de obter os valores de vazão (m^3/s), área molhada (m^2), perímetro molhado (m), raio hidráulico (m) e fator geométrico ($S\sqrt{R}$), o próximo passo é desenhar os gráficos de fator geométrico na ordenada ($S\sqrt{R}$) e nas abscissas valores de vazão e cota (Figura 4.20).

Figura 4.20 - Extrapolação pelo método de Stevens.

A tabela 4.4 apresenta os dados de cota (m), vazão (m^3/s), área molhada (m^2), perímetro molhado (m), raio hidráulico (m) e fator geométrico ($A\sqrt{R}$) que são necessários para se construir a extrapolação superior da curva-chave.

Em destaque de amarelo estão os valores de vazão, encontrados através da metodologia de Stevens.

Tabela 4.4 - Dados para extrapolação da curva-chave pelo método de Stevens.

Cota (m)	Vazão (m^3/s)	Área Molhada (m^2)	Perímetro Molhado (m)	Raio Hidráulico (m)	$A\sqrt{R}$
0,680	2,212	6,300	13,471	0,468	4,308
0,800	3,174	7,954	14,246	0,558	5,943
0,880	3,452	9,050	14,422	0,628	7,169
0,880	3,439	9,050	14,422	0,628	7,169
0,880	3,438	9,050	14,422	0,628	7,169
0,890	3,485	9,175	14,450	0,635	7,311
0,900	3,431	9,300	14,527	0,640	7,441
0,900	3,812	9,300	14,527	0,640	7,441
0,910	3,917	9,450	14,538	0,650	7,619
0,910	3,900	9,450	14,538	0,650	7,619
1,180	7,376	13,300	15,286	0,870	12,406
1,210	7,531	13,750	15,486	0,888	12,957
1,220	8,109	13,900	15,598	0,891	13,122
1,230	7,948	14,043	15,699	0,894	13,281
1,310	9,529	15,225	15,766	0,966	14,962
1,550	13,479	18,875	16,460	1,147	20,212
1,700	16,646	21,225	16,924	1,254	23,770
2,150	29,768	30,425	23,147	1,314	34,882
2,200	32,050	31,525	23,370	1,349	36,614
2,400	37,800	36,525	28,322	1,290	41,478
2,474	40,105	38,644	30,037	1,287	43,832

4.2.4.3 Método da Velocidade Média.

A extrapolação da curva chave pelo método da velocidade média é feita considerando separadamente duas componentes de descargas: a área molhada e a velocidade média do escoamento. Após a determinação dos dados de cota (m), vazão (m^3/s), área molhada (m^2), perímetro molhado (m), raio hidráulico (m) e velocidade média (m/s), desenha-se o gráfico de cotas na ordenada e nas abscissas valores de velocidade média e área molhada (figura 4.21).

Figura 4.21 - Extrapolação pelo método da Velocidade Média

A tabela 4.5 apresenta os dados de cota (m), vazão (m^3/s), área molhada (m^2), perímetro molhado (m), raio hidráulico (m) e velocidade média (m/s) que são necessários para se construir à extrapolação superior da curva-chave.

Tabela 4.5 Dados para extrapolação da curva-chave pelo método da Velocidade Média.

Cota (m)	Vazão (m^3/s)	Área Molhada (m^2)	Perímetro Molhado (m)	Raio Hidráulico (m)	Velocidade Média (m/s)
0,680	2,212	6,300	13,471	0,468	0,351
0,800	3,174	7,954	14,246	0,558	0,399
0,880	3,452	9,050	14,422	0,628	0,381
0,880	3,439	9,050	14,422	0,628	0,380
0,880	3,438	9,050	14,422	0,628	0,380
0,890	3,485	9,175	14,450	0,635	0,380
0,900	3,431	9,300	14,527	0,640	0,369
0,900	3,812	9,300	14,527	0,640	0,410
0,910	3,917	9,450	14,538	0,650	0,414
0,910	3,900	9,450	14,538	0,650	0,413
1,180	7,376	13,300	15,286	0,870	0,555
1,210	7,531	13,750	15,486	0,888	0,548
1,220	8,109	13,900	15,598	0,891	0,583
1,230	7,948	14,043	15,699	0,894	0,566
1,310	9,529	15,225	15,766	0,966	0,626
1,550	13,479	18,875	16,460	1,147	0,714
1,700	16,646	21,225	16,924	1,254	0,784
2,150	29,768	30,425	23,147	1,314	0,978
2,200	31,777	31,525	23,370	1,349	1,008
2,400	39,922	36,525	28,322	1,290	1,093
2,474	43,706	38,644	30,037	1,287	1,131

Em destaque de verde, estão os valores de velocidade média e vazão encontrados através da metodologia da velocidade média.

4.2.4.4 Comparação entre os Métodos de Extrapolação Superior da Curva-Chave.

A tabela 4.6 e a figura 4.22 mostram as diferenças dos resultados obtidos pelos três métodos de extrapolação superior da curva-chave.

Tabela 4.6 Dados comparativos entre os três métodos de extrapolação superior da curva-chave, em m³/s

Cota (m)	Tendencia	Stevens	V, Média
0,680	2,212	2,212	2,212
0,800	3,174	3,174	3,174
0,880	3,452	3,452	3,452
0,880	3,439	3,439	3,439
0,880	3,438	3,438	3,438
0,890	3,485	3,485	3,485
0,900	3,431	3,431	3,431
0,900	3,812	3,812	3,812
0,910	3,917	3,917	3,917
0,910	3,900	3,900	3,900
1,180	7,376	7,376	7,376
1,210	7,531	7,531	7,531
1,220	8,109	8,109	8,109
1,230	7,948	7,948	7,948
1,310	9,529	9,529	9,529
1,550	13,479	13,479	13,479
1,700	16,646	16,646	16,646
2,150	29,768	29,768	29,768
2,200	30,813	32,050	31,777
2,400	37,769	37,800	39,922
2,474	40,549	40,105	43,722

Observa-se que a vazão extrapolada utilizando o método da velocidade média é superior em 1 a 2 % à vazão estimada pelo método de Stevens. A explicação desta pequena diferença está na elevação da declividade hidráulica em águas médias e altas, efeito que é levado em consideração no traçado da curva da velocidade média, mas ignorado na extrapolação retilínea, praticada nos dois outros métodos.

Figura 4.22 -Curvas-Chave pelos três métodos de extrapolação superior

4.2.5 Curva-chave do canal e área alagada

A vazão do canal foi determinada através da curva-chave determinada pelo método das velocidades médias:

$$Q = 4,8779 * h^{2,3753} \text{ sendo } h \text{ em metros, e a vazão em (m}^3\text{/s).}$$

Entretanto para poder relacionar vazão com altura da água, área inundada e as variáveis limnológicas quando a água extrapola a calha do rio Jacupiranguinha e entra na área alagada, foi utilizada uma nova curva-chave (figura 4.23).

Essa curva foi determinada através de uma medição de descarga em janeiro de 2005 cujo valor foi de 56,48 m³/s para uma cota hidrométrica de 3,85 m e do último valor de vazão encontrado através da curva-chave quando a água não extrapola o canal do rio (cota hidrométrica 2,474 m e vazão 43,72 m³/s).

A partir dos dados da rugosidade de Manning da planície de inundação, foram calculados, para algumas alturas de cotas hidrométricas, os valores de vazão dentro da área alagada.

Figura 4.23 - Curva-chave quando ocorre extrapolação da calha do rio Jacupiranguinha.

A partir dos dados da rugosidade de Manning da planície de inundação foram calculados, para algumas alturas de cotas hidrométricas, valores de vazão dentro da área alagada. A tabela 4.7 apresenta esses dados.

Tabela 4.7 Vazões da área alagada a partir dos dados de rugosidade de manning.

VÁRZEA							
Cotas (m)	Área	Perímetro	Raio Hidráulico	Manning	Vazão (canal)	Vazão (Área Alagada)	Acréscimo (%)
2,47	0,00	0,00	0,0	0,00	43,72	43,72	0,00
2,71	15438,3	332,2	46,4	114,06	46,06	47,16	2,40
2,90	70758,8	1230,3	57,5	352,91	47,94	49,62	3,50
3,02	108068,1	1489,6	72,5	407,91	49,03	50,06	2,10
3,24	128652,5	1552,5	82,8	309,85	51,11	52,54	2,80

Nota-se que os valores da vazão da área alagada são bem pequenos; isso se deve ao fato da planície de inundação funcionar como uma bacia de retenção, amortecendo grande parte do fluxo proveniente do rio, tornando a vazão dentro da várzea praticamente zero.

4.3_ INCERTEZAS DA CURVA-CHAVE

Os resultados apresentados nesta fase do trabalho incluem somente as incertezas da curva-chave do canal principal do rio Jacupiranguinha na entrada da área alagada.

4.3.1 Equação de manning com a cota hidrométrica como variável dependente.

O primeiro passo a seguir, é determinar qual a variação das cotas hidrométricas em relação à vazão medida em campo, depois analisar quais efeitos, as incertezas desses valores de altura d'água, podem influenciar no resultado final da extrapolação da curva-chave, pelos três diferentes métodos propostos.

4.3.1.1 Variação das cotas hidrométricas em relação à vazão medida em campo.

Como já foi apresentado, foram feitas 19 medições de vazões durante o período de 05/04/2005 a 25/09/2006.

Através da fórmula de rugosidade de Manning n foram determinados o coeficiente de rugosidade do canal para todos os valores de descargas e altura d'água obtidas em campo. Como o comportamento do coeficiente n não foi uniforme ao longo das variações da profundidade do canal, são utilizadas quatro etapas de cálculos para determinar a relação de dependência da cota hidrométrica com a equação de manning.

O primeiro intervalo compreende as cotas de 0,68 a 0,91 m, o segundo de 1,18 a 1,31 m o terceiro de 1,55 a 1,70 e o quarto de 2,15 a 2,474.

Os erros do método da meia seção, utilizado para determinação das vazões, não devem ultrapassar os 5%, no caso de uma medição bem executada. Para a determinação da declividade do canal, 50 m acima e 50 m abaixo da seção estudada do rio, foi utilizado um teodolito (modelo MOM-BUDAPESTE TE-D43), que possui uma precisão de 3,5%

considerando ainda os problemas, que podem ocorrer durante a coleta, o erro total estimado para a declividade foi de 5,5%.

Na figura 4.24 estão às quatro etapas do cálculo das incertezas, no eixo das ordenadas estão à vazão e sua variação fixa de 5% e no eixo das abscissas estão às cotas hidrométricas com os respectivos erros variando de acordo com a altura dá água.

Figura 4.24 - Cotas hidrométricas como variável dependente da equação de manning.

Para o primeiro trecho a alteração do coeficiente de manning foi de 18%. Portanto a variação da cota hidrométrica é de $\Delta h = 0,135$ m; conclui-se então, que o erro desse intervalo de cotas foi de 16,8%.

No intervalo de 1,18 a 1,31 m a variação da rugosidade do canal foi de 7,68% resultando num $\Delta h = 0,084$ m o total do erro representa 7,10% dos valores das cotas.

A terceira faixa de cálculo de 1,55 a 1,70 m apresentou a menor alteração no coeficiente de manning entre todas as outras estudadas 3,44% gerando conseqüentemente a menor porcentagem de erro 4,33% ($\Delta h = 0,0671$ m).

Por último a cota de 2,15 m teve uma variação de manning de 7,10 % e erro de 5,10 % com $\Delta h = 0,110$ m.

Os valores da diferença do erro da vazão aumentam de acordo com o crescimento das cotas hidrométricas e, conseqüentemente, da vazão.

A figura 4.25 apresenta o intervalo de confiabilidade das cotas hidrométricas em relação às vazões medidas em campo. A curva vermelha representa os valores de cota-vazão sem variação, a curva de azul somente a variação negativa e a curva rosa a variação positiva.

Nota-se que pelo fato da variação dos coeficientes de manning e conseqüentemente dos erros serem altos em profundidades baixas, o intervalo de confiança da curva é maior no início, depois diminui até chegar ao seu menor valor (cotas 1,55 a 1,70 m) no final novamente o espaço de confiança aumenta porem em menor quantidade do que no início.

Figura 4.25 - Intervalo de confiabilidade das cotas hidrométricas.

4.3.1.2 Incertezas dos métodos de extrapolação superior da curva-chave.

Os métodos utilizados neste trabalho para extrapolação superior da curva-chave são os métodos de Stevens, Velocidade Média, e a equação da curva de tendência da relação vazão cota através da forma de potência.

As curvas de incerteza para cada método proposto são traçadas da seguinte maneira: primeiro utilizando a variação negativa das cotas hidrométricas (curva azul do gráfico 4.25) e depois a variação positiva (curva rosa figura 4.25).

Método de Stevens

Não existem variações dos valores de vazão através do método de Stevens, pois seu princípio é para perfil estável e $S\sqrt{R}$ (fator geométrico) não deve variar entre cheias e estiagens; ou seja, mesmo ocorrendo variação das cotas em relação à vazão, a proporção das curvas de fator geométrico versus vazão e fator geométrico versus cotas são as mesmas.

Velocidade Média

No caso do método da velocidade média, a extrapolação da curva-chave é feita considerando a área molhada e a velocidade média do escoamento; por isso ao aumentar as cotas hidrométricas às velocidades diminuem, já que a área aumenta e a vazão permanece a mesma; o inverso ocorreria se diminuir as cotas hidrométricas.

Na figura 4.26 as curvas de incertezas do método da velocidade média foram plotadas, inserindo no eixo das abscissas valores fixos da cotas linimétricas medidas em campo e nas ordenadas, as variações das vazões.

Figura 4.26 - Variações das curvas-chave do método da Velocidade Média.

A curva rosa (cotas com variação negativa) comparada com a azul (cotas sem variação) possui uma maior inflexão, fazendo com que as vazões de extrapolação sejam maiores. Entretanto a curva verde (cotas com variação positiva) também comparada com a curva azul tem curvatura menor o que resulta em vazões de extrapolação inferiores.

Curva de Tendência.

O procedimento pra determinar a alteração da vazão de extrapolação pelo método da curva de tendência é simplesmente utilizar para as vazões, medidas em campo, as possíveis variações de cotas determinadas pela figura 4.25. Depois é só adicionar a linha de tendência, na forma de potencia para os três casos possíveis (cotas com variações negativas, positiva e sem variação) como indicado na figura 4.27.

Figura 4.27 - Variações das curvas-chave do método da Curva de Tendência.

Em comparação ao método da velocidade média, as curvas-chave do método da tendência invertem de posição. A curva rosa (cotas com variação negativa) comparada com a azul (cotas sem variação) possui menor inflexão, fazendo com que as vazões de extrapolação

sejam menores, já a curva verde (cotas com variação positiva) tem curvatura maior o que resulta em vazões de extrapolação maiores.

As curvas-chave foram extrapoladas para a cota máxima de 2,474 m, na figura 4.28 estão os resultados finais das vazões, para essa cota, pelos três métodos diferentes e sua variação máxima e mínima.

Pelo método da curva da tendência, a variação da vazão é de 42,802 m³/s para a máxima e de 34,762 m³/s para a mínima. Na velocidade média a máxima vazão atingida foi de 48,228 m³/s e a mínima de 37,407 m³/s. Em ambos os casos, a maior alteração ocorreu entre os valores mínimos.

Figura 4.28 Variações das vazões máximas para a cota máxima de 2,474m.

4.3.2 Incertezas das vazões da planície de inundação.

A tabela 4.8 apresenta os valores das incertezas das vazões da planície de inundação determinadas a partir dos seus valores de rugosidade de manning.

Os valores das variações da vazão são muito pequenos, sendo assim, proporcional aos valores da vazão da área alagada.

Tabela 4.8 Incertezas das vazões da planície de inundação.

VÁRZEA						
Cotas (m)	Área	Perímetro	Raio Hidráulico	Manning	Vazão (Área Alagada)	ΩQ
2,47	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0000
2,71	15438,30	332,26	46,46	114,05943	1,11	0,0139
2,90	70758,87	1230,34	57,51	352,9092	1,68	0,0457
3,02	108068,09	1489,67	72,54	407,908	1,03	0,0975
3,24	128652,49	1552,57	82,86	309,85	1,43	0,1020

4.4_ ECOLOGIA FLUVIAL

4.4.1 Relação entre Áreas Alagadas e Cotas Hidrométricas.

Como já apresentado, a área da planície de inundação foi delimitada de acordo com suas cotas topográficas. O ponto de referência para o levantamento topográfico da planície foi o fundo do canal do rio Jacupiranguinha na entrada da área alagada (estação 1). Essa escolha possibilita a relação entre os dados linimétricos coletados na estação 1 e as quatro áreas da várzea delimitadas por suas respectivas curvas de níveis.

Durante os períodos de coletas da estação 1 (17/12/2004 a 20/07/2005 e 25/05/2006 a 14/01/07) ocorreram alguns eventos em que a água extrapolou o canal do rio Jacupiranguinha e inundou algumas partes da área de várzea. As figuras 4.29 e 4.30 são hidrogramas que indicam os eventos em que ocorreram esses extravasamentos.

Durante os meses de dezembro/2004 a março/2005 (figura 4.29) ocorreram seis eventos significativos onde é possível relacionar a dimensão das áreas alagadas influenciadas pelo transbordamento da água do rio Jacupiranguinha. São analisados, dessa primeira fase de coleta, os eventos ocorridos nos dias 03/01/2005 a 09/01/2005 e nos dias 17/01/2005 a 29/01/2005.

Figura 4.29 – Hidrograma do rio Jacupiranguinha entre os dias 17/12/2004 e 20/07/2005.

Figura 4.30 – Hidrograma do rio Jacupiranguinha entre os dias 25/05/2006 e 14/01/2007.

O primeiro evento está representado pela figura 4.31, a máxima cota linimétrica alcançada pelo rio foi de 2,85 m conseqüentemente foram alagadas somente as áreas 1 e 2.

O hidrograma foi dividido em três partes, cada uma representando uma fase de inundação. Na fase 1 a cota do rio aumenta, mas não extrapola a calha do rio, na fase 2 a altura da linha da água chega ao ponto máximo (2,86 m) e a área inundada também (área 1 e

2), na fase 3 o nível do rio volta ao normal, mas uma parte da área continua inundada (região das lagoas). No eixo principal das ordenadas estão a área alagada e no eixo secundário as cotas hidrométricas do rio Jacupiranguinha coletadas na estação 1.

Figura 4.31 – Relação entre área alagada e cota hidrométrica do rio Jacupiranguinha. Evento ocorrido entre os dias 03/01/2005 e 09/01/2005.

O segundo evento (figura 4.32) possui dois picos de cheia do rio Jacupiranguinha, em ambos, a máxima cota linimétrica alcançada pelo rio foi de 3,65 m; com isso, foram alagadas todas as áreas da planície de inundação. O hidrograma também foi dividido em três partes que representam as fases de inundação. Durante a fase dois, após o primeiro pico de cheia, parte da água voltou ao canal do rio, outra parte ficou retida na planície de inundação, o que representaria a fase 3. Entretanto, no intervalo entre os dois picos, a cota linimétrica do rio ficou acima do limite de extravasamento (2,474 m), sendo considerado assim todo esse período como sendo a fase 2 da inundação.

Figura 4.32 – Relação entre área alagada e cota hidrométrica do rio Jacupiranguinha. Evento ocorrido entre os dias 17/01/2005 e 29/01/2005.

O terceiro evento (figura 4.33) é apresentado na Figura 4.30, e ocorreu no mês de janeiro de 2007, é o único evento significativo ocorrido no segundo período de coletas. Possui um pico alto de cheia (o rio ultrapassou os 4m de altura) que inundou toda a planície. O hidrograma também foi dividido em três partes que representam as fases de inundação.

Figura 4.33 – Relação entre área alagada e cota hidrométrica do rio Jacupiranguinha. Evento ocorrido entre os dias 05/01/2007 e 14/01/2007

4.4.2 Relação entre um Hidrograma do rio Jacupiranguinha e a Área Alagada.

A figura 4.34 tem como objetivo ilustrar o caminho percorrido pela água dentro da planície de inundação, após a extrapolção da calha do rio. Para isso foi utilizado um hidrograma de um evento ocorrido no final de maio de 2005 e também um conjunto de fotos que representará cada área inundada pelo rio.

O hidrograma apresenta cinco cotas diferentes: a primeira é de 2,474 m, a segunda de 2,707m, a terceira de 2,901m, a quarta de 3,016m e, depois, o hidrograma volta para uma cota hidrométrica abaixo do limite de extravasamento.

A seta em azul, mostra por onde a água do rio Jacupiranguinha entra na planície de inundação.

Figura 4.34 – Conjunto de cinco fotos que representam as relações entre as cotas hidrométricas do rio Jacupiranguinha e as áreas da planície de inundação.

Na primeira foto a cota hidrométrica do rio está ultrapassando os 2,474m, neste instante a água começa a entrar na primeira parte da planície de inundação que é representada principalmente pela lagoa 1 e pela estação (3).

Quando o hidrograma passa à cota 2,707 m, a água do rio começa a entrar na segunda e maior área da várzea (foto 2) representada por duas grandes lagoas e pela estação (4).

A foto 3 mostra que quando a cota hidrométrica do rio alcança a cota de 2,901m começa a entrar água na planície de inundação também pelo canal da saída da área alagada (estação 5) .

Quando o hidrograma ultrapassa a cota de 3,016 m toda a área alagada começa a ser tomada pela água do rio Jacupiranguinha; nesses instantes, é alta a conexão entre rio e planície de inundação.

Na última situação, a cota linimétrica do rio não ultrapassa mais o limite de extravasamento do canal; entretanto parte da água ainda fica retida nas áreas de várzea, principalmente nas lagoas espalhadas por toda planície de inundação.

4.4.3 Relação entre Biomassa das Macrofitas e Cota Hidrométrica

O ponto selecionado para determinar a relação entre a biomassa e as cotas hidrométricas foi à lagoa 2, onde está instalada a estação (4). Além de utilizar os valores de altura d'água da lagoa, também foram usadas as cotas linimétricas do rio Jacupiranguinha, com o intuito de mostrar a importância dos picos de cheias do rio com os índices de biomassa da planície de inundação.

As curvas do gráfico da figura 4.35 apresentam os resultados obtidos para as duas alternativas: primeira utilizando as cotas da lagoa (curva rosa) e segunda as cotas do rio (azul).

Figura 4.35 – Relação entre índice de biomassa de macrófitas aquáticas e cotas do rio e da lagoa 2.

Nas duas situações apresentadas às duas curvas mantêm as mesmas tendências de diminuir a biomassa das macrofitas quando aumentam as cotas hidrométricas.

As coletas foram realizadas em quatro períodos hidrológicos (primavera, verão, outono e inverno) durante cinco dias consecutivos. A figura 4.36 apresenta os resultados de índice de biomassa em relação às estações do ano.

Figura 4.36 – Relação entre biomassa de macrófitas aquáticas e cota hidrométrica do rio Jacupiranguinha. Evento ocorrido entre os dias 17/01/2005 e 29/01/2005

Neste estudo foi possível encontrar variação sazonal da biomassa total das macrófitas aquáticas presentes nas lagoas do sistema de áreas alagáveis com maiores valores obtidos em abril/05 e julho/05. Menores valores foram registrados em janeiro/05, quando ocorreu o transbordamento do rio Jacupiranguinha. De acordo com Benassi (2006), esse fato, associado ao aumento dos níveis hidrométricos durante o período de grandes precipitações, provavelmente, tenha influenciado tal variação. Ainda de acordo com Benassi (2006), diversos autores, trabalhando em diferentes áreas de planícies de inundação, em regiões tropicais, salientam que o regime de pulso é um dos fatores determinantes na variação sazonal da biomassa das macrófitas aquáticas (BINI, 1996; CAMARGO e ESTEVES, 1996; JUNK et al., 1989 e NEIFF, 2001).

4.5_ BALANÇO HÍDRICO

4.5.1 Calculo do Albedo

Os valores dos albedos foram adotados de acordo com o tipo e cobertura do solo com o auxílio de tabelas encontradas em Tucci (1993), Righetto (1998) e Aguiar e Page (1999) (Tabelas 4.9 e 4.10).

Tabela 4.9 – Referenciais de albedo, de acordo com a característica do terreno, bacia do rio Jacupiranguinha.

Terreno	Albedo (%)
Zonas Residencias	20
Terrenos Baldios	15
Floresta	27
Grama	24
Água	5
Plantação de Banana	20
Asfalto	7

As porcentagens de cada tipo de terreno descritas na tabela 4.10 foram retiradas através de estudos das imagens da região.

Tabela 4.10 – Cálculo dos albedos da bacia do rio Jacupiranguinha.

Divisão da Bacia	% Total da Área	Albedo (%)	% Parcial
Zonas Residencias	6	20	1,2
Terrenos Baldios	8	15	1,2
Floresta	20	27	5,4
Gramma	25	24	6
Água	5	5	0,25
Plantação de Banana	35	20	7
Asfalto	2	7	0,14
Albedo Final (%)			21,19

4.5.2 Componentes do Balanço Hídrico

Os quatros componentes do balanço hídrico (Precipitação, ETP - Evapotranspiração Potencial, Escoamento e Armazenamento) estão representados pela figura 4.37. No gráfico as variáveis iniciam-se no zero, pois conta somente o período em que existem dados coletados. Essa situação não é real, já que os dados de armazenamento não poderiam começar do zero. Essa hipótese satisfaz o objetivo de analisar a ocorrência ou não de déficit de armazenamento na região, para posteriormente afirmar se o período de estudo representava uma fase de cheia ou de estiagem.

O resultado do calculo do balanço hídrico da bacia do rio Jacupiranguinha evidencia, que durante o período de estudo a região estava na fase de estiagem já que o armazenamento chegou a quase 400 mm de déficit, entretanto no final de dezembro e inicio de janeiro as chuvas começaram a aumentar e o déficit do armazenamento, conseqüentemente, a diminuir.

Figuras 4.37 –Componentes do balanço hídrico da bacia do rio Jacupiranguinha no período de junho de 2006 a janeiro de 2007.

4.6_ VAZÃO ECOLÓGICA

Os dados históricos, de cotas hidrométricas (m) e vazões (m^3/s), fornecidas pelo DAEE através do site do SIGRH (Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos de São Paulo) foram coletados de uma estação linimétrica situada a montante da estação 1 (linígrafo automático da entrada da área alagada), local escolhido para a análise da vazão ecológica do rio Jacupiranguinha. A figura 4.38, retirada do programa GOOGLE EARTH, referencia a estação de coletas e a estação linimétrica 1.

Os dados obtidos através do SIGRH possuem séries históricas limitadas ao ano de 1997, sendo assim, não é possível construir uma relação exata entre essas duas estações.

Entretanto, é necessária a avaliação das séries históricas por meio de suas curvas de permanência e hidrogramas. Esses estudos auxiliam na busca de se determinar a melhor analogia entre os dados antigos e os novos.

Figura 4.38 - Localização da estação DAEE e da estação (1) a linha azul representa o curso do rio Jacupiranguinha.

No trajeto do rio Jacupiranguinha, da montante (estação DAEE) em direção a jusante (estação 1), está a cidade de Cajati e duas lagoas de tratamento de esgoto, uma referente à cidade e a outra da empresa Bunge, que despeja altas vazões diariamente no leito do rio.

4.6.1 Estação DAEE

Os dados coletados pela estação linimétrica do DAEE compreendem o período de 1980 a 1997, entretanto a ultima seção transversal disponibilizada pelo site do SIGRH é de 1989.

4.6.1.1 Seção Transversal

A figura 4.39, apresenta a seção transversal do rio Jacupiranguinha na estação DAEE, a linha da água tem por volta de 2,86 m e a calha do rio tem pouco mais de 20 metros de largura. Nesse ponto não ocorre transbordamento da água, pois a altura do barranco é mais alta da variação potencial da altura.

Figura 4.39 - Seção transversal da estação DAEE (fonte: site do SIGRH).

4.6.1.2 Hidrogramas

O hidrograma que representa a série histórica dos dados de cotas hidrométricas (m) e vazão (m^3/s) está representado na figura 4.40. Este gráfico é muito importante, pois a partir dessas informações são geradas as curvas de permanências desta seção. Estipulam-se então algumas cotas relativas aos picos destes gráficos para compará-las com os hidrogramas

obtidos pelos dados da estação (1). Com essas analogias defini-se uma cota da série histórica que poderá ser usada como a altura limite do rio no qual ocorre o transbordamento para a planície de inundação. É importante salientar que esses dados retirados das séries históricas serão somente para aprimorar a discussão sobre os valores da vazão ecológica e a sua importância, pois as comparações entre as duas estações não são possíveis pelos motivos já mencionados.

Figura 4.40 – Hidrograma da estação DAEE no período de 1980 a 1997 (fonte: site do SIGRH).

4.6.1.3 Curvas de Permanências

A curva de permanência é formada pela probabilidade, em duração, no eixo das abscissas e pela cota hidrométrica e/ou vazão, ordenadas pela magnitude, no eixo das ordenadas. Sua função é determinar a permanência da duração, em termos de probabilidade histórica, da ocorrência de eventos como secas e cheias. É a principal ferramenta utilizada neste trabalho para calcular a vazão ecológica do rio Jacupiranguinha. A curva de permanência da estação do DAEE no período de 1980 a 1997 está representada pela figura 4.41, e possui dois eixos nas ordenadas (cotas hidrométricas e vazões).

Figura 4.41 – Curva de permanência da estação DAEE no período de 1980 a 1997 (fonte: site do SIGRH).

4.6.2 Estação (1) – Limnógrafo Entrada

Foram coletados os dados do nível do rio durante dois períodos: o primeiro entre 17/12/2005 e 12/05/2005, e o segundo entre 25/05/2006 a 14/01/2007.

4.6.2.1 Seção Transversal

A figura 4.42 apresenta a seção transversal do rio Jacupiranguinha na estação (1) Limnógrafo da entrada da área alagada, a linha da água tem por volta de 0,80 m e a calha do rio tem pouco menos de 30 metros de largura. Nesse ponto ocorre transbordamento da água se a cota hidrométrica ultrapassar 2,474 m e a vazão correspondente a essa altura é de aproximadamente 42 m³/s.

Figura 4.42 - Seção Transversal do rio Jacupiranguinha na entrada da área alagada.

4.6.2.2 Hidrogramas

Os hidrogramas das figuras 4.43 e 4.44 representam as cotas hidrométricas (m) e as vazões (m^3/s) nos dois períodos de coletas da estação linimétrica (1). Na figura 4.43 ocorrem sete eventos em que a altura da água extrapola a calha do rio e invade a planície de inundação; a máxima cota alcançada é de 3,65 m e a vazão é de $54 \text{ m}^3/\text{s}$. Na curva de permanência, eventos com valores maiores ou iguais a esses valores, representam 10 % da duração.

Figura 4.43 – Hidrograma das cotas hidrométricas e das vazões do rio Jacupiranguinha no período de 17/12/04 a 12/05/05

O hidrograma da segunda fase de coletas (figura 4.44), que apesar de registrar um evento que alcançou a maior cota hidrométrica dentre todos os analisados (4,35 m e vazão de quase 60 m³/s), possui somente dois pulsos de enchentes que, pela sua curva de permanência, não ultrapassam 3% da duração total.

A curva de permanência, dos dados coletados da estação (1), está representada pelo gráfico da figura 4.45, que será apresentado no próximo item.

Figura 4.44 – Hidrograma das cotas hidrométricas e das vazões do rio Jacupiranguinha nos período de 25/05/06 a 14/01/07

4.6.2.3 Curva de Permanência

A curva de permanência do período atual de coletas está representada em apenas um gráfico (figura 4.45). A linha verde é o limite de extravasamento da calha do rio (2,474 m) e a linha azul e vermelha são, respectivamente, as curvas de permanência relativas a cotas hidrométricas e a vazão. De acordo com o gráfico, aproximadamente seis por cento (6%) dos eventos ocorridos nesse período transbordam o canal do rio Jacupiranguinha para a planície de inundação. A vazão de referência Q_{90} é de 2,59 m³/s e equivale a uma cota hidrométrica de 80 cm.

Figura 4.45 – Curva de Permanência das cotas hidrométricas e das vazões do rio Jacupiranguinha nos períodos de 17/12/04 a 12/05/05 e de 25/05/06 a 14/01/07

4.6.3 Cálculo da Vazão Ecológica

De acordo com a metodologia citada para a determinação da vazão mínima ou ecológica, o valor que representa 20% da Q_{90} é $0,56\text{m}^3/\text{s}$. Se a vazão do rio Jacupiranguinha estivesse operando como vazão ecológica, algumas mudanças no ecossistema iriam ocorrer, pois não haveria mais a interação entre rio e planície de inundação, pois a água não mais extrapolaria a calha do rio. O maior problema de estimar essa vazão dita ecológica dessa maneira é o fim dos ciclos de cheias e estiagens; isso porque as espécies respondem de maneira diversa aos eventos hidrológicos como cheias e estiagens (melhorar). A mesma cheia que beneficia uma espécie de fauna e/ou flora, por exemplo, pode prejudicar uma espécie de crustáceo que é carregado pela velocidade muito alta da água. Já em anos de cheias mais fracas, a população de crustáceos é que se beneficia (COLLISCHONN, 2005). Anos favoráveis e desfavoráveis acontecem com frequência suficiente, mas não excessiva a ponto de eliminar uma espécie ou torná-la dominante.

Além de todos os problemas já citados, ainda existe outro empecilho que são os fatores evolutivos das espécies, que muitos pesquisadores chamam de justificativa pela biologia evolutiva. Eles dizem que as espécies que fazem parte de um ecossistema evoluíram ao longo de muitos anos para tirar proveito do ambiente, inclusive do regime hidrológico. Qualquer alteração no regime deverá ser prejudicial.

Com relação aos problemas causados com o fim das cheias e das secas no conjunto rio-planície de inundação estudada, o próximo capítulo, que relaciona variáveis hidrológicas com limnológicas, demonstrará melhor a reação de alguns fatores ecológicos como DQO, DBO e alguns nutrientes da área de várzea durante a potamofase e a limnofase.

4.6.4 Comparação entre a estação DAEE e estação (1) – limnógrafo entrada

A seção transversal da estação DAEE é muito antiga, mas é interessante que ela mostra que não há inundação neste ponto, pois a altura do barranco é maior do que o nível do rio pode alcançar. A linha da água na estação DAEE era de 2,86 m em 1989 e a vazão base era próxima de 3 m³/s. Já na estação (1), a altura base do rio era de 0,8 m e a vazão em torno de 3 m³/s também. Em relação ao nítido aumento da vazão dos dias atuais, em relação às vazões das séries históricas, é importante salientar que isso se deve ao alto índice de desmatamento ao longo dos anos e também ao aumento da declividade de uma estação para outra.

Pelo hidrograma da figura 4.40, nota-se que as cotas hidrométricas do rio Jacupiranguinha, a montante da planície de inundação estudada, possui pulsos de cheias constantes ao longo dos anos, e que geralmente eles ultrapassam os 3m de altura. Considerando o fato das larguras das seções transversais das estações serem bem próximas estipula-se que quando as cotas do ponto do DAEE ultrapassarem pelo menos 3m, o rio extrapolaria à jusante, permitindo que exista conexão rio-várzea.

A partir deste raciocínio e do gráfico da curva de permanência da estação DAEE, pode-se hipotetizar que aproximadamente 5% dos eventos ocorridos nas séries históricas extrapolam o canal do rio e permitem uma conexão com a planície de inundação.

4.7 RELAÇÕES ENTRE VARIÁVEIS HIDROLÓGICAS E LIMNOLÓGICAS.

Foram construídos sete quadros síntese com o objetivo de explicar a influência do rio Jacupiranguinha nos fatores limnológicos da planície de inundação e a importância das ocorrências sazonais dos pulsos de cheias no ecossistema. O quadro é dividido em quatro partes: o primeiro quadrante é formado por cota d'água (m) do rio no eixo das abscissas e uma variável limnológica nas ordenadas; o segundo quadrante tem área inundada da planície de inundação (m^2) no eixo das abscissas e a mesma variável limnológica nas ordenadas. Os dois primeiros quadrantes formam o chamado “hemisfério limnológico” do quadro. O terceiro quadrante tem as cotas hidrométricas (m) no eixo das abscissas e a vazão (m^3/s) nas ordenadas (curva-chave); no quarto e último quadrante, a relação é entre as áreas inundadas da planície de inundação (m^2) nos eixos das abscissas e a vazão (m^3/s) no eixo das ordenadas. O terceiro e o quarto quadrante formam o denominado “hemisfério hidrológico-hidráulico”.

Foram inseridas três tonalidades de cinza no quadro a fim de representar as fases de inundação. O tom mais claro representa a fase A, ou seja, a água do rio não extrapola a calha do rio Jacupiranguinha, portanto ainda não há relação entre o rio e a planície de inundação. Na fase B, a água do rio começa a extrapolar o canal, mas a área de várzea não alaga completamente, esse período é denominado como a fase de transição, tanto na subida como na recessão do hidrograma de cheia. O tom mais escuro de cinza representa a fase C, que ocorre quando toda planície de inundação está alagada devido às altas cotas hidrométricas do rio.

A condutividade elétrica foi utilizada neste trabalho com o objetivo de comprovar a interação entre a planície de inundação e o rio Jacupiranguinha no período de enchentes.

4.7.1 Condutividade Elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)

A condutividade elétrica da água está diretamente relacionada com a quantidade de matérias dissolvidos presentes, sendo considerado um bom indicador da poluição das águas. No caso deste trabalho, além da condutividade ser um parâmetro para a análise da qualidade da água, ele foi utilizado também para estudar a conectividade entre o rio e a planície de inundação. A figura 4.46 representa a condutividade elétrica das estações (4) e (1), respectivamente: a lagoa da área alagada mais distante do rio Jacupiranguinha, e de dentro do rio no ponto em que ocorre o transbordamento para a planície de inundação.

Figura 4.46 – Condutividade Elétrica das estações (1) e (4) durante as missões experimentais.

No período de maiores precipitações, os quais também foram observados os maiores níveis hidrométricos, p.ex. janeiro de 2005, foram registrados os menores valores de condutividade, devido, possivelmente, ao efeito de diluição. É importante notar que somente nesse período aproximaram-se os valores de condutividade dos dois pontos analisados, em

torno de 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$, confirmando a hipótese da conectividade entre o rio e a planície de inundação nessa época de cheias. Maiores valores foram registrados no período de estiagem; este fato pode estar relacionado com a entrada de alguns tributários, principalmente um efluente da empresa de fertilizantes, localizada a montante da estação (1), que provoca aumentos nos valores de condutividade elétrica.

O gráfico da figura 4.47 explica a reação da condutividade, no mês de janeiro/05, de acordo com as cotas hidrométricas do rio Jacupiranguinha e da estação (4). São dois eixos nas ordenadas (Condutividade e Cotas hidrométricas) e o tempo no eixo das abscissas.

Figura 4.47 – Condutividade Elétrica e Cotas hidrométricas das estações (1) e (4) em janeiro de 2005.

No dia 19/01 a condutividade na estação (1), ou seja, dentro do rio e ainda sem ocorrer o transbordamento, estava em torno de 350 $\mu\text{S}/\text{cm}$, isto é praticamente 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ maior que na lagoa da planície de inundação. No dia seguinte, a água do rio ultrapassa o limite de extrapolação e a condutividade cai praticamente se igualando ao valor da estação (4). Nota-se

também que a partir daí, a água da lagoa da várzea começa a aumentar também, comprovando assim a conexão entre os dois ambientes e a inter-relação físico-química.

O primeiro quadro síntese (figura 4.48) tem a condutividade elétrica representando o fator limnológico. Nota-se que quando ocorre a inundação das áreas de várzea, a condutividade elétrica apresenta seu menor valor; o mesmo ocorre quando há vazões maiores.

Figura 4.48 - Quadro síntese relacionando fatores limnológicos, quadrantes superiores, a partir da Condutividade Elétrica, com fatores hidrológico-hidráulicos, quadrantes inferiores.

4.7.2 Biomassa das Macrofitas (gP.S/m²)

A segunda relação entre fatores limnológicos e hidrológicos a ser analisada é entre a biomassa (gP.S/m²) e a vazão (m³/s) da figura 4.49.

O primeiro quadrante é formado por cota d'água (m) no eixo das abscissas e índice de biomassa (gP.S/m²) nas ordenadas; o segundo quadrante tem área inundada da planície de inundação (m²) no eixo das abscissas e índice de biomassa (gP.S/m³) nas ordenadas. Os dois primeiros quadrantes formam, de novo, o hemisfério limnológico do quadro. O terceiro quadrante tem as cotas hidrométricas (m) no eixo das abscissas e a vazão (m³/s) nas ordenadas

(curva-chave); no quarto e último aparece a relação entre as áreas inundadas da área alagada (m^3) nos eixos das abscissas e a vazão (m^3/s) nos eixo das ordenadas. O terceiro e o quarto quadrante formam, novamente, o hemisfério das variáveis hidrológico-hidráulicas.

Figura 4.49 - Quadro síntese relacionando fatores limnológicos, quadrantes superiores, a partir do índice de biomassa, com fatores hidrológicos, dos quadrantes inferiores.

De acordo com Neiff (1996) e Neiff et al (2000), alterações das flutuações dos níveis da água podem levar ao aumento ou redução da biomassa de macrófitas, dependendo dos tipos ecológicos de macrófitas aquáticas, da frequência, da intensidade e da amplitude do pulso registrado. As relações entre as cotas hidrométricas do rio Jacupiranguinha e o índice de biomassa são evidentes, pois quando ocorre inundação na planície onde está localizada a estação (4), a cota hidrométrica do rio está no seu maior valor e, conseqüentemente, a vazão, a biomassa atinge o seu menor índice experimental. Nota-se também que quando o rio está em estiagem e a vazão é menor, não ocorre inundação nas áreas alagadas, e assim os valores de biomassa aparecem no maior patamar analisado.

Segundo Camargo et al. (2003), o aumento da biomassa de macrófitas aquáticas está relacionado não só a variação do nível da água, mas também a velocidade de corrente e as concentrações de nutrientes do meio ambiente. Entretanto de acordo com o trabalho de Benassi (2006), essas variáveis só sofreram alterações quando ocorreram os pulsos, sendo atribuído a esse fator então, o principal responsável pela variação da biomassa.

4.7.3 DQO - Demanda Química de Oxigênio

Tanto a DQO quanto a DBO consistem em uma técnica utilizada para a avaliação do potencial redutor de matéria orgânica de uma amostra, através de um processo de oxidação química ou biológica. Essas reações são influenciadas pela temperatura e pela quantidade de nutrientes na água (VON SPERLING, 1995).

A terceira relação entre variáveis limnológicas e hidrológicas analisada é entre a demanda química de oxigênio (DQO) e a vazão (m^3/s) (figura 4.50).

Neste quadro, o eixo da variável limnológica foi representado pela demanda química de oxigênio (mgO_2L^{-1}) nos outros eixos mantêm-se os mesmos itens anteriores, cotas hidrométricas (m), área inundada (m^2) e vazão (m^3/s). Os dois primeiros quadrantes formam a parte limnológica do quadro; enquanto o terceiro e o quarto quadrante a parte das variáveis hidrológico-hidráulicas.

Nota-se pela figura 4.50 que a maior concentração de DQO ocorre quando o rio está na estiagem, ou seja, as cotas d'água do rio são pequenas, a vazão é baixa e não ocorre inundação das áreas alagadas. Quando as cotas hidrométricas do rio estão altas e as águas começam a entrar nas planícies de inundação, a DQO é baixa. Através do caminho temporal das cotas hidrométricas, nota-se que a DQO tende a diminuir com o aumento das cotas hidrométricas do rio. Quando ocorre o segundo pico de inundação, a DQO diminui ainda mais o seu valor chegando próximo à zero na última coleta.

Figura 4.50 - Quadro síntese relacionando fatores limnológicos (DQO) com fatores hidrológicos.

De acordo com Neiff (1999), no começo do período de potamofase, que nesse trabalho ocorreu em janeiro/05, realmente ocorre um esgotamento do oxigênio e aumento do CO_2 . Os aportes de matéria orgânica das áreas adjacentes provocam uma diminuição nas concentrações de oxigênio e, conseqüentemente, aumento das concentrações de CO_2 devido à oxidação da matéria orgânica (BENASSI 2006).

O período de seca registra grandes variações na DQO, destaca-se principalmente um alto valor encontrado de 385mg.L^{-1} . É atribuído a esse alto valor o lançamento de efluentes industriais que ocorre, à montante, próximo da estação de coleta.

4.7.4 Nutrientes (Nitrogênio e Fósforo)

Os nutrientes encontrados no ecossistema podem ser derivados de fontes pontuais e difusas. Os nutrientes de fontes pontuais são mais facilmente controlados e detectados quando comparados com os de fontes difusas (VON SPERLING, 1996). De acordo com House e

Denison (1997), as concentrações de fósforo podem ser mais influenciadas por fontes pontuais, como por exemplo, efluentes domésticos e industriais, e as formas nitrogenadas por fontes difusas.

De acordo com Benassi (2006), o rio Jacupiranguinha recebe cargas pontuais de nutrientes, provenientes de efluentes domésticos e industriais, e difusas, advindas das atividades da área de entorno, onde é observada a presença de pastagens e produção agrícola, no período de grandes precipitações. Desse modo, pode-se atribuir as variações nas concentrações de nutrientes a estes fatores.

Porém, a dinâmica dos nutrientes no sistema de áreas alagáveis também parece ser influenciada pelas mudanças nos regimes de pulso, verificados através do aumento dos níveis hidrométricos que, quando somados a densidade de plantas nestas áreas, são os principais responsáveis pela dinâmica dos processos bióticos e abióticos no meio aquático, que por sua vez, alteraram as concentrações de nutrientes no sistema.

4.7.4.1 Nitrato (N-NO₃ mg/L)

A quarta relação analisada entre os fatores limnológicos e hidrológicos, foi entre Nitrato (N-NO₃ mg/L) e a vazão (m³/s) (figura 4.51).

Neste quadro, o eixo da variável limnológica foi representado pelo Nitrato (N-NO₃ mg/L) nos outros eixos mantêm-se os mesmos itens anteriores, cotas hidrométricas (m), área inundada (m²) e vazão (m³/s). Os dois primeiros quadrantes formam a parte limnológica do quadro e o terceiro e o quarto a parte das variáveis hidrológicas.

Figura 4.51 - Quadro síntese relacionando fatores limnológicos (N-NO3) com fatores hidrológicos

Nota-se pela figura 4.51 que a maior concentração de N-NO3 ocorre quando existem áreas alagadas na planície e conseqüentemente as cotas hidrométricas e a vazão do rio estão altas (potamofase). Os menores valores de N-NO3 estão no período de alta estiagem com pequenas vazões, baixas alturas d'água e nenhuma área inundada.

Através do caminho temporal das cotas hidrométricas, nota-se pelo primeiro quadrante, que a concentração de nitrato tende a aumentar com o aumento das cotas hidrométricas do rio. Quando ocorre o segundo pico de inundação, o N-NO3 aumenta ainda mais o seu valor. Pelo segundo quadrante, que relaciona área inundada e concentração de nitrato, nota-se que o rio traz nutrientes para a planície de inundação, pois ao diminuir a área alagada aumenta o N-NO3.

Esse fato pode ser atribuído tanto ao aporte deste nutriente durante o regime de pulso (transbordamento), como também aos processos internos de reciclagem (nitrificação e desnitrificação) e mineralização (HAMILTON E LEWIS, 1987).

4.7.4.2 Nitrogênio Total (N-Total mg/L)

A quinta relação entre os fatores limnológicos e hidrológicos analisada, é entre Nitrogênio Total (N-Total mg/L) e vazão (m^3/s) (figura 4.52).

Neste quadro, o eixo da variável limnológica foi representado pelo Nitrogênio Total (N-Total mg/L) nos outros eixos mantêm-se os mesmos itens anteriores, cotas hidrométricas (m), área inundada (m^2) e vazão (m^3/s). A possível relação entre o rio Jacupiranguinha e o Nitrogênio total da planície de inundação na estação (4) é a menos explícita entre todos os outros seis casos. Apesar de ocorrer uma tendência da concentração de N-Total aumentar de acordo com o aumento da altura do rio, o inverso também acontece. Existem situações em que a concentração de N-Total aumenta mesmo quando a cota hidrométrica do rio está baixa. Quando o rio tem sua maior cota a concentração do N-Total é menor do que em situações em que não ocorre inundação da área alagada.

Figura 4.52 - Quadro síntese relacionando fatores limnológicos (N-Total) com fatores hidrológicos

4.7.4.3 Fosfato Inorgânico (P-PO4 mg/L)

A sexta relação analisada entre os fatores limnológicos e hidrológicos, é entre Fosfato Inorgânico (P-PO4 mg/L) e a vazão (m^3/s) (figura 4.53).

A variável limnológica foi representada pelo P-PO4 (mg/L) nos outros eixos mantêm-se os mesmos itens anteriores, cotas hidrométricas (m), área inundada (m^2) e vazão (m^3/s). Os dois primeiros quadrantes, formam a parte limnológica do quadro e o terceiro e o quarto, a parte das variáveis hidrológicas.

O padrão de variação do Fosfato Inorgânico acompanha o de oscilação nos níveis hidrométricos (figura 4.53) principalmente, se avaliarmos os cinco dias de coletas no período em que houve conectividade (janeiro/05). Os maiores valores de fósforo registrados na lagoa, durante o período em que ocorre transbordamento, sugerem que o rio Jacupiranguinha seja o maior contribuinte de fósforo.

Com relação à grande variação das concentrações de fósforo, principalmente durante os cinco dias de coletas no período em que não houve a conectividade, sugere-se que ela pode estar associada tanto aos processos de absorção e decomposição pelos organismos como a diferenças na absorção aos sedimentos.

Segundo Benassi (2006), a elevada concentração de fósforo detectada em um único dia de coleta (aproximadamente $1,9 \text{ mgL}^{-1}$) pode ser resultante do lançamento de efluente rico em compostos fosforados proveniente de um Complexo Industrial Químico produtor de fertilizante como “superfosfato”, além dessa região apresentar uma fonte de fosfato (site: www.bunge.com.br/noticias/) , o qual pode ter contribuído também para os altos valores de condutividade elétrica observados neste ponto.

Figura 4.53 - Quadro síntese relacionando fatores limnológicos (P-PO4) com fatores hidrológicos.

4.7.5 - Materiais Suspensos (Sólidos Suspensos Inorgânicos SSI mg/L)

A próxima relação analisada entre os fatores limnológicos e hidrológicos, será entre Sólidos Suspensos Inorgânicos (SSI mg/L) e a vazão (m^3/s) (figura 4.54).

Os Sólidos Suspensos Inorgânicos (mg/L) representam o eixo da variável limnológica enquanto que nos outros eixos mantêm-se os mesmos itens anteriores, cotas hidrométricas (m), área inundada (m^2) e vazão (m^3/s). Os dois primeiros quadrantes formam a parte limnológica do quadro e o terceiro e o quarto a parte das variáveis hidrológicas.

Nota-se que a maior concentração de SSI ocorre quando existem áreas alagadas na planície e conseqüentemente as cotas hidrométricas e a vazão do rio estão altas (potamofase). Os menores valores encontrados de SSI estão no período de alta estiagem com pequenas vazões baixas alturas d'água e nenhuma área inundada. Através do caminho temporal das cotas hidrométricas, notamos pelo primeiro quadrante, que a concentração de sólidos suspensos inorgânicos tende a aumentar com o aumento das cotas hidrométricas do rio.

Quando ocorre o segundo pico de inundação, o SSI aumenta ainda mais o seu valor. Pelo segundo quadrante nota-se que o rio traz SSI para a planície de inundação, pois ao diminuir a área alagada aumenta a concentração de sólidos suspensos inorgânicos.

Figura 4.54 - Quadro síntese relacionando fatores limnológicos (SSI) com fatores hidrológicos.

Estas características devem estar relacionadas com o aporte de matérias finos a montante, considerando a bacia de drenagem que, posteriormente, são transportados para o sistema de áreas alagáveis durante o transbordamento (BENASSI 2006). Rocha (2001) encontrou concentrações de sólidos inorgânicos maiores nos rios Baía e Corutuba na planície fluvial do alto Paraná, durante o período de cheias, e atribuiu este resultado a influência do rio Paraná durante o período em que houve conectividade hidrológica, que carregaram quantidades significativas de materiais para a planície dos rios Baía e Corutuba.

5.1_ CONCLUSÕES

5.1.1 Área de Estudo

O local estudado é uma planície de inundação de 125.505 m² de área situada na bacia hidrográfica do rio Jacupiranguinha afluente do rio Jacupiranga que deságua no Ribeira do Iguaçu. A planície de inundação apresenta topografia levemente ondulada o que facilita sua drenagem, entretanto, parte da água oriunda das inundações é retida em algumas lagoas artificiais causadas por retiradas predatórias de areia do local. A cota topográfica mais baixa da área alagada está a 2,474 m do leito do rio, e é nesse local que ocorre o transbordamento da água do canal do rio para a planície de inundação. O rio Jacupiranguinha de acordo com a classificação de Rosgen (1996) pode ser considerado como sendo tipo C5.

5.1.2 Monitoramento

De acordo com os dados monitorados em campo, ocorreram dez eventos que inundaram a área de várzea durante os períodos de coletas. Desses eventos somente três inundaram completamente toda a planície.

De acordo com os hidrogramas do rio Jacupiranguinha constatou-se que a cota hidrométrica e a temperatura do mesmo variam muito ao longo do dia. Isso se deve a emissão de efluentes oriundos de uma empresa de fertilizante localizada no município de Cajati, à montante da área alagada experimental. Foi constatado, que essa indústria em épocas de

estiagem lança uma vazão até maior que a do próprio rio, resultando em aumento da condutividade elétrica e uma sensível diminuição do oxigênio dissolvido do rio.

5.1.3 Curva Chave

Para a determinação da extrapolação superior da curva-chave da seção transversal do rio Jacupiranguinha na entrada da área alagada foram utilizados três diferentes métodos. Como foram feitas muitas medições de vazões ao longo do período estudado, a variação entre os três métodos não passou de 1% a 2%. A explicação desta pequena diferença está na elevação da declividade hidráulica em águas médias e altas, efeito que foi levado em consideração no traçado da curva da velocidade média, mas ignorado na extrapolação retilínea praticada nos dois outros métodos.

O coeficiente de rugosidade de *Manning* do canal variou de acordo com as alturas do nível da água; quanto mais próximo o nível d'água estiver da seção plena, menor a influência da rugosidade no escoamento, conforme tendência hidráulica descrita por Yen (1992).

Os altos valores encontrados para a rugosidade da área alagada são importantes, principalmente, para ampliar as discussões a cerca dos métodos tradicionais para o cálculo das rugosidades de *Manning*. Entretanto a tendência de aumento da rugosidade citada por Yen (1992), quando um canal é composto por áreas de várzea foi comprovado neste trabalho.

5.1.4 Incertezas da Curva Chave

A análise das incertezas dos três métodos de extrapolação para a parte superior da curva-chave mostrou que existe uma grande diferença entre os resultados. No método das velocidades médias, a variação da vazão no canal do rio fica entre 48 m³/s e 38 m³/s; já no método da curva de tendência, a alteração é entre 43 m³/s e 35 m³/s. No método de Stevens não há variação, pois o princípio do método diz que o perfil é estável e $S\sqrt{R}$ (fator

geométrico) não deve variar entre cheias e estiagens, ou seja, mesmo ocorrendo variação das cotas em relação à vazão, a proporção de ambas as curvas, de fator geométrico versus vazão e de fator geométrico versus cotas, são as mesmas.

5.1.5 Ecologia Fluvial

Através do levantamento topográfico da planície de inundação estudada, pode-se relacionar área alagada e cota hidrométrica do rio. Toda a várzea foi dividida em quatro partes de acordo com a sua cota topográfica, que tem como referência o fundo do canal do rio Jacupiranguinha. A primeira área é inundada quando as cotas d'água estão entre 2,474m e 2,707m, a segunda quando as cotas estão entre 2,707m e 2,901m; a quarta área alaga quando a linha d'água está entre 2,901m e 3,016 e por fim a terceira área é inundada quando as cotas hidrométricas do rio ultrapassam 3,016m.

Neste estudo foi possível encontrar variação sazonal da biomassa total das macrófitas aquáticas presentes nas lagoas do sistema de áreas alagáveis com maiores valores obtidos em abril/05 e julho/05. Menores valores foram registrados em janeiro/05, quando ocorreu o transbordamento do rio Jacupiranguinha. De acordo com Benassi (2006), esse fato, associado ao aumento dos níveis hidrométricos durante o período de grandes precipitações, provavelmente, tenha influenciado tal variação.

5.1.6 Balanço Hídrico

Analisando as componentes do balanço hídrico da bacia do rio Jacupiranguinha constata-se, que durante o período de estudo a região se encontrava em fase de estiagem já que o armazenamento chegou a quase 400 mm de déficit, entretanto no final de dezembro e início de janeiro as chuvas começaram a aumentar e o déficit do armazenamento, conseqüentemente, a diminuir.

5.1.7 Vazão Ecológica

A vazão dita como ecológica ou remanescente do rio Jacupiranguinha, de acordo com as metodologias que exigem as leis nacionais de outorgas, foi $0,56\text{m}^3/\text{s}$. Se a vazão do rio estivesse operando como vazão ecológica, algumas mudanças no ecossistema iriam ocorrer, pois não haveria mais a interação entre rio e planície de inundação, pois a água não mais extrapolaria a calha do rio. O maior problema dessa metodologia de “vazão ecológica” é justamente o fim dos ciclos de cheias e estiagem isso porque as espécies respondem de maneira diversa aos eventos hidrológicos como cheias e estiagens.

5.1.8 Relação entre Variáveis Hidrológicas e Limnológicas

No período de maiores níveis hidrométricos, p.ex. janeiro de 2005, foram registrados os menores valores de condutividade, devido, possivelmente, ao efeito de diluição. É importante notar que somente nesse período aproximaram-se os valores de condutividade dos dois pontos analisados, confirmando assim a conectividade entre o rio e a planície de inundação nessa época de cheias. Maiores valores foram registrados no período de estiagem. Este fato pode estar relacionado com a entrada de alguns tributários, principalmente um efluente de uma empresa de fertilizantes (localizada a montante da estação (1)), que fazem que os valores de condutividade elétrica se mantenham muito elevados.

Os quadros sínteses analisados apresentam dois hemisférios bem definidos: o superior, referente às variáveis limnológicas, e o inferior, às variáveis hidrológicas. Os quadros apresentam as três fases de inundação da relação entre o rio e a área alagada. Devido à falta de dados coletados na fase C, de recessão, houve dificuldades para fazer a interpretação final entre as três fases de inundação. Entretanto é importante salientar que nas outras duas fases analisadas existe um tipo de comportamento padrão. Na fase A, que representa a estiagem, foram feitas coletas durante dois períodos: a primeira com as cotas hidrométricas do rio

variando entre 1,30 e 1,50 m e segunda com as cotas do rio em torno de 0,8m. Em praticamente todos os quadros não houve variações significativas entre os cinco dias de coletas de cada período. Na fase B as cotas do rio estavam entre 2,45 e 3,00 m; nesse período houve uma grande variação dos dados, até porque em certos momentos a água do rio estava em ascensão e em outros estava em recessão. Essa alteração dos dados caracteriza bem a fase B que é denominada de fase de transição.

5.2_ RECOMENDAÇÕES

É necessária a continuação do monitoramento das cotas hidrométricas do rio e das lagoas da planície de inundação assim como as variáveis climatológicas da microbacia do Jacupiranguinha. Esta recomendação é necessária para completar mais ciclos hidrológicos (secas e cheias) afim de melhor estimar a relação entre as cotas hidrométricas do rio e as áreas alagadas, as vazões ecológicas e determinar com maior precisão o balanço hídrico da região.

A curva-chave de uma determinada seção transversal do rio, de um modo geral, sofre várias alterações ao longo dos tempos, devido principalmente à erosão, à vegetação, à deposição de sedimentos e às ações antrópicas. Por isso, é necessária a continuação das medições de vazões com o objetivo de poder ajustar os valores corretos de vazões para suas respectivas cotas.

Para poder ter uma aceitável curva-chave da seção transversal do canal do rio e também da área alagada é preciso fazer novas medições de vazão no período de potamofase, pois existem poucos valores relativos a essas épocas.

Com relação ao cálculo da rugosidade de *Manning* da planície de inundação é importante serem testadas outras equações e também outras hipóteses de escoamento. Yen

(1992) sugere algumas outras fórmulas para esses cálculos; entretanto, é necessário verificar a suas possibilidades de uso na planície de inundação do rio Jacupiranguinha.

Os gráficos do balanço hídrico assim como os da vazão ecológica devem abranger um período de dados de pelo menos um ano inteiro para poder se completar um ciclo de cheias e estiagens. Sabe-se, no entanto, que principalmente para o cálculo da vazão ecológica necessita-se de uma série histórica mais longa do que um ano, sendo assim necessário à manutenção do monitoramento tanto do rio quanto do clima da região.

É recomendável utilizar outros métodos de determinação da vazão ecológica ou remanescente. Entretanto, o mais importante é não usar somente métodos hidráulicos, mas inserir também métodos que levam em consideração outros aspectos ambientais, como o vale do rio, as vegetações ribeirinhas, o canal do rio e também as espécies de peixes.

Para poder completar os quadros sínteses que relacionam os fatores ecológicos e hidrológicos do rio Jacupiranguinha e da planície de inundação é recomendável, além da manutenção do monitoramento, a continuação da determinação dos parâmetros limnológicos das áreas alagadas.

Devido ao fato da planície de inundação estudada estar com suas características naturais totalmente modificadas (lagoas artificiais, culturas de bananas, emissão de efluentes industriais), são necessárias usos de técnicas de recuperação ambiental como as indicadas pelo ANEXO 1, a fim de revitalizar essas áreas alagadas. As técnicas se baseiam em um gerenciamento sustentável de toda região englobando rio, área de várzea e bacia hidrográfica, e todas as incertezas relativas aos seus parâmetros (Bacia Escola).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA NETO, P. (2004). *Analises dos componentes hídricos de uma bacia urbana experimental*. III Simpósio de Recursos Hídricos do Centro-Oeste, Goiânia (GO) – ABRH.
- BENASSI, R. F.; CALIJURI, M. C.; FREIRE, R. H. F.; FREITAS, H. C. (2006). *Dinâmica Espaço Temporal das Variáveis Físicas e Químicas na Coluna D'água de um Sistema de Áreas Alagadas Natural, Vale do Ribeira, São Paulo*. III Encontro do Projeto Temático.
- BENASSI, R. F. (2006). *Dinâmica Espaço-Temporal de um sistema de áreas alagáveis na planície de inundação do rio Jacupiranguinha, Vale do Ribeira de Iguape, SP*. São Carlos, 2006. Tese (Doutoramento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- BENETTI, A. D.; LANNA, A. E.; COBALCHINI, M. S. (2003a). Current practices for establishing environmental flows in Brazil. *River research and applications*, Vol. 19 pp. 1-18.
- BENETTI, A. D.; LANNA, A. E.; COBALCHINI, M. S. (2003b). Metodologias para determinação de vazões ecológicas em rios. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Vol. 8 No. 2.
- BERTONI, J. C.; TUCCI, C. E. M. (1993). Precipitação, In: Tucci, C. E. M. (org.): *Hidrologia: Ciência e Aplicação*, 2ª ed., Editora da Universidade, p. 177-241.

- BORGES, A. C. et al. (2005). Aspectos Quali-Quantitativo dos Recursos Hídricos na Bacia do Rio Jacupiranga como Instrumento de Avaliação de Qualidade Ambiental .XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, João Pessoa (PB) – ABRH.
- BRADLEY, C. (2002). Simulation of the annual water table dynamics of a floodplain wetland, Narborough Bog, UK. *Journal of Hydrology*, v. 261, p.150-172.
- BRASIL (1997), Política Nacional dos Recursos Hídricos. Lei número 9.433 de 8 de janeiro de 1997 do Conselho Nacional de Recursos Hídricos, Ministério do Meio Ambiente.
- BRIX, H. (1997). Do Macrophytes Play a role in Constructed Treatment Wetlands? *Water Science and Technology*, Oxford, v. 35, n. 5, p. 11-17.
- CALIJURI, et al. (2003) Estudo dos sistemas naturais e artificiais redutores de cargas poluidoras para a sustentabilidade dos recursos hídricos do Baixo Ribeira de Iguape – SP – Projeto Temático. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- CALLISTO, M; GONSALVES JÚNIOR, J. F.: 2005. Invertebrados Aquáticos como Bioindicadores. In: GOULART, R.M.A (Eds). *Navegando o Rio das Velhas das Minas aos Gerais*, 555-67
- CAMARGO, A. F. M.; PEZZATO, M. M.; HENRY-SILVA, G. G. (2003). Fatores limitantes à produção primária de macrófitas aquáticas. In: Thomaz, S.M.; Bini, L. M. (Org). *Ecologia e manejo de macrófitas aquáticas*. 1 ed. Maringá: Eduem, v. p. 59-83.
- CASCO, S. L.; POI DE NEIFF, A. S. G.; BENASSI, R. F.; NEIFF, J. J. (2003). Crescimento de plantas flutuantes livres em diferentes condições da água. *Iheringa, Ser. Bot. Porto Alegre*, v. 58(2), p.191-193.

- CHOW, V. T, D; MAIDMENT, L . MAYS. (1994). Applied Hydrology. New York: Mc Graw Hill, 583 p.
- CHAUDHRY, F. H. (2000). Aproveitamento de recursos hídricos. In: CASTELLANO, E. G.; CHAUDHRY, F. H. (eds.). Desenvolvimento sustentado: problemas e estratégias. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, p. 27 – 37.
- CLARK, R. (1991). *Water. The International Crisis*. Earthscan, London.
- COLLISCHONN, W.; ANGRA, S. G.; FREITAS G. K.; PRIANTE G. R.; TASSI R.; SOUSA C. F. (2005). Em busca do hidrograma ecológico. XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, João Pessoa (PB) – ABRH.
- COWARDIN, L. M.; CARTER, V.; GLET, F. C.; LAROE, E. T. (1979). *Classification of wetlands and Deepwater Habitats of the United States*. U. S. Fish and Wildlife Service Biological Services Program Report FWS/ OBS-79/31, Washington, DC.
- DAEE – Departamento de Águas e Energia Elétrica, (1998). Regionalização Hidrológica no Estado de São Paulo. Revista Águas e Energia Elétrica – DAEE, v. 14, p. 4 – 10.
- DAEE – Departamento de Águas e Energia Elétrica, (1998). Sistema Integrado de Gerenciamento dos Recursos Hídricos do Estado de São Paulo. www.sigrh.sp.gov.br (data do acesso, 22/07/2006).
- DEPETTRIS, C. A.; MENDIONDO, E. M.; NEIFF, J. J.; ROHRMANN, H. (2000). Flood defence strategy at the confluence of Paraná and Paraguay Rivers. In: TOENSMANN, F.; KOCH, M. (Org.) River flood defense. Kassel, Alemanha, v. 1, p. 31 – 40.

- FIGUEROA, F. E. V. (1996). *Avaliação econômica de ambientes naturais. O caso das áreas alagadas. Uma proposta para a represa do Lobo (Broa). Itirapina-SP*, 1996. 143f. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, São Paulo.
- GLEICK, P. H. (1998). *The World's Water. The Biennial Report on Freshwater Resources*. Island Press, Washington, D.C.
- GOLDWATER, L. J. (1971). Mercury in the environment. In: *Chemistry in the Environment. Reading from Scientific American*. W. H. Freeman, San Francisco, p. 328-334.
- GOPAL, B. (1990). Natural and constructed wetlands for wastewater treatment: potentials and problems. *Wat. Sci. Tech.*, v. 40, n. 3, p. 27-35.
- GOPAL, B. (1999). Natural and Constructed Wetlands for wastewater treatment: potential and problems. *Wat. Sci. Tech*, 40, n.3, p. 27-35.
- GOSSELINK J. G.; TURNER, R. E. (1978). The role of hydrology in freshwater wetland ecosystems. In: GOOD, R. E.; WHIGHAM, D. F.; SIMPSON, R.L. (eds). *Freshwater wetlands: Ecological process and management potential*. Academic Press, New York, p. 63-78.
- GOULART, M; CALLISTO, M. (2003). Bioindicadores de qualidade de água como ferramenta em estudo de impacto ambiental. *Revista FAPAN*, v. 2 a. 2, p. 153-164.
- GRANZIERA, M. L. M. (2003) *Direito de Águas: disciplina jurídica das águas doces*. 2ª ed. São Paulo. Ed. Atlas.

- GUIA VALE DO RIBEIRA (2002). O mais completo guia do Vale do Ribeira. [http: www.gvr.com.br](http://www.gvr.com.br) . (30/09/2002).
- HAMILTON S. K.; LEWIS, W. M. (1987). Causes of seasonality in the chemistry of a lake on the Orinoco River floodplain, Venezuela. *Limnol Oceanogr.* V. 32, p. 1277-90.
- HAMMER, D. A.; BASTIAN, R. K. (1989). Wetlands ecosystems, natural water purifiers? In: _____. Constructed wetlands for waster treatment: municipal, industrial and agricultural. Lewis Publishers, p. 5-19.
- HENRY, R. (2003). Os Ectónos nas interfaces dos ecossistemas aquáticos: Conceitos e Aplicações. In: _____(ed.). Ecótonos nas interfaces dos ecossistemas aquáticos. Rima Ed., p. 1-28.
- HOUSE, W. A.; DENISON, F. H. (1997). Nutrient dynamics in a lowland stream impacted by sewage effluent: Great Ouse, England. *Sci Total Environ.* Vol. 205(1), p. 25-49.
- JACCON, G.; CUDO, K. J. (1989) – Curva-Chave: análise e traçado. Brasília: DNAEE. 273p.
- JUNK, W. J.; BAYLEY, P. B.; SPARKS, R.E. (1989). The Flood Pulse Concept in river floodplain system. *Can Spec. Publ. Fish. Aquat. Sci*, v.106 pg. 110-127.
- YEN, B. C. (1991). Channel Flow Resistance: Centennial of Manning's Formula. Edited by YEN, B. C. Water Resources Publications. Littleton, Colorado, USA.
- LIMA, G. BOLDRIN R. S.; OHNUMA JR. A. A.; MENDIONDO E. M.; MAUAD F. F. (2006). Análise de incertezas de observações hidrológicas e sua influência na modelagem de pequenas bacias urbanas . Revista Brasileira de Recursos Hídricos, enviada e aprovada (2006).

- LIMA, W. P. (1999) A microbacia e o desenvolvimento sustentável. *Ação Ambiental*, Universidade Federal de Viçosa. V. 1, n. 3, p. 20 -22, jan.
- MARTINS, E. S. P. R; PAIVA J. B. D.(2000). Monitoramento de Recursos Hídricos: Quantidade.In PAIVA & PAIVA (org) Editora ABRH. Hidrologia Aplicada a Gestão de Pequenas Bacias Hidrográficas cap. 20.
- MENDIONDO, E. M. (1998). Análisis multi-temporal y espacial de la respuesta espectral de la vegetación relacionada con el hidroperíodo en humedales. In: II SIMP. de REC. HÍDR. CONE SUL. Santa Fé, Actas, Santa Fé, Ed. UNL, v. 2, p. 91-99.
- MENDIONDO, E. M.; CLARKE, R. T.; TOENSMANN, F. (2000a). River restoration, discharge uncertainty and floods. In: TOENSMANN, F.; KOCH, M. (ed.). River flood defence. Kassel, Alemanha, v. 2, p. 141-152.
- MENDIONDO, E. M.; NEIFF, J. J.; DEPETTRIS, C. A. (2000b). Ecohydrology of wetlands aided by remote sensing: a case study with the REVIVE's GOALS initiative. In: MAIONE, U.; LEHTO, B. M.; MONTI, R. (ed.). New trends in water and environmental engineering for safety and life. Rotterdam, Netherlands.
- MENDIONDO, E. M. (2001) Contribuições da análise de incertezas para a recuperação ambiental de bacias pela abordagem interdisciplinar de Geobiohidrologia. Tese (Doutorado), Rec. Hídricos e San. Ambiental, Porto Alegre, RS: Ed. UFRGS.
- MENDIONDO, E. M.; NEIFF, J. J.; DEPETTRIS, C. A. (2001). Como fundamentar ecologicamente um modelo com tecnologia espacial pra avaliar terras úmidas. In: Anais do V Congresso de Ecologia do Brasil - Resumos. p.1186. Porto Alegre.

- MITSCH W. J.; GOSSELINK J. G. (2000). Wetlands. Van Nostrand Reinhold, New York, 4rd ed., 920p.
- MOCCELLIN, J. (2005). *A microbacia do rio Jacupiranguinha como unidade de estudo para a sustentabilidade dos recursos hídricos do Baixo Ribeira do Iguape, SP*. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlo, 2005.
- MORAES, R. P. (1997). Transporte de chumbo e metais associados no Rio Ribeira de Iguape, São Paulo, Brasil. Dissertação (Mestrado), Geociências (Metalogênese), Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 94 p.
- NEIFF, J. J. (2003). Planícies de Inundação São Ecótonos? In: HENRY, R. *Ecótonos nas interfaces dos ecossistemas aquáticos*. Rima Ed., p. 29-46.
- NEIFF, J. J. (1996). Large rivers of South America: Toward a new approach. Verh. Internat. Verein. Limnol. V. 26, p. 167 – 180.
- NEIFF, J. J.; MENDIONDO, E.; DEPETTRIS, C. (2000). Enso's floods on Paraná river ecosystems, South America. In: TONSMANN, F.; KOCH, M. (ed.). River flood defence. Herkules Vg., Kassel.
- NEIFF, J. J. (2001). Diversity in some tropical wetland systems of South America. In GOPOL, B.; JUNK, W. J.; DAVIS, J. A. Biodiversity in wetlands: assessment, function and conservation. Backhuys Publishers, Leiden, The Netherlands. V. 2, p. 157 – 186.
- NICHOLS, D. s. (1983). Capacity of natural wetlands to remove nutrients from wastewater. Jounal of the Water Pollution Control Federantion, v. 55, p. 495-505.
- ODUM, E. P. (2001) *Fundamentos de Ecologia*. Rio de Janeiro, Guanabara.

OLIVEIRA, J. H. (1973). Cálculo de descarga líquida pelo método da meia seção. [S.I.] DNAEE. 10p.

PATRICK. W. H. JR. (1994). From wasteland to wetlands. *Journal of environmental Quality*, Madison, v. 2, p. 892-896.

PANTE, A. R.; MARQUES, M. G.; CANELLAS, A. V. B.; LANNA, A. E. L. 2004 Proposta de Metodologia Simplificada para Determinação da Vazão Ecológica em Aproveitamentos Hidrelétricos. Submetido a Revista Brasileira de Recursos Hídricos.

PENMAN, H. L. (1956). Evaporation: an introductory survey. Netherlands. *Journal of Agricultural Science*, Cambridge, v. 4, p. 9-29.

PETTS, G. E.; MADDOCK, I. (1996). Flow Allocation for In-river Needs. *River Restoration*, Edited by PETTS, G. Edgbaston Birmingham.

POFF, N. L.; ALLAN, J. D.; BAIN, M. B.; KARR, J. R.; PRESTEGAARD, K. L.; RICHTER, B. D.; SPARKS, R. E.; STROMBERG, J. C. (1997). The natural flow regime: a paradigm for river conservation and restoration. *Bioscience*, Vol. 47 No. 11 pp. 769-784.

PORTO, R. M. (1998). Fórmula de Manning, Canais -Escoamento Permanente e Uniforme. In Porto, R. M.: *Hidráulica Básica*, 20 ed., Editora EESC-USP, Projeto REENGE.

POSTEL, S.; RICHTER, B. (2003). *Rivers for life: Managing water for people and nature*. Island Press. Washington. 253p..

PRATT, J. (1997). *Truckee-Carson River Basin Study*. Final Report. Report to the Western Water Policy Review Advisory.

- RIGHETTO, A. M. (1998). Hidrologia e Recursos Hídricos, Edusp, São Carlos, 819 p.
- RIGUETO, J. M., BARROS, R. M., MENDIONDO, E. M. (2003). Avaliação da seguridade e percepção pública sobre riscos de enchentes em várzeas urbanizadas: O caso do micro-centro da cidade de São Carlos – SP. In: Anais eletrônicos do XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Curitiba.
- ROCHA, P. C. (2004). Conectividade hidrológica e aspectos físico-químicos no sistema rio Baía/Canal Corutuba/rio Ivinheima, região SE de Mato Grosso do Sul – Brasil. *Revista Eletrônica da Associação dos Geógrafos Brasileiros – Seção Três Lagoas*. Três Lagoas, novembro, v. 1, p. 69-90.
- ROSGEN, D. (1996). The Morphological Description. In Rosgen, D.: Applied River Morphology, illustrated by Hilton Lee Silvey 20 ed., Editora Media Companies.
- RUTKOWSKI, E. A. (1999). Desenhando a bacia ambiental – Subsídios para o planejamento das águas doces metropolitan(izad)as. Tese de doutorado. Universidade Estadual de Campinas.
- SANCHES ORDONEZ, J. E. (2000) Fundamentos da Hidrologia. 2.ed. ver. atual. Porto Alegre: Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS.
- SEFIONE, A. L. (2002). *Estudo Comparativo de Métodos de Extrapolação Superior de Curvas-Chave*. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.
- SILVA, D. D. e PRUSKI, F. F. 2000 Gestão de recursos hídricos: Aspectos legais, econômicos, administrativos e sociais. ABRH Porto Alegre. 659 p.

- SILVEIRA, R. L. (1974) Hidrometeorologia II: notas de aula. Porto Alegre: Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS. Paginação Irregular.
- STERN, D. A.; KHANBILVARDI, R.; ALAIR, J. C. RICHARDSON, W. (2001). Description of flow through a natural wetland using dye tracer test. *Ecological Engineering*, v.18, p. 173-184.
- STALNAKER, C.; LAMB, C. L.; HENRIKSEN, J.; BOVEE, K. & BARTHLOW, J. (1995). The Instream Flow Incremental Methodology. A Primer for IFIM. U.S. Department of Interior. National Biological Service, Washington, D.C.
- TOLEDO, L. G. E NICOLELLA, G. (2002). Índice de Qualidade de Água em Microbacias sob uso Agrícola e Urbano. *Scientia Agrícola*, v. 59, n.1, p. 181-186, jan – mar.
- TUCCI, C. E. M.; BELTRAME, L. F. S. (1993). Evaporação e Evapotranspiração, In: Tucci, C. E. M. (org.): Hidrologia: Ciência e Aplicação, 2ª ed., Editora da Universidade, 253-287. Porto Alegre, RS.
- TUCCI, C. E. M. (1993) (org.). Hidrologia: Ciência e Aplicação, 2ª ed., Editora da Universidade, 943 p. Porto Alegre, RS.
- TUCCI, C. E. M. (2002). Regionalização de vazões. Editora da Universidade, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 256 p.
- TUCCI, C. E. M.; SILVEIRA, R. L. (1985). Análise de consistência de dados fluviométricos. Porto Alegre: Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS.
- TURNER, R. K.; PEARCE, D.; BATEMAN, I. 1994 Environmental economics: An elementary introduction. Harvester Wheatsheaf New York. 328 p.

- UNIVERSITY OF SOUTHAMPTON (2002). South & Central América Including México and the Caribbean. <http://www.soton.ac.uk/~tjms/samerica.html>. (30/09/2002).
- VANNOTE, R. L.; MINSHALL, G. W.; CUMMINS, K. W.; SEDELL, J. R.; CUSHING, C. E. (1980). *The river continuum concept*. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences v. 37 n.1, p. 130-137.
- VON SPERLING, M. (1996). *Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: Introdução a qualidade das águas e ao tratamento de esgotos*. 2ed. – Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, v. 11, p. 105-119.
- WECOMME, R. L. River fisheries. (1995). *FAO Fisheries Technical Paper*. N.262. FAO, Rome. 330p.
- WHIGHAN, P. A.; YOUNG, W. J. (2001). Modelling River and Floodplain Interactions for Ecological Response. *Mathematical and Computer Modelling*, v. 33, p. 235-247, 2001.
- WHITAKER, V. A. (1993). *A área alagada da Represa do Lobo (Itirapina, SP). Os processos Ecológicos Associados ao Potencial de Desnitrificação dos Sedimentos*. 1993. 137f. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo. Escola de Engenharia de São Carlos.
- WHITAKER, V. A.; MATVIENKO, B.; TUNDISI, J. G. (1995). Spatial heterogeneity of physical and chemical conditions in a tropical reservoir wetland. *Lakes & Reservoirs: Research and management*, v. 1, p. 169-175.

ANEXO 1

Análise Multi-Critério e Determinação dos Indicadores de Sustentabilidade de Sistema Fluvial

A análise multi-critério foi profundamente estudada a partir da dinâmica espacial e temporal de parâmetros de qualidade e quantidade, coletados experimentalmente por Benassi (2006). Posteriormente, Almeida Neto (2007) integrou estes resultados incluindo: a) análise de incertezas hidráulicas e hidrológicas, b) hidroperíodo e pulsos, analisados experimentalmente a partir da ecologia fluvial, que incorpora três estágios: b.1, rio sem extravasamento, b.2 rio conectado à planície de inundação, e b.3, fase de recessão, c) levantamento plani-altimétrico complementar dos pontos característicos da várzea experimental, d) estabelecimento de nova curva de área alagada versus altura d'água do rio, e) inovação ao incluir o estudo a partir de “hemisfério limnológico/ecológicos e do hemisfério hidráulico/hidrológico. Resultado: devido à alta dinâmica temporal e espacial da várzea experimental, os dados coletados mostram-se altamente não-lineares.

Os indicadores de sustentabilidade de sistema fluvial, nas micro-bacias analisadas, respondem à teoria de hidráulica fluvial proposta na Figura A-1. Os indicadores enquadram-se a partir de categorias (primeira colunada tabela A-1), detalhadas por 18 variáveis (terceira coluna da Tabela A-1), relativas ao setor de interação (“bacia-rio”; “bacia-várzea”; “rio-várzea”, correspondendo à segunda coluna da Tabela A-1). Estes indicadores foram sugeridos para responder aos cenários de sustentabilidade do Projeto Temático **FAPESP nº. 02/13449-1** Intitulado: “*Estudo dos sistemas naturais e artificiais redutores de cargas poluidoras para sustentabilidade dos recursos hídricos do Baixo Ribeira de Iguape*”

Tabela A-1 – Indicadores de Sustentabilidade Fluvial

Categoria (Fig. A-1)	Indicador da interação:	Variável [unidade]
Continuidade	(bacia-rio): indicador associado ao número e extensão de canais da rede de drenagem e da frequência de inundações máximas da várzea, responsáveis pela manutenção da perenização dos rios e pela integração de processos subterrâneos e superficiais. São responsáveis pelo potencial de autodepuração de cargas em escala macro.	<p>X1: número de sub-bacias afluentes laterais por unidade de comprimento longitudinal do rio principal [Nro./km]</p> <p>X2: densidade de afluentes na drenagem [km/km²]</p> <p>X3: frequência de ocorrência de completa ocupação da várzea por inundações máximas [Nro./décadas]</p> <p>X4: fração de áreas de lagoas dentro das áreas de várzeas [km/km², %]</p> <p>X5: relações de perímetro molhado da seção potencial máxima de várzea (incluindo o canal) e o perímetro do canal principal [m/m, %]</p>
Diversidade	(bacia-várzea): quantificação de áreas alagadas permanentes em relação ao total de áreas alagadas da várzea, como indicativo de proporção de sistemas lênticos internos com potencial de intercâmbio de nutrientes, energia e/ou informação com o leito principal, que responde aos processos de chuva-vazão-propagação na decorrência de precipitações sazonais.	<p>X6: valor relativo, quociente das áreas alagadas nas várzeas com relação à área total de várzeas disponíveis para alagamento [km/km², %]</p> <p>X7: valor relativo, quociente do total de áreas de várzeas com relação à área total da bacia de contribuição de montante [km/km², %]</p> <p>X8: número de usos e ocupações diferentes por unidade de área de várzea [Nro./km]</p>
Dinâmica	(bacia-várzea): mecanismo não-linear de processos multivariados de nutrientes, informação e energia intercambiada sob situações de limnofase e potamofase.	<p>X9: valor relativo, quociente do tempo de manutenção de áreas alagadas nas várzeas após ocorrência de alturas máximas, relativas à duração do pulso respectivo [dias/dias, %]</p> <p>X10: valor relativo, quociente do tempo de extravasamento de pulso, acima de cota de conexão rio-várzea, sobre o tempo de duração de pulso total [dias/dias, %]</p>

Resiliência	(várzea-rio): capacidade de recuperação potencial do indicador e/ou de alcançar um novo equilíbrio sob a ocorrência de entradas de matéria, energia e/ou informação.	<p>X11: taxa de câmbio da diferença de resposta de produção primária entre áreas preservadas e áreas degradadas, dentro da várzea [g Biomassa/dias]</p> <p>X12: taxa de mudança da vazão para cada unidade de mudança da altura hidrométrica, indicado na curva-chave em situações: a) antes do extravazamento, e b) depois do extravazamento [m³/s/m]</p> <p>X13: superfície dimensional de “loops” do indicador de produção primária versus altura hidrométrica</p> <p>X14: superfície dimensional de “loops” do indicador de produção primária versus altura área alagada</p>
Vulnerabilidade	(várzea-rio): análise de risco e sua gestão em áreas alagadas como forma de quantificação de três fatores: ameaça (probabilidade ou tempo de retorno), vulnerabilidade (ou custos indiretos de falta ou excesso de um serviço ambiental) e exposição (localização relativa da área de análise, dentro da várzea, em relação ao rio principal, contribuinte de matéria, energia e/ou informação intercambiada com a várzea).	<p>X15: diferença de indicador de produção primária, para situações “durante” e “após” valor de inundação máxima, com relação ao valor “antes” do extravazamento [g/g, %]</p> <p>X16: mudança das vazões Q5% e Q95%, na curva de permanência do rio, como impactos diretos de ações antrópicas e/ou do uso [m³/s]</p> <p>X17: mudança de valores de probabilidade de Q95%, como impactos diretos de ações antrópicas e/ou do uso [Probabilidade],</p> <p>X18: produto de velocidade média vezes profundidade média [m²/s]</p>

Figura A-2 – Sistemas (em negrito) e princípios operacionais (em itálico) da pesquisa. Fonte: Mendiondo (2001), MENDIONDO et. al (2000a).

Os cenários propostos (figuras A-2, A-3, A-4 e A-5) são análises preliminares de causa-efeito e causa comum, que avaliam os efeitos (impactos) de ocupações e usos das várzeas. Esses cenários são construídos a partir de curvas eco-hidrológicas. Entre as 18 variáveis escolhidas (ver Tabela anterior) apresentam alguns dos impactos previstos

Figura A-2 – Cenário de recuperação ambiental criado a partir da Curva de Permanência do Rio Jacupiranguinha.

Figura A-3 – Cenário de recuperação ambiental criado a partir da Curva Chave do Rio Jacupiranguinha.

Figura A-4 – Cenário de recuperação ambiental criado a partir das Fases de Inundação do Rio Jacupiranguinha.

Figura A-5 – Cenário de recuperação ambiental criado a partir da Biomassa de Macrófitas do Rio Jacupiranguinha.